



Centre d'Etude Doctorales : Sciences et Techniques et Sciences Médicales

N° d'ordre : /2024

THÈSE DE DOCTORAT

Présentée par
Madame Oumaima HAJJI SOUALFI

Discipline : Sciences de l'Ingénieur
Spécialité : **Génie Industriel**

Sujet de la thèse

Approche intelligence artificielle distribuée pour la planification et l'ordonnancement des blocs opératoires sous contraintes de ressources

Formation Doctorale " Sciences de l'Ingénieur, Sciences Physiques, Mathématiques et Informatique "

Thèse présentée et soutenue **le samedi 03 février 2024 à 15h** au centre de conférence à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, devant un jury composé de :

Nom et Prénom	Titre	Etablissement	
Ahmed EL KHALFI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
Abdelhamid ELAMRI	PES	Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique de Casablanca	Rapporteur
Hassane MOUSTABCHIR	PES	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Rapporteur
Mohammed RAMADANY	PH	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Rapporteur
Abdelmajid EL MRINI	PES	Faculté de Médecine et de Pharmacie de Fès	Examineur
Bilal HARRAS	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Co-Directeur de thèse
Abdellah EL BARKANY	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : Génie Mécanique
Établissement : Faculté des Sciences et Techniques de Fès

Dédicaces

Louange à Dieu tout puissant, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu

Je dédie cette thèse :

A mes très honorable Parents : Mohammed Hajji Soualfi et Meriem EL Amri

Aucune dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer à leur juste valeur la gratitude et l'amour que je leur porte.

Ce que vous tenez entre vos mains est le produit de nombreuses années d'études intensives, de persévérance inébranlable et d'innombrables journées d'acquisition de connaissances.

Votre présence constante, votre soutien indéfectible, vos encouragements incessants et vos sacrifices considérables ont été des piliers essentiels de mon parcours. Vous m'avez toujours fourni la résilience nécessaire pour continuer et le courage pour réussir dans la vie.

Chaque phrase de cette thèse, chaque terme et chaque caractère sont le reflet de la gratitude, de l'admiration, du respect et de l'affection que je vous porte.

Merci d'être MES PARENTS, personnes qui me doivent toute une vie, les héros de mon existence, les vrais travailleurs et la source de tout triomphe dans mon destin.

A mon estimable cher mari : Khalid Chmali

Pour tout l'encouragement, le respect et l'amour que tu m'as offert, je te dédis ce travail, qui n'aurait pas pu être achevé sans ton éternel soutien et optimisme. Je te remercie pour tes sacrifices précieux, qu'ils soient moraux, financiers, ou en termes de conseils judicieux, qui ont contribué à ma réussite. Je te suis infiniment reconnaissante pour ton accompagnement, et je tiens à exprimer ici ma profonde gratitude. Merci d'être un père exemplaire et un mari dévoué, nous te sommes tous très reconnaissants, Yahya et moi. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

A mon cher fils : Yahya Chmali

À toi, mon cher ange, le joyau de mon existence. Ton envie de découvrir le monde, ton enthousiasme et tes yeux brillants sont incomparables. Tes regards et tes sourires m'ont illuminé mon chemin pour avancer. Tu as apporté beaucoup de joie et de bonheur à notre famille. Je t'aime mon cher Yahya et je te souhaite tout le succès du monde.

A mon cher frère : Abderrahim Hajji Soualfi et sa petite famille

Tu as toujours incarné pour moi le modèle du frère digne de respect et d'intégrité. Je tiens à te remercier pour ton affection, ta générosité et ta compréhension. Ton soutien a été un phare tout au long de mon parcours. Merci également pour tes encouragements inestimables. Que Dieu puisse renforcer les liens sacrés qui nous unissent. Ce travail est le fruit de tes sacrifices précieux.

Je tenais également te remercier, chère Zineb, pour l'appui et le réconfort que tu m'as procuré, ainsi que pour tes encouragements.

À la nièce la plus adorable du monde, tu es notre petite étoile brillante qui illumine notre vie. Je t'envoie de gros bisous et te souhaite une vie remplie de joie et de bonheur, tant sur le plan personnel que professionnel, inchaehLAH.

A mon cher frère : Hicham Hajji Soualfi

Le pilier de ma réussite, le sculpteur de ma motivation sur les plans moral et matériel. A tous les moments d'enfance passés avec toi mon frère, en gage de ma profonde estime pour l'aide que tu m'as apporté. Tu m'as soutenu, réconforté et encouragé. Puissent nos liens fraternels se consolider et se pérenniser encore plus.

A mon beau père : Abdelkader Chmali

Vos encouragements ont été un grand apport pour moi. Qu'il me soit permis de vous exprimer toute ma gratitude et fidèle attachement. Merci pour vos sincères prières et pour vos bénédictions, que le bon Dieu vous garde encore longtemps à nos côtés.

A ma chère sœur : Laila Chmali

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour t'exprimer mon affection et mes pensées, tu es pour moi une sœur sur laquelle je peux toujours compter. Je te remercie du fond du cœur d'être toujours à mes côtés, de fournir les efforts afin de me soutenir. Je te souhaite bonheur, réussite et prospérité.

A toute ma famille. A toutes mes amies.

A tous ceux qui ont marqué ma vie pour toujours.

Pour toutes ces personnes, je dis que les mots sont faibles pour traduire ma reconnaissance, ma grande estime et mon grand amour.

Remerciements

Cette thèse est le fruit de nombreuses années de détermination et d'efforts, menée dans le contexte d'une collaboration entre le Laboratoire de Génie Mécanique (GM) de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès et le service de chirurgie traumatologique et orthopédique B4 du CHU Hassan II de Fès. Ce document de thèse est le produit d'un apport personnel, mais avec l'assistance inestimable de plusieurs individus et entités dont je ne peux nier le mérite et la générosité.

Mes remerciements les plus sincères vont d'abord à Monsieur le Professeur Ahmed EL KHALFI pour avoir honoré la présidence du jury de ma thèse, ainsi qu'à Messieurs les Professeurs Abdelhamid ELAMRI, Hassane MOUSTABCHIR, Mohammed RAMADANY et Abdelmajid EL MRINI pour leur attention et leurs remarques et suggestions pertinentes qui ont grandement aidé à améliorer cette thèse. Je les remercie pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de celle-ci et pour leur participation à mon jury de thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude et mon profond respect à mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur Abdellah EL BARKANY, pour avoir eu foi en moi et en mes compétences. Son encadrement rigoureux, sa disponibilité constante et ses directives judicieuses ont été d'une valeur inestimable pour moi. Je ne peux pas non plus passer sous silence son grand cœur, son humanité et sa générosité scientifique.

Je tiens également à remercier profondément le Professeur Bilal HARRAS, mon co-directeur de thèse qui m'a accueilli avec soin et m'a procuré un environnement favorable de travail. Il a été toujours présent et à l'écoute. Assidument prêt à aider à surpasser les obstacles et les difficultés. Je le remercie vivement pour tout le temps qui m'a donné et les efforts qu'il m'a fournis pour l'accomplissement de cette thèse. Je lui exprime mes sincères gratitude.

Je souhaite exprimer ma gratitude au Doyen de la FST de Fès, le Professeur Monsieur Taoufiq ACHIBAT, pour avoir créé un environnement propice à mes recherches. Mes remerciements s'adressent également à la Professeure Madame Ahlame BAGDOURI, Vice-Doyenne, Chargée de la Recherche Scientifique et la Coopération, ainsi qu'à Monsieur le Professeur El Mestafa EL HADRAMI, Vice-Président de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Chargé de la Recherche Scientifique et la Coopération, pour leur soutien ininterrompu.

En outre, j'adresse mon merci au Professeur Abdelmajid EL MRINI, chef de service de chirurgie traumatologique et orthopédique B4 du CHU Hassan II de Fès, pour sa collaboration et sa disponibilité pour la réalisation de ce travail, ainsi que tous les enseignants, les médecins internes et résidents et le reste du corps soignant du même service.

Finalement, je n'ai qu'à exprimer mes sincères dévouements envers toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail et la réussite de cette thèse.

Résumé

La gestion du bloc opératoire est très délicate et complexe en raison de la multiplicité des composantes humaines et matérielles qui y sont impliquées. La clé de cette gestion est l'interaction harmonieuse entre ces différents éléments, dont le résultat est d'assurer des soins médicaux de bonne qualité tout en optimisant l'utilisation des ressources médicales afin d'obtenir un rendement maximal. L'objectif de cette thèse est de développer une méthode de planification et d'ordonnancement des interventions chirurgicales au bloc opératoire adaptée aux ressources humaines et matérielles disponibles, et tenant compte des perturbations fréquentes et des éventuels incidents imprévisibles affectant le processus opératoire. Notre méthode vise l'optimisation de la planification en phase préopératoire et assure une certaine réactivité en temps réel du programme opératoire.

Dans un premier temps, nous avons abordé la problématique et le contexte de la gestion des blocs opératoires, ensuite nous avons réalisé une revue de la littérature traitant la question de la programmation opératoire et les différentes approches de résolution décrites dont l'aboutissement est de cibler la procédure d'optimisation à envisager. Durant la période de réalisation de notre travail, la crise sanitaire liée à la pandémie COVID-19 a eu lieu, ce qui nous a poussé à réaliser une analyse de son impact sur la programmation des procédures chirurgicales du service étudié. Nous avons également proposé des recommandations pour faire face à des situations similaires dans le futur.

Dans un deuxième temps, et en raison de la complexité et l'ampleur des modèles existants, qui sont souvent basés sur la recherche opérationnelle, ainsi que l'explosion combinatoire des contraintes, rendant difficile la recherche de l'optimum pour des tailles d'instances réalistes, nous avons abordé l'intérêt de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) au profit de la planification des blocs opératoires hospitaliers, cela nous a conduit à la création d'un outil d'aide à la gestion du bloc opératoire. Cet outil offre de nouvelles solutions basées sur une logique programmée, plutôt que sur les résolutions calculées des approches traditionnelles. Par la suite, notre étude de cas a impliqué la modélisation des divers éléments du processus de planification des opérations chirurgicales en utilisant un Planificateur Multi-Agents. Ce dernier tient compte des contraintes prédéfinies. Cette modélisation a abouti à la réalisation d'une planification journalière initialement, qui a été améliorée pour fournir un calendrier hebdomadaire du bloc opératoire du service étudié.

Dans un dernier temps, nous avons formulé un modèle mathématique en nombres entiers mixtes pour proposer un programme hebdomadaire du bloc opératoire du même service étudié et répondant aux mêmes contraintes prédéfinies pour le Planificateur Multi-Agents. Nous avons ensuite procédé à une comparaison des deux résultats qui a montré la supériorité et la robustesse du programme opératoire établi par le Planificateur Multi-Agents. Dans ce contexte, nous avons proposé un indicateur de performance mesuré objectivement permettant l'évaluation de nos résultats. Notre collaboration avec le service de chirurgie du CHU Hassan II de Fès nous a permis d'accéder à des données réelles concernant la programmation opératoire hebdomadaire. Les simulations effectuées ont démontré l'adéquation de l'approche IAD pour résoudre le problème posé.

Mots clés : Planification, Ordonnancement, Bloc opératoire, Contraintes de ressources, Intelligence Artificielle Distribuée, Planificateur Multi Agents, Modélisation, Optimisation, Expérimentation.

Abstract

Operating theater management is very delicate and complex because of the many human and material components involved. The key to this management is the harmonious interaction between these different elements, the result of which is to ensure good quality medical care while optimising the use of medical resources in order to achieve maximum efficiency. The aim of our work is to develop a method for planning and scheduling surgical interventions in the operating theater that is adapted to the human and material resources available, and takes account of the frequent disruptions and possible unforeseeable incidents affecting the surgical process. The aim of our method is to optimize planning in the pre-operative phase and ensure that the operating program is responsive in real time.

Firstly, we addressed the problem and the context of operating theater management, then we carried out a review of the literature dealing with the issue of surgical scheduling and the different approaches to resolution described, the end result of which is to target the optimisation procedure to be considered. During the period in which our work was being carried out, there was a health crisis linked to the COVID-19 pandemic, which prompted us to analyse its impact on the scheduling of surgical procedures in the department under study. We also proposed recommendations for dealing with similar situations in the future.

Secondly, given the complexity and scale of existing models, which are often based on operational research, and the combinatorial explosion of constraints, making it difficult to find the optimum for realistic instance sizes, we looked at the benefits of Distributed Artificial Intelligence for planning hospital operating theaters, leading us to create a tool to help manage operating theaters. This tool offers new solutions based on programmed logic, rather than the calculated resolutions of traditional approaches. Our case study then involved modelling the various elements of the surgical planning process using a Multi-Agent Planner. The latter takes into account predefined constraints. This modelling resulted in the production of an initial daily schedule, which was enhanced to provide a weekly schedule for the operating theater in the department under study.

Lastly, we formulated a mixed integer mathematical model to propose a weekly schedule for the operating theater of the same department studied and meeting the same predefined constraints for the Multi-Agent Planner. We then compared the two results, which showed the superiority and robustness of the operating schedule established by the Multi-Agent Planner. In this context, we proposed an objectively measured performance indicator for evaluating our results. Our collaboration with the surgery department of the Hassan II University Hospital in Fez gave us access to real data concerning the weekly operating schedule. The simulations carried out demonstrated the suitability of the IAD approach for solving the problem posed.

Keywords: Planning, Scheduling, Operating Theater, Resource Constraints, Distributed Artificial Intelligence, Multi Agent Planner, Modelling, Optimisation, Experimentation.

Table des matières

Résumé	5
Abstract.....	6
Liste des figures.....	11
Liste des tableaux	13
Liste des abréviations.....	14
Introduction générale.....	15
Chapitre 1 : Gestion des blocs opératoires : Contexte et problématique	17
1.1 Introduction	18
1.2 Etablissement hospitalier au Maroc.....	18
1.2.1 Système de santé national	18
1.2.2 Dépenses de santé au Maroc	20
1.3 Organisation interne de l'hôpital	21
1.3.1 Description de la structure d'un hôpital.....	21
1.3.2 Présentation du CHU Hassan II de Fès.....	22
1.4 Management du bloc opératoire	23
1.4.1 Description du bloc opératoire	25
1.4.2 Processus opératoire	27
1.4.3 Programmation opératoire	29
1.4.3.1 Planification à l'avance « Advance Scheduling »	29
1.4.3.2 Ordonnancement d'affectation « Allocation Scheduling ».....	32
1.4.4 Niveaux de décision	32
1.5 Problématique et orientation de l'activité de recherche	34
1.6 Conclusion.....	35
Chapitre 2 : Etat de l'art en planification et ordonnancement des blocs opératoires	36
2.1 Introduction	37
2.2 Concepts généraux	37
2.3 Systèmes d'information hospitaliers.....	38
2.4 Approche et méthodologie de recherche	39
2.5 Programmation du bloc opératoire axé sur les ressources.....	41
2.5.1 Programmation prédictive axée uniquement sur les salles opératoires. ..	41
2.5.2 Programmation prédictive incluant les salles opératoires et salle de réveil.	41
.....	41
2.5.3 Programmation prédictive incluant les ressources de transport du patient	42
.....	42
2.5.4 Programmation prédictive incluant l'unité de soins intensifs (USI).	43

2.5.5	Programmation prédictive incluant autres ressources	43
2.6	Revue de littérature de la planification des interventions chirurgicales.....	44
2.6.1	Notation	44
2.6.2	Méthodes de résolution.....	46
2.6.3	Synthèse pour le champ α	47
2.6.4	Synthèse pour le champ β	48
2.6.5	Synthèse pour le champ γ	48
2.6.6	Synthèse de méthodes de résolution.....	51
2.7	Revue de la littérature de l'ordonnancement des blocs opératoires	52
2.7.1	Ordonnancement centré sur les salles opératoires.....	52
2.7.2	Ordonnancement du bloc opératoire	54
2.8	Conclusion.....	55
Chapitre 3	Impact de la pandémie COVID - 19 sur la planification des blocs opératoires...	56
3.1	Introduction	57
3.2	Répercussion de la pandémie COVID-19 sur l'activité des blocs opératoires :	58
3.2.1	Contexte général.....	58
3.2.2	Impact sur le plan mondial	58
3.2.3	Impact sur le plan national	61
3.2.4	Impact direct sur les ressources humaines de santé au Maroc	61
3.2.4.1	Etude national transversale, descriptive et analytique.....	61
3.2.4.2	Mesures préventives	63
3.3	Etude d'un cas réel	63
3.3.1	Présentation du Service étudié.....	63
3.3.2	Analyse de l'impact de la pandémie COVID-19 sur l'activité opératoire globale du service étudié	64
3.3.2.1	Les catégories chirurgicales effectuées	64
3.3.2.2	Analyse de la variation de l'activité chirurgicale entre 2019 et 2020	65
3.3.2.3	Estimation des heures opératoires à reprogrammer.....	67
3.3.3	Discussion.....	69
3.3.4	Limites de l'étude	69
3.4	Leçons apprises pour faire face à des situations critiques similaires	70
3.4.1	Dans un contexte global.....	70
3.4.2	Dans le cadre de notre étude	70
3.5	Conclusion.....	71
Chapitre 4	L'intelligence artificielle distribuée au service de la planification des blocs opératoires	72
4.1	Introduction	73
4.2	Historique des méthodes de programmation	73

4.3	L'intelligence artificielle distribuée	74
4.4	Notion d'agent	75
4.4.1	Propriétés d'un agent	76
4.4.2	Types d'agent	76
4.5	Système Multi Agents	77
4.5.1	L'association FIPA	78
4.5.2	Langage de communication ACL	80
4.5.3	Mécanismes d'interaction entre agents	82
4.5.3.1	Coopération :	82
4.5.3.2	Coordination	82
4.5.3.3	Négociation	83
4.5.4	Modes de communication entre les agents	83
4.5.5	Architectures des SMA	84
4.5.5.1	Architecture BDI	84
4.5.5.2	Architecture réactive	85
4.5.5.3	Architecture hybride	85
4.5.6	Domaines d'application des SMA	86
4.5.7	Plates-formes de développement des SMA	86
4.6	Plateforme JADE	88
4.7	Planification multi-agents	89
4.7.1	Modèles de la planification multi-agents	89
4.7.2	Planificateur multi-agents	91
4.7.3	Planification multi-agents pour la gestion des blocs opératoires	91
4.8	Conclusion	91
Chapitre 5 : Planification journalière et hebdomadaire du bloc opératoire par le modèle PMA : Validation expérimentale		92
5.1	Introduction	93
5.2	Problématique du service étudié	93
5.3	Modèle PMA proposé pour une planification journalière du bloc opératoire	94
5.3.1	Rôle des différents agents	94
5.3.2	Contraintes de la planification journalière	96
5.3.3	Algorithme PMA journalier	96
5.3.4	Résultats de la simulation journalière	98
5.4	Modèle PMA proposé pour une planification hebdomadaire du bloc opératoire	103
5.4.1	Rôle des différents agents	103
5.4.2	Contraintes de la planification hebdomadaire	104
5.4.3	Algorithme PMA amélioré hebdomadaire	104
5.4.4	Résultats de la simulation hebdomadaire	106

5.5	Discussion	110
5.6	Evaluation des performances de la solution PMA via la modélisation MILP ..	111
5.6.1	Travaux connexes	111
5.6.2	Modèle MILP pour la planification des blocs opératoires	113
5.6.2.1	Notation	113
5.6.2.2	Variable de décision	114
5.6.2.3	Fonction objective	114
5.6.2.4	Contraintes.....	114
5.6.3	Comparaison des résultats : PMA Vs MILP	114
5.6.3.1	Scénario hebdomadaire de simulation.....	114
5.6.3.2	Résultats PMA et MILP	115
5.6.3.3	Comparaison des résultats	117
5.7	Conclusion.....	119
	Conclusion générale et perspectives	121
	Production scientifique.....	123
	Bibliographie	125
	Annexes	144

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Evolution de la dépense totale de santé au Maroc.....	20
Figure 1.2 : Répartition des établissements de santé au Maroc	20
Figure 1.3 : Vision structurelle d'un système hospitalier	21
Figure 1.4 : Organigramme du CHU Hassan II de FES	23
Figure 1.5 : Connexion entre le bloc opératoire et les autres services.....	24
Figure 1.6 : Affectation des patients aux différents types de salles opératoires	27
Figure 1.7 : Les étapes fonctionnelles d'une intervention en chirurgie....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 1.8 : Différentes phases du processus opérationnel	28
Figure 1.9 : Planification coopérative pour l'élaboration du programme opératoire	31
Figure 1.10 : la procédure de la programmation opératoire.....	32
Figure 1.11 : Les niveaux de décision du bloc opératoire	33

Chapitre 2

Figure 2.1 : Classification des problèmes de planification des activités chirurgicales.....	38
Figure 2.2 : Procédure et méthodologie de recherche.....	40
Figure 2.3 : Evolution des publications des problèmes de planification et d'ordonnancement.....	40
Figure 2.4 : Pourcentage des travaux intéressés par la programmation du bloc opératoire.....	44
Figure 2.5 : Méthodes de résolution.....	46
Figure 2.6 : Pourcentage des méthodes de résolution utilisées.....	52

Chapitre 3

Figure 3.1 : Impact de la pandémie COVID-19 sur l'activité chirurgicale mensuelle du service étudié	67
--	----

Chapitre 4

Figure 4.1 : Historique des méthodes de programmation	73
Figure 4.2 : Cycle de vie d'un agent.....	79
Figure 4.3 : Modèle de référence de gestion des agents FIPA.....	80
Figure 4.4 : Architecture BDI	84
Figure 4.5 : Architecture réactive	85
Figure 4.6 : Architecture hybride.....	85
Figure 4.7 : Un exemple de deux plateformes JADE.	89
Figure 4.8 : Modèles de la planification multi-agents	90

Chapitre 5

Figure 5.1 : Abstraction de la structure de la solution PMA	95
Figure 5.2 : Architecture PMA pour la planification journalière du bloc opératoire	96
Figure 5.3 : Interactions des agents du PMA journalier	97
Figure 5.4 : Agents du planificateur multi-agents JADE.....	98
Figure 5.5 : L'agent Surgeon-Team du PMA	98

Figure 5.6 : Planning opératoire (P1) du Lundi concernant l'équipe A	99
Figure 5.7 : Notification du changement du planning opératoire	100
Figure 5.8 : Planning opératoire (P2) du Lundi concernant le Team A.....	101
Figure 5.9 : Planning opératoire (P1) du Mardi concernant le Team A	102
Figure 5.10 : Planning opératoire (P2) du Mardi concernant le Team A	103
Figure 5.11 : Structure PMA pour la planification hebdomadaire du bloc opératoire	104
Figure 5.12 : Interactions des agents du PMA hebdomadaire	105
Figure 5.13 : Le journal de bord de l'agent Manager	106
Figure 5.14 : Interactions de l'agent Room avec l'agent Manager.....	106
Figure 5.15 : L'agent Sniffer de JADE.....	107
Figure 5.16 : Illustration pratique de la programmation journalière d'une équipe.....	108
Figure 5.17 : Programme opératoire hebdomadaire global obtenu par la solution PMA	109
Figure 5.18 : Programme opératoire hebdomadaire global du bloc opératoire obtenu par la solution MILP	116
Figure 5.19 : Taux d'occupation PMA vs MILP	118

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Abréviations des méthodes exactes et approximatives	47
Tableau 2.2 : Champ α – Structure	47
Tableau 2.3 : Champ β – règles de gestion	48
Tableau 2.4 : Champ γ – objectifs	50
Tableau 2.5 : Etat de l’art de la modélisation de la planification et d’ordonnancement	51

Chapitre 3

Tableau 3.1 : Proportion des suspensions complètes des chirurgies programmées dans le monde... 60	60
Tableau 3.2 : Distribution de la durée d'intervention pour toutes les catégories chirurgicales	64
Tableau 3.3 : Impact de la pandémie de COVID-19 sur l’activité chirurgicale globale	66
Tableau 3.4 : Estimation du nombre d'heures d'opération à reprogrammer	68

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Agents cognitifs vs agents réactifs	77
Tableau 4.2 : Structure d'un message FIPA-ACL	81

Chapitre 5

Tableau 5.1 : Durée des interventions PMA vs MILP.....	117
---	-----

Liste des abréviations

H :	Heuristics
MH :	Meta-heuristics
BB :	Branch and Bound
BP :	Branch and Price
PLNE :	Programmation linéaire en nombres entiers
PM :	Programmation mathématique en nombres entiers mixtes
RS :	Recuit simulé
GC :	Méthode de la génération de colonnes
AG :	Algorithme génétique
S :	Simulation
IAD :	Intelligence Artificielle Distribuée
USPA :	Unité de Soins Post-Anesthésiques
USI :	Unité de Soins Intensifs
CHU :	Centre Hospitalier Universitaire
OS :	Open Scheduling
BS :	Block Scheduling
MBS :	Modified Block Scheduling
SMA :	Système Multi-Agents
PMA :	Planificateur Multi-Agents
JADE :	Java Agent Development
FIPA :	Foundation of Intelligent Physical Agents
BDI :	Belief- Desire- Intention
ACL :	Agent Communication Language
CNP :	Contract Net Protocol
DF :	Directory Facilitator
AMS :	Agent Management System
MTP :	Message Transport System
ACC :	Agent Communication Channel
MILP :	Mixed Integer Linear Programming
OBOCC :	Ordonnancement Bi-Objective des Cas Chirurgicaux
OCC :	Ordonnancement des Cas Chirurgicaux
SDMA :	Système Décisionnel Multi-Agents
PAQ :	Problème d'Affectation Quadratique

Introduction générale

Dans un environnement marqué par une concurrence intense et une quête constante d'amélioration des performances, les hôpitaux sont confrontés au défi crucial d'adapter leur système de gestion pour assurer leur pérennité. La prestation de soins de santé ne se concentre plus uniquement sur l'objectif de l'excellence médicale, mais doit également intégrer le critère de l'efficacité et de l'excellence du système de gestion. Face à ce défi, les gestionnaires de soins ont besoin d'outils pour garantir que toutes les ressources à leur disposition sont utilisées de manière efficiente et efficace, tout en fournissant des soins de haute qualité aux patients sans négliger la convenance et la satisfaction des chirurgiens. Le bloc opératoire représente une part significative des dépenses financières d'un hôpital. Par conséquent, l'amélioration de son efficacité est une priorité pour les gestionnaires hospitaliers. Étant donné la multitude de ressources humaines hautement qualifiées, le coût élevé des ressources matérielles, la difficulté de coordonner les procédures chirurgicales avec la disponibilité des ressources et les nombreuses perturbations inhérentes à son processus, ce secteur est sans aucun doute le plus complexe à gérer en termes de planification et de gestion en temps réel.

Le problème de la planification du bloc opératoire a fait l'objet de nombreuses études et a généré une littérature considérable. Cette littérature révèle une utilisation exclusive d'approches déterministes ou stochastiques de la planification avec des données statiques. Ces approches ont du mal à prendre en compte, voire ignorent complètement, l'ensemble des perturbations. Cependant, le processus de la salle d'opération est souvent soumis à diverses formes de perturbation et imprévus fréquents qui pourraient rendre la planification préalable totalement inutile lors de la phase de mise en œuvre.

L'amélioration du fonctionnement des blocs opératoires est un problème d'une complexité extrême, exacerbée par la nature aléatoire intrinsèque du problème. De nombreuses contraintes doivent être prises en compte. En conséquence, notre attention se portera sur deux sous-problèmes déjà identifiés comme étant difficiles : la planification et l'ordonnancement des interventions chirurgicales. Ces problèmes, qui sont au cœur de la programmation opératoire, visent à élaborer un programme opératoire à la fois réalisable et efficace pour le bloc opératoire. L'aspect novateur de la méthode suggérée réside dans sa capacité à générer un programme initial optimisé en utilisant des données statiques. De plus, elle offre la possibilité d'une mise à jour automatique du planning en temps quasi réel, en fonction des données dynamiques qui émergent lors de la phase de mise en œuvre en aval.

Suite à l'élargissement du champ d'application des Systèmes Multi-Agents (MAS), l'approche de planification Multi-Agents (PMA) a vu le jour. Récemment, la PMA s'est distinguée comme une nouvelle méthodologie qui vise à intégrer les capacités de planification au sein d'agents intelligents, permettant ainsi à un groupe d'agents de concevoir un plan d'action pour atteindre un ensemble d'objectifs communs. La PMA se positionne comme une méthode de planification logique et efficace pour les applications gérées par un Système multi-agents, où plusieurs entités ou agents planifient et agissent conjointement en combinant leurs connaissances, informations et capacités.

L'objectif principal de cette thèse est de concevoir et développer un planificateur multi-agents basé sur l'intelligence artificielle distribuée permettant la planification préopératoire des chirurgies électives prenant en considération plusieurs contraintes et produisant un calendrier opératoire global efficace, dynamique et flexible. Pour évaluer l'efficacité de la solution que nous avons générée grâce au planificateur multi-agents suggéré, nous avons effectué plusieurs simulations et études de cas relatives à la planification des salles d'opération.

Pour atteindre notre objectif, notre travail s'articule autour de cinq chapitres organisés de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous explorons en profondeur le contexte de notre sujet d'étude et la question à résoudre. Nous commençons par une introduction du système hospitalier, en mettant l'accent sur son organisation interne et son modèle de gestion de manière générale. Ensuite, Nous caractérisons le bloc opératoire dans un environnement hospitalier, nous identifions les ressources considérables qu'il nécessite et nous décrivons son processus opératoire ainsi que la complexité de son fonctionnement. Nous soulignons également les différents types d'incertitudes qui peuvent survenir et l'importance de les intégrer lors de la phase de planification, ce qui constitue les motivations de notre recherche.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une revue de la littérature qui a examiné, analysé et élaboré les problèmes de planification et d'ordonnancement des activités chirurgicales sous contraintes de ressources, en proposant une notation uniforme qui identifie clairement le problème à l'origine. Par la suite, nous nous concentrons sur le positionnement du problème en termes de complexité, des différentes approches de résolution et de la méthodologie de recherche adoptée. Nous réalisons également des tableaux de synthèse regroupant une grande partie des travaux déjà traités dans la littérature, conduisant à une analyse comparative des données.

Le troisième chapitre est consacré pour l'examen des conséquences de la pandémie COVID-19 sur l'activité des blocs opératoires à l'échelle mondiale et nationale. Par la suite, nous menons une étude de cas réel au sein d'un service de chirurgie du CHU Hassan II de Fès, afin d'analyser l'impact de cette crise sanitaire sur l'activité opératoire globale du service en question. Enfin, nous clôturons cette section par les leçons tirées et les recommandations suggérées pour faire face à des situations critiques similaires à l'avenir.

Dans le quatrième chapitre, nous explorons diverses définitions liées à la notion d'agent, une terminologie dont l'interprétation continue d'évoluer en raison de son incorporation dans divers domaines de recherche. Nous examinons également les différentes catégories d'agents et leurs attributs distinctifs. Par la suite, nous traitons les systèmes multi-agents, en mettant l'accent sur les mécanismes d'interaction entre les agents et les modes de communication. Nous présentons ensuite les architectures des systèmes multi-agents, leurs domaines d'application et les plateformes de développement. Nous mettons l'accent sur la plateforme JADE qui sera utilisée pour modéliser notre processus réel du service étudié. En conclusion, nous discutons la planification multi-agents pour résoudre le problème de la gestion des blocs opératoires.

Dans le dernier chapitre, nous exposons les résultats de notre expérimentation élaborée au sein du service étudié. Nous présentons le Planificateur Multi-Agents (PMA) comme solution au problème de la planification opératoire journalière en premier temps et hebdomadaire dans en deuxième temps. La contribution de cette partie de notre étude est d'améliorer la qualité de la programmation chirurgicale après avoir élucidé sa conception classique actuelle, dans le but de maximiser l'occupation des salles opératoires et par conséquent de satisfaire à la fois les chirurgiens et les patients. L'objectif de ce chapitre est de développer un programme opératoire quotidien puis hebdomadaire en utilisant un PMA basé sur une approche d'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD). Ce programme, de nature réactive et flexible, répond aux différentes perturbations qui peuvent entraver le déroulement normal des activités chirurgicales du bloc opératoire. Nous visons par la suite à évaluer notre outil proposé pour optimiser la planification et l'organisation du bloc opératoire. Nous effectuons des simulations et nous présentons les résultats obtenus à la fois par le planificateur multi-agents et par le modèle mathématique en nombres entiers mixtes (MILP). Ces résultats appliqués sur la même période et tenant compte des mêmes contraintes prédéfinies du service étudié, montrent la supériorité, l'efficacité et la performance du PMA basé sur l'IAD.

Chapitre 1

Gestion des blocs opératoires :

Contexte et problématique

Chapitre 1

Gestion des blocs opératoires : Contexte et problématique

1.1 Introduction

Au cours des deux dernières décennies, les institutions hospitalières ont été soumises à une transformation, dictée par leurs autorités de tutelle et les patients, qui devrait les orienter vers l'adoption d'une structure organisationnelle plus performante. Cette transformation est caractérisée par une optimisation des processus, une amélioration de la qualité des soins et une augmentation de l'efficacité opérationnelle.

Les services de santé, qui sont les piliers des sociétés contemporaines, jouent un rôle crucial dans l'activité économique d'un pays. La préservation de la santé est une priorité universelle. En Europe, des plans sociaux et des ressources financières sont mis en place pour faciliter l'accès aux soins et améliorer leur qualité (AGIM, 2009).

Les établissements de santé évoluent dans un contexte de compétitivité croissante. Les structures de moindre envergure s'allient pour se distinguer sur un marché de la santé où la rivalité est féroce. À l'image d'une entreprise de services industriels (transport, hôtellerie, etc.), les hôpitaux s'engagent à fournir le meilleur service possible aux patients qu'ils reçoivent. Des investissements considérables en ressources humaines et matérielles sont réalisés à cet effet, bien qu'ils soient disponibles en quantité limitée. En effet, les hôpitaux sont confrontés à une pénurie de chirurgiens, d'anesthésistes et d'infirmières.

L'établissement hospitalier est souvent considéré comme l'une des structures organisationnelles les plus complexes qui soient. En raison de leurs structures et de leurs modes de fonctionnement, les systèmes hospitaliers sont des entités complexes caractérisées par une multitude d'interactions de diverses natures. Par conséquent, la prise en compte de cette complexité est actuellement le principal défi organisationnel auquel l'hôpital est confronté (Aïda Jebali, 2004).

Nous débuterons par une présentation du système hospitalier, en mettant en lumière son organisation interne et son modèle de gestion de manière globale. Par la suite, nous porterons une attention particulière à la gestion des blocs opératoires ainsi que notre problématique de recherche.

1.2 Etablissement hospitalier au Maroc

1.2.1 Système de santé national

L'hôpital public marocain contemporain, à l'image des autres établissements hospitaliers à travers le monde, évolue dans un environnement constamment en mutation. Cette évolution est notamment due à l'évolution continue des besoins de la population et des utilisateurs, ainsi qu'aux exigences liées à un accès équitable à des soins de proximité, sûrs et de qualité.

Il est également soumis à la nécessité d'évoluer en tenant compte des avancées fulgurantes de la technologie, notamment dans les domaines numérique et médical, sans négliger la recherche scientifique et les innovations en matière de techniques de soins et de prise en charge. À ces défis s'ajoute une contrainte majeure, celle de l'économie, liée au financement des soins, au coût des

prestations et au budget de l'hôpital.

Il est important de souligner que l'hôpital est un élément fondamental d'un système de soins qui est lui-même soumis à des contraintes et des défis à la fois nationaux et internationaux. Ces défis comprennent les évolutions en matière de droits de l'homme, de législation, ainsi que de nouveaux engagements envers des objectifs internationaux tels que les Objectifs de Développement Durables et la couverture sanitaire universelle. Enfin, les modifications dans la gouvernance administrative à l'échelle nationale, comme le projet de régionalisation avancée dans notre contexte, ont conduit à l'émergence d'un autre défi, celui de la responsabilité territoriale et démographique de cet hôpital. (Ahmed Boudak & Abdelmajid Elouadi, 2020).

La structure de santé nationale du Maroc est conçue autour des secteurs public et privé.

✚ **Le secteur public** englobe toutes les ressources, institutions, moyens et activités qui visent à renforcer, prévenir, promouvoir et améliorer la santé de la population. Cette offre de soins est sous la responsabilité du ministère de la Santé. En outre, le secteur public comprend également les Forces armées royales, les collectivités territoriales et d'autres départements ministériels.

✚ En ce qui concerne **le secteur privé**, il est constitué d'établissements privés à **but lucratif**, notamment des cabinets de consultation, d'imagerie médicale, de biologie, de soins et de rééducation, de chirurgie dentaire, des cliniques, des pharmacies et des dépôts de médicaments, entre autres. Ces entités sont principalement situées dans des zones urbaines où le niveau socio-économique est élevé et où se trouve une clientèle solvable. Ce segment, tout comme le secteur public, fournit des soins de santé de base, des soins hospitaliers et d'autres services (pharmacies, laboratoires, imagerie médicale, etc.). Le secteur privé comprend également des établissements à caractère social à **but non lucratif** relevant de la Caisse nationale de sécurité sociale, des mutuelles, du Croissant Rouge marocain, des organisations non gouvernementales (ONG), etc. Cependant, il convient de noter que le dit secteur n'intègre que timidement les différents programmes sanitaires recommandés par les départements de santé, par exemple, les programmes de lutte et de prévention de certaines maladies (Abdelkader El Khider et Hanaa Imichoui, 2020).

Le système de santé national est structuré selon une approche mixte (ni horizontal ni vertical), où diverses institutions spécialisées interviennent à chaque étape du processus de soins, chacune se concentrant sur une section spécifique de la population.

Le Ministère de la Santé est organisé en trois niveaux hiérarchiques : central, régional et provincial. La région est considérée comme un élément clé pour la mise en œuvre des stratégies globales et des plans d'action par les autorités sanitaires. Quant à l'échelon provincial, il comprend un réseau hospitalier et un réseau de soins ambulatoires (Abdelkader El Khider et Hanaa Imichoui, 2020).

L'adoption d'une approche régionale pour le système de santé marocain est une décision stratégique qui a été affirmée depuis longtemps. Cependant, sa mise en œuvre progresse lentement, le processus n'en étant qu'à ses premières phases, et les régions disposent encore d'un champ d'action limité en matière de santé.

1.2.2 Dépenses de santé au Maroc

Au cours des deux dernières décennies, on a observé une augmentation régulière des dépenses totales annuelles consacrées à la santé au Maroc (Figure 1.01).

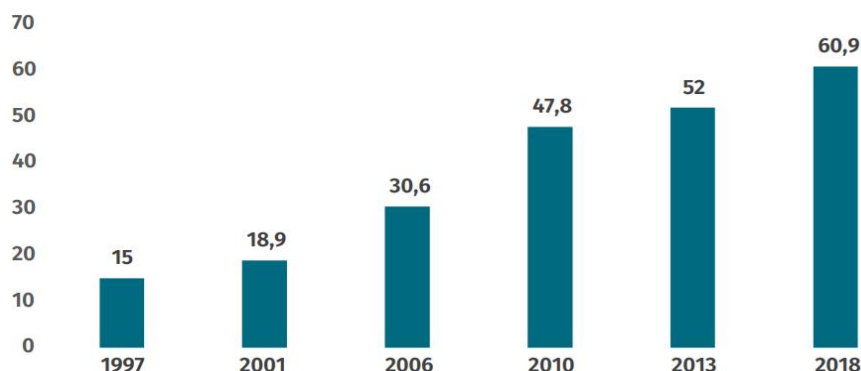


Figure 1.1 : Evolution de la dépense totale de santé au Maroc (En Milliards de Dhs), 1997-2018 (Source : COMPTES NATIONAUX DE LA SANTE – 2018)

Le budget général du ministère de la santé et de la protection sociale en 2021 (en DH) est de 19774145000, le pourcentage de ce budget par rapport au budget total de l'état (BGE) en 2021 est de 6,53% (Santé en chiffres 2021). Le Produit intérieur brut (PIB) par habitant (en DH) en 2021 est de 35363 (Santé en chiffres 2021), alors qu'en 2020 les dépenses de santé par rapport au PIB étaient de 5.5% et les dépenses globales de santé par rapport au budget de l'Etat étaient de 7.7%. Ces indicateurs sont les plus bas par rapport à un ensemble de pays comme l'Algérie (7.1% du PIB et 10.7% du BGE) et la Tunisie (6.7% du PIB ; 13.6% du BGE) (Abdelkader El Khider et Hanaa Imichoui, 2020).

D'après l'analyse des données statistiques du secteur national de la santé (Figure 1.0.2) on trouve que la plupart des hôpitaux se centralisent fortement en milieu urbain. Aussi, ces établissements se concentrent au niveau régional et provincial alors que les niveaux locaux manquent d'un nombre suffisant des hôpitaux (Abdelkader El Khider et Hanaa Imichoui, 2020). Cela met en évidence l'insuffisance des services fournis et le déficit important, tant qualitatif que quantitatif, en professionnels de santé. De plus, cela souligne les inégalités d'accès aux services de santé entre les différentes régions et entre les zones rurales et urbaines.

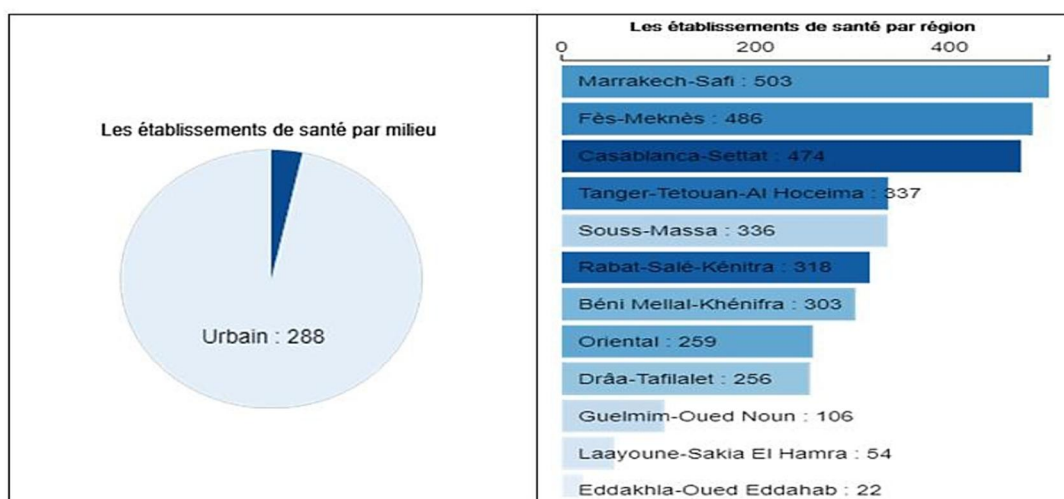


Figure 1.2 : Répartition des établissements de santé au Maroc (Source : Ministère de la Santé 2019)

1.3 Organisation interne de l'hôpital

1.3.1 Description de la structure d'un hôpital

En ce qui concerne l'organisation, un aspect où la culture hospitalière est particulièrement ancrée est la notion de structure de soins. Cela se réfère à une unité territoriale qui regroupe des équipes de soins dédiées à une activité spécifique. Ces activités peuvent être centrées sur un organe ou une pathologie, comme c'est généralement le cas pour les services, ou sur l'utilisation de certaines techniques, comme c'est généralement le cas pour les unités fonctionnelles (Aïda Jebali, 2004).

En général, le système hospitalier fonctionne selon une structure hiérarchique. Il est régi par un système centralisé de gestion et d'approvisionnement, et est administré par un conseil d'administration et un directeur général. La direction supervise diverses unités, y compris les unités de soins (qui constituent le secteur de production de soins) et les unités administratives. Ces unités sont ensuite subdivisées en services, qui sont classés en fonction de leurs activités (M. Rudy De Winne, 2006).

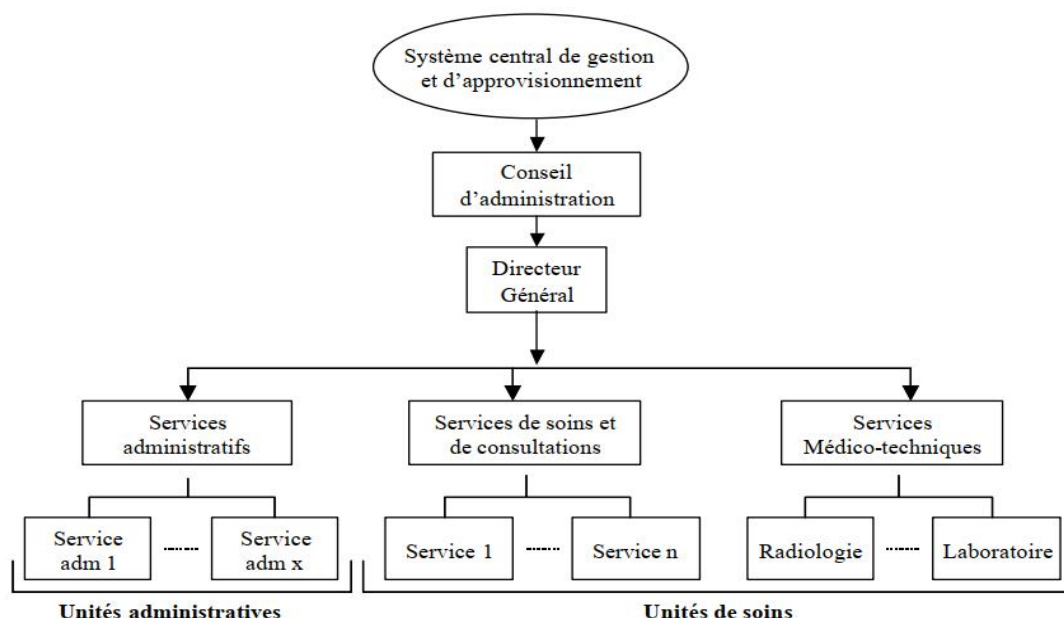


Figure 1.3 : Vision structurelle d'un système hospitalier (Source : M. Rudy De Winne, 2006)

Comme illustré dans la figure 1.3, un système hospitalier se compose principalement de plusieurs centres de responsabilités : le système central de gestion et d'approvisionnement, le conseil d'administration, les services administratifs, les services de soins et de consultations, et les services médico-techniques. Chaque centre de responsabilité est subdivisé en unités fonctionnelles qui exécutent un type spécifique d'activité et qui sont associées à un service. De manière analogue, (Moison et Tonneau, 1999) ont également examiné le système d'un établissement hospitalier et ont classé la grande diversité d'unités en cinq secteurs :

- **Les services cliniques :** constituent l'espace d'accueil des patients. L'équipement de ces services est généralement limité (principalement des lits), à l'exception de certaines unités spécifiques, comme les unités de soins intensifs (par exemple, la réanimation). L'organisation du travail dans ces services est étroitement liée aux pratiques médicales : chaque service est dirigé par un médecin spécialisé.

- ✚ **Les consultations**, souvent intégrées aux services cliniques au point qu'elles sont parfois difficilement dissociables en termes de ressources, servent de filtre entre la demande du public et l'hôpital. Le service d'urgence occupe une place particulière dans ce secteur, car les patients y arrivent sans rendez-vous et nécessitent généralement des soins immédiats. Tout comme les services cliniques, les consultations sont des unités peu technologiques, à l'exception de certains services d'urgence.
- ✚ **Le plateau technique** englobe diverses disciplines, dont la chirurgie, l'obstétrique, la pédiatrie, l'anesthésie-réanimation, les explorations fonctionnelles et les disciplines interventionnelles, l'imagerie et la biologie. Il vise à fournir des soins de qualité 24 heures sur 24 à la population du territoire qu'il dessert (Revel et al., 2003). Les responsables de ces services sont des professionnels de santé (médecins, pharmaciens, chirurgiens, etc.) ayant suivi une formation spécialisée dans leur domaine respectif. Ces unités collaborent avec les services cliniques et les consultations. Elles représentent une concentration et une mutualisation des équipements, résultant des importants investissements nécessités par la technicisation de la médecine.
- ✚ **Le secteur logistique** est responsable de l'hébergement des patients et réalise une variété de tâches pour les unités mentionnées précédemment. Il s'occupe principalement de la restauration et de la blanchisserie, des activités qui peuvent parfois être sous-traitées, mais également du transport des patients, des consommables, des examens, etc. La pharmacie, qui est le lieu de stockage, de préparation et de distribution des produits médicamenteux, peut également être classée dans ce secteur, bien qu'elle puisse appartenir à d'autres unités.
- ✚ **Le secteur administratif** comprend la direction générale, le service financier, le service du personnel, l'économet, l'informatique, etc. Le directeur de l'hôpital fait partie d'un corps d'administrateurs spécialisés et n'est donc pas un médecin. Dans un Centre Hospitalier Régional (CHR), l'équipe de direction est composée de quelques dizaines de personnes, un nombre systématiquement faible par rapport aux entreprises industrielles de taille comparable.

1.3.2 Présentation du CHU Hassan II de Fès

Dans notre travail, nous avons pris le cas du Centre Hospitalier Universitaire Hassan II (CHU) de Fès qui est un établissement semi-public de santé a été créé en novembre 2001 et c'est en janvier 2009 que le nouveau complexe hospitalier a été inauguré par SM le Roi Mohammed VI. Cet édifice sanitaire, s'étend sur une superficie de 12 hectares, et situé dans la ville de Fès, à proximité de la faculté de médecine et de pharmacie et de médecine dentaire. Il est prévu pour répondre aux besoins de plus de quatre millions d'habitants (Régions Fès Boulomane, Meknès-Tafilalet et Taza-Al Hoceima-Taounate), a pour objectif d'améliorer le taux de couverture médicale de cette population et de décongestionner les structures sanitaires déjà existantes dans ces régions et d'installer un esprit de qualité et une satisfaction des patients.

Le CHU Hassan II de Fès a pour mission de : dispenser des soins médicaux ; conduire des travaux de recherche médicale dans le strict respect de l'intégrité physique et morale et de la dignité des malades ; participer à l'enseignement clinique universitaire et post-universitaire médical et pharmaceutique ainsi qu'à la formation du personnel paramédical et de concourir à la réalisation des objectifs fixés en matière de Santé Publique par l'Etat.

Il est institué auprès du directeur du CHU Hassan II un comité consultatif de suivi et des comités médico- techniques. La Direction du CHU Hassan II dispose d'une administration composée de : un secrétariat général ; une division des ressources humaines et de la formation et de la coopération ; une

division des affaires financières et logistiques et de maintenance ; une division des affaires médicales et des soins infirmiers ; un service d'informatique et de statistiques ; un service d'audit et de contrôle interne (Figure 1.4).

En plus de l'hôpital Omar Drissi et l'hôpital psychiatrique Ibn Al Hassan, le CHU de Fès se compose d'un hôpital des spécialités (contenant deux blocs opératoires centraux dans le bâtiment A en deuxième et troisième étage où se situent différentes salles opératoires principales et ambulatoires dédiées aux différentes spécialités chirurgicales du CHU avec un bloc opératoire des urgences A0 où sont réalisées les interventions chirurgicales urgentes), d'un hôpital mère-enfant, d'un hôpital d'oncologie et de médecine nucléaire, d'un laboratoire central d'analyses médicales et d'un centre de consultations externes.

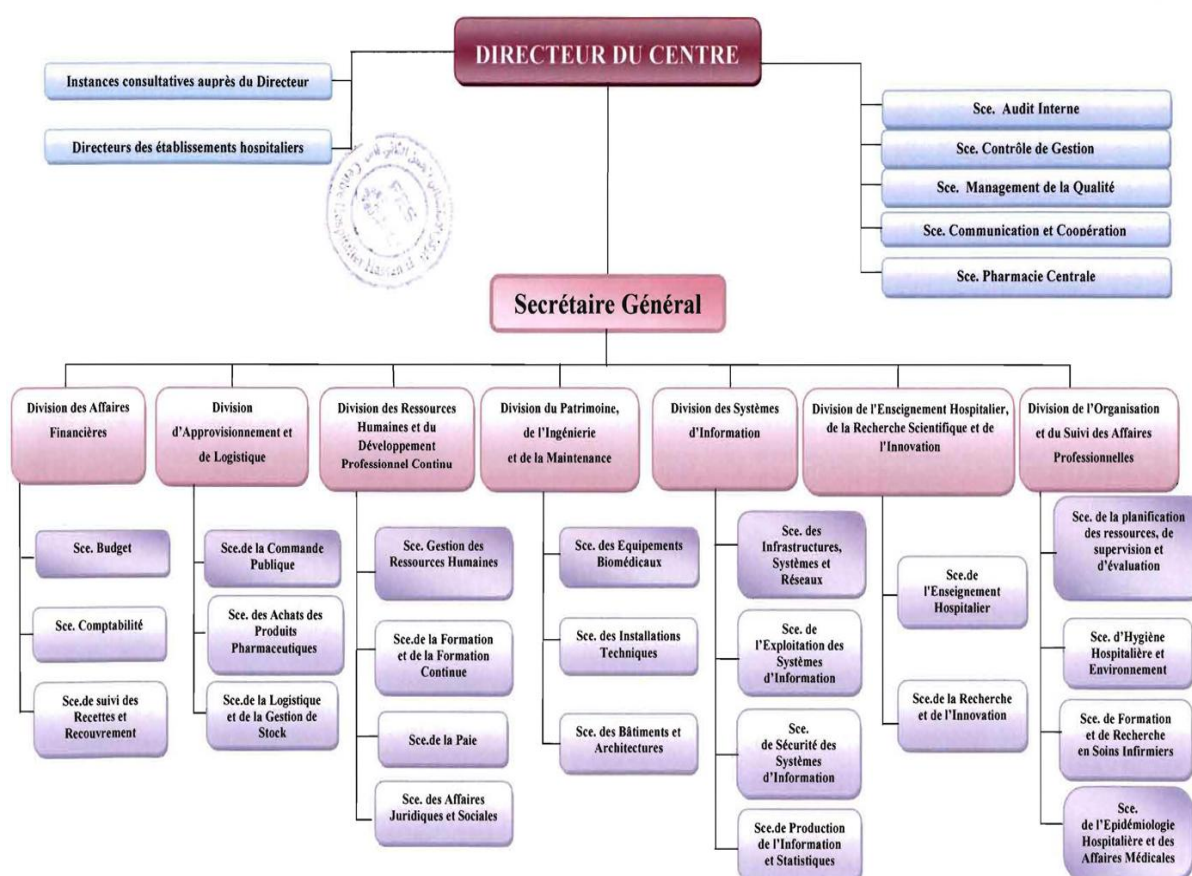


Figure 1.4 : Organigramme du CHU Hassan II de FES (Site officiel du CHU Hassan II de FES, 2023)

De manière générale, le bloc opératoire occupe une place prépondérante dans tout établissement hospitalier. Par conséquent, nous allons nous concentrer sur le secteur du bloc opératoire dans la section suivante.

1.4 Management du bloc opératoire

La gestion hospitalière repose sur des principes qui favorisent le fonctionnement optimal de l'établissement de santé, permettant ainsi de répondre efficacement à la demande de soins, d'offrir au patient des soins de qualité à un coût contrôlé. Selon Lévy et Gauthier (Lévy et al., 1977) (Gauthier et al., 1979), il existe deux types de principes qui contribuent au bon fonctionnement de l'hôpital : les principes locaux et les principes globaux. Les principes locaux sont propres à une entité (par exemple, une unité de soins) et ne concernent que celle-ci. Ils visent donc à assurer le bon fonctionnement

interne de cette entité, indépendamment du reste du système. Les principes globaux concernent au moins deux entités. Chaque service de soins a donc ses propres principes de fonctionnement. Ces principes tendent à se différencier de plus en plus, qu'il s'agisse de services généraux, spécialisés ou hautement spécialisés.

La gestion des blocs opératoires suscite actuellement de nombreuses interrogations, tant à court terme qu'à long terme. Elle se confronte en effet à des problèmes complexes liés à l'utilisation des ressources, qu'elles soient humaines ou matérielles, qui sont désormais toutes deux disponibles en quantité limitée.

Le bloc opératoire, qui comprend normalement des salles d'opération et des salles de réveil (également appelées Salles de Surveillance Post-Interventionnelle, SSPI), constitue un univers hétérogène où coexistent une multitude de professions et de cultures différentes dont l'objectif devrait être le même : le soin aux patients (M. Rudy De Winne, 2006).

La Figure 1.5 illustre la corrélation entre le bloc opératoire et les autres services.

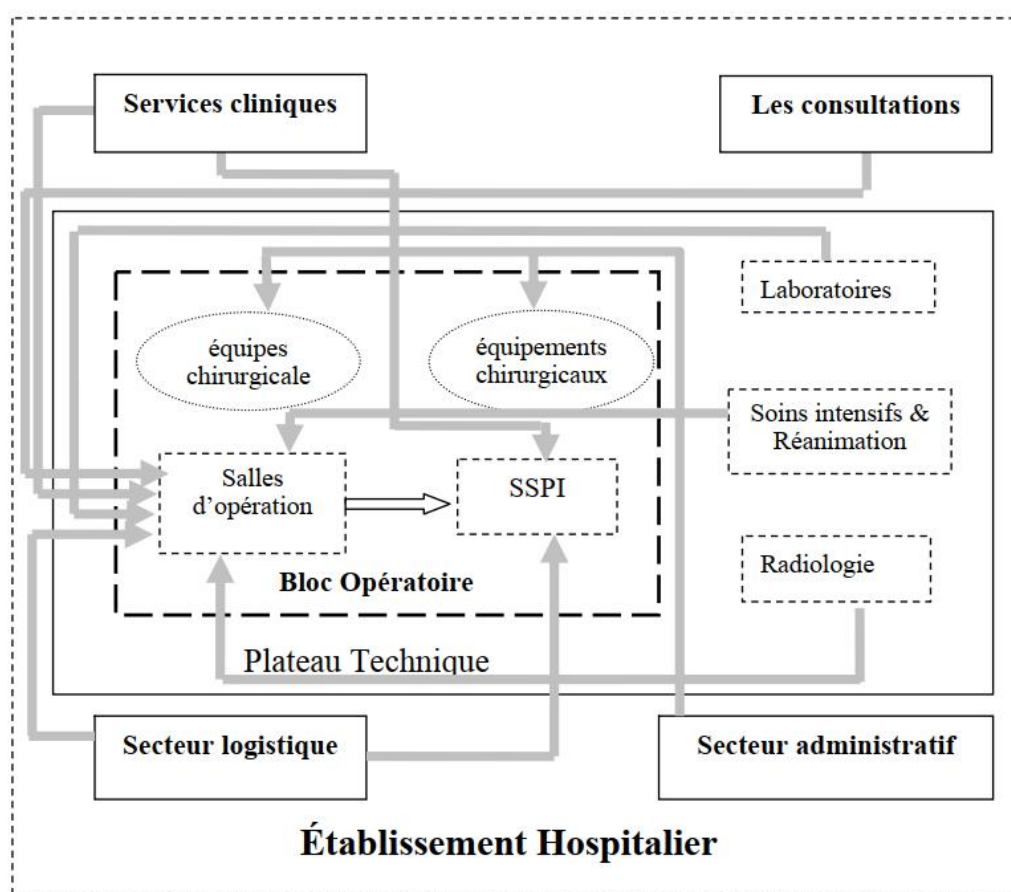


Figure 1.5 : Connexion entre le bloc opératoire et les autres services (M. Rudy De Winne, 2006)

Par la suite, notre attention se portera sur le nœud central, à savoir le bloc opératoire, en mettant l'accent sur la planification et l'ordonnancement opératoire afin d'accroître l'efficacité et la productivité de ce secteur.

1.4.1 Description du bloc opératoire

Le bloc opératoire est un composant crucial d'un établissement de santé, attribuable à sa sophistication technologique, à l'engagement financier qu'il implique, à la mobilisation significative du personnel, aux normes de sécurité des patients et à sa capacité à répondre aux situations d'urgence. Ces facteurs contribuent à définir l'attractivité de ces institutions. Le bloc opératoire est l'une des structures les plus onéreuses d'un hôpital (Denton et al., 2007). Selon une recherche menée par certains auteurs (Macario et al., 1995), une part importante des dépenses (33% du coût total) est attribuée au bloc opératoire lui-même.

L'objectif principal d'un bloc opératoire est de fournir aux patients qui y sont admis des soins de haute qualité, susceptibles d'améliorer ou même de rétablir leur état de santé. Cette mission doit être accomplie de préférence dans un délai raisonnable et à un coût minimal, c'est-à-dire avec le moins de complications organisationnelles possibles (Frédéric Bonvoisin, 2011).

Dans le bloc opératoire, on peut identifier trois types distincts de procédures chirurgicales : les interventions programmées, les interventions en ambulatoire et les interventions d'urgence (Figure 1.6).

- ✚ **Interventions programmées** : elles font référence aux opérations qui sont planifiées suite à une consultation chirurgicale. Le patient est généralement admis dans une unité de soins pour ces interventions.
- ✚ **Interventions en ambulatoire** : elles se rapportent aux opérations qui ne nécessitent pas d'hospitalisation du patient.
- ✚ **Interventions d'urgence** : ces opérations sont imprévues et peuvent survenir à tout moment dans le centre chirurgical. Elles peuvent provenir d'une unité d'hospitalisation, d'une unité de soins intensifs ou du service des urgences.

Le " bloc opératoire " d'un hôpital représente la convergence de tous les aspects d'une plateforme technique, ainsi que des ressources humaines et matérielles, nécessaires à la réalisation de soins par le biais d'interventions chirurgicales. Les auteurs caractérisent le plateau technique de chirurgie comme étant : "la totalité des ressources humaines et des équipements mobilisés pour l'activité chirurgicale ou anesthésique et, par extension, l'infrastructure géographique au sein de laquelle cette activité se déroule" (Saleh, 2019).

Selon une étude réalisée en 2004, l'auteur a catégorisé les ressources en trois groupes distincts : humaines, matérielles et informationnelles (Chaabane, 2004).

- ◆ **Les ressources humaines** : Le bloc opératoire est un espace caractérisé par une densité élevée de compétences humaines. Une opération chirurgicale nécessite la participation simultanée ou séquentielle de nombreux professionnels de diverses spécialités. Parmi eux, on compte les chirurgiens, les anesthésistes-réanimateurs, les infirmiers anesthésistes, les infirmiers de bloc opératoire, les aides-soignants, les brancardiers, les infirmiers, les secrétaires et le responsable du bloc opératoire. Ces acteurs interagissent dans un même lieu pour accomplir une série d'activités qui nécessitent l'utilisation d'équipements médicaux spécifiques, souvent très techniques.
- ◆ **Les ressources matérielles** du bloc opératoire peuvent être conceptualisées comme un système tripartite :

- La salle d'induction et d'anesthésie (qui est partagée par plusieurs salles d'opération), est dédiée à la préparation du patient pour l'anesthésie avant son entrée en salle d'opération. Cette zone doit être équipée d'un matériel d'anesthésie approprié.
 - Les salles d'interventions chirurgicales, qu'elles soient spécialisées ou non, sont des espaces dédiés à la réalisation de procédures chirurgicales. Elles sont impérativement dotées d'équipements chirurgicaux standards et de dispositifs de chirurgie de précision de pointe. De plus, elles disposent d'équipements de surveillance indispensables pour assurer le bon déroulement de chaque intervention chirurgicale.
 - La salle de surveillance post-opératoire, également appelée salle de réveil, est équipée de lits spécialement conçus pour le réveil des patients. Elle comprend également des dispositifs médicaux permettant de surveiller l'état du patient après l'intervention.
- ♦ **Les ressources informationnelles** représentent un élément crucial lors d'une intervention chirurgicale. En effet, chaque patient est accompagné d'un flux d'informations constant tout au long de l'intervention. Ces informations, qui peuvent être transmises oralement ou par écrit, sont partagées entre les différents intervenants du bloc opératoire, notamment le médecin, l'anesthésiste-réanimateur et les infirmières. Elles peuvent être de nature médicale, se rapporter au parcours du patient (par exemple, les heures d'entrée et de sortie), ou concerner des aspects organisationnels tels que la préparation de l'intervention suivante.

La plateforme technique du bloc opératoire a connu des avancées considérables. On distingue principalement deux types de salles d'opération (Figure1.6) : mono disciplinaire et multidisciplinaire (Kharraja, 2003).

- **Une salle d'opération mono disciplinaire** est spécifiquement dédiée aux activités chirurgicales d'un service particulier, comme l'ophtalmologie, l'orthopédie, l'ORL, etc. Ce type de bloc se distingue généralement par un faible niveau de standardisation, mais une technicité très élevée.
- **Les grands blocs opératoires multidisciplinaires** sont des espaces où les services n'ont plus leurs propres salles d'opération ni leur propre personnel. Ils doivent travailler sur un site commun, avec des règles de fonctionnement communes et une gestion centralisée.

Cette tendance à la mutualisation des ressources souligne encore davantage la nécessité d'une organisation et d'une gestion efficaces du bloc opératoire pour garantir une utilisation optimale des ressources humaines et matérielles disponibles.

Au sein d'un bloc opératoire, qu'il soit mono disciplinaire ou multidisciplinaire, les interventions chirurgicales sont réalisées sur deux types de patients : les patients électifs et les patients urgents (Saleh, 2019).

- ♦ **Un patient électif** est un individu dont l'état de santé ne répond pas aux critères d'urgence. Par conséquent, son intervention chirurgicale peut être différée sans risque. Les interventions pour ces patients peuvent être programmées à l'avance, ce qui permet une planification prédictive mais statique. Ces interventions peuvent être réalisées dans le cadre d'une hospitalisation complète ou ambulatoire.
- ♦ **Un patient urgent** est un individu qui nécessite une intervention chirurgicale le jour même de son arrivée. Il existe plusieurs niveaux d'urgence, allant de l'urgence non vitale à l'urgence vitale. Cette catégorie de patients comprend également ceux qui doivent retourner au bloc

opératoire en raison de complications nécessitant une nouvelle intervention chirurgicale. Les interventions pour ces patients ne peuvent pas être planifiées à l'avance, et leur gestion doit donc être effectuée en temps réel par le système de gestion.

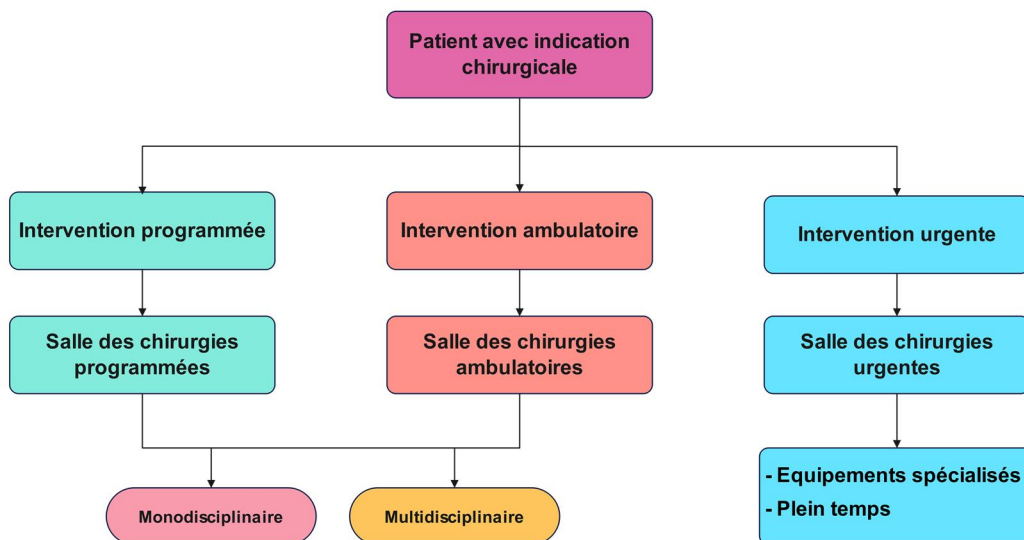


Figure 1.6 : Affectation des patients aux différents types de salles opératoires

1.4.2 Processus opératoire

Le processus chirurgical d'un patient s'articule autour de deux phases principales. La première phase, qui se déroule dans la salle d'opération, comprend la préparation de la salle pour l'intervention, l'acte chirurgical lui-même, et le nettoyage de la salle après l'opération. La seconde phase, qui a lieu dans la salle de réveil, concerne la récupération du patient après l'anesthésie.

Une intervention chirurgicale ne peut être programmée dans une salle d'opération que si toutes les conditions nécessaires à sa réalisation sont réunies. Il peut également exister des priorités entre les différentes interventions. Par exemple, les interventions susceptibles de contaminer la salle à un niveau plus élevé peuvent être programmées en fin de journée.

Chaque intervention chirurgicale requiert un chirurgien ou une équipe spécifiquement assignée. Le chirurgien est uniquement présent durant l'acte chirurgical et bénéficie d'une période de repos entre les interventions. Des ressources supplémentaires, souvent limitées, sont nécessaires pendant une intervention. Ces ressources peuvent inclure des infirmières, des anesthésistes et d'autres professionnels, ainsi que des ressources matérielles (instruments, équipements d'imagerie, etc.). Une ou plusieurs unités d'un type particulier de ressource, qu'elle soit humaine ou matérielle, doivent être disponibles.

Une fois l'intervention terminée, le patient doit être transféré vers un lit dans la salle de réveil post-opératoire. Certains patients nécessitent des soins spécifiques après l'intervention et doivent être transférés en unité de soins intensifs (USI). Par conséquent, la récupération post-anesthésie peut nécessiter un lit spécial (Figure 1.7).

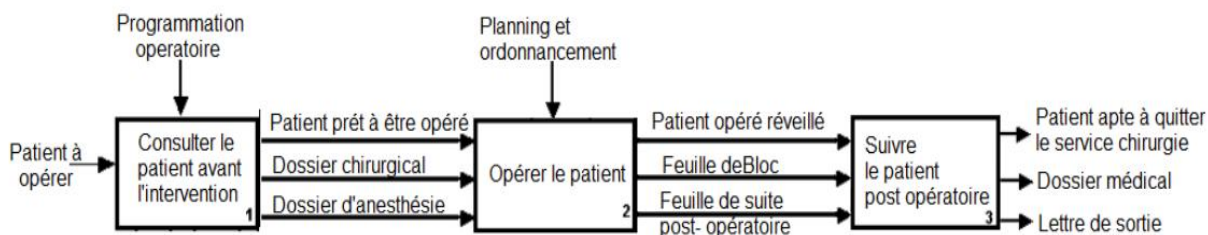


Figure 1.7 : Les étapes fonctionnelles d'une intervention en chirurgie. (Chaaban, 2004)

Les procédures opératoires (Figure 1.8) peuvent être décomposées en trois étapes successives, disposées dans un ordre chronologique (Oumaima Hajji Soualfi et al., 2023) :

- ✚ **La phase préopératoire**, pendant laquelle le patient passe par des consultations chirurgicales et anesthésiques. Cette phase s'étend de la prise en charge du patient jusqu'à la veille de l'opération. Au cours de cette phase, une date d'intervention "provisoire" sera proposée au patient. Cette date peut être modifiable ou non, en fonction de la politique du bloc opératoire.
- ✚ **La phase per-opératoire**, qui est la partie la plus cruciale du processus opératoire, s'étend de la préparation psychologique du patient avant l'intervention jusqu'à son réveil et son départ de la SSPI. Cette phase se déroule le jour de l'intervention. Ce jour-là, les patients sont d'abord anesthésiés et transférés par les brancardiers aux salles d'opération, où les équipes chirurgicales procèdent à l'opération. Après l'opération, ils sont transférés à la SSPI et y restent jusqu'à ce que les anesthésistes les autorisent à retourner dans leurs services d'hospitalisation ou dans les unités de soins intensifs et de réanimation.
- ✚ **La phase post-opératoire** commence après le réveil du patient, qui est ensuite transféré vers son service d'hospitalisation. Cette phase englobe tous les soins nécessaires après l'intervention. Si l'état du patient est jugé critique, il sera plutôt dirigé vers les unités de soins intensifs et de réanimation.

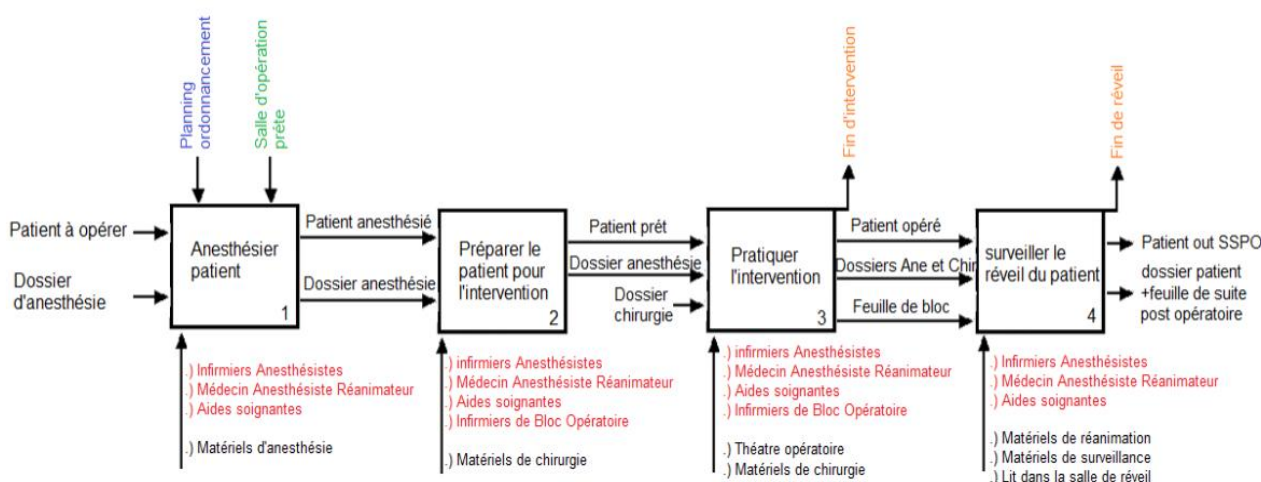


Figure 1.8 : Différentes phases du processus opérationnel (Chaaban, 2004)

Dans cette étude, nous visons à augmenter l'efficacité du processus opératoire en identifiant une solution idéale pour la programmation des interventions pendant la phase préopératoire, qui peut s'étendre sur plusieurs semaines ou mois, ainsi que pour l'ordonnancement des interventions pendant

la phase per-opératoire, qui concerne une journée. La phase post-opératoire ne sera pas prise en compte dans notre recherche.

1.4.3 Programmation opératoire

Pour administrer et synchroniser les diverses tâches au sein du bloc opératoire, les établissements de santé emploient un instrument de gestion couramment désigné sous le nom de programmation opératoire. Cette dernière a pour but de concevoir un agenda prévisionnel des interventions à réaliser dans chaque salle sur une période définie, qui peut s'étendre d'un jour à plusieurs semaines, en attribuant des ressources (humaines et matérielles) et en déterminant l'ordre de leur réalisation. Les demandes d'interventions à planifier peuvent émaner d'un ou de plusieurs services chirurgicaux, en fonction du type de bloc, qu'il soit mono ou multidisciplinaire. Le programme opératoire constitue également une source d'informations pour d'autres activités hospitalières telles que l'hospitalisation, la stérilisation, le brancardage, etc. (Kharraja 2003, Jebali 2006).

La planification et l'ordonnancement du bloc opératoire, également appelé « programmation opératoire », implique la détermination des interventions à effectuer sur une période variable d'une semaine ou d'une journée, en attribuant des ressources et en établissant l'ordre de leur réalisation.

En termes scientifiques, la planification opératoire peut être définie comme un processus d'optimisation des ressources chirurgicales. Cela implique une organisation méticuleuse des salles d'opération pour maximiser leur utilisation, minimiser les temps morts et éviter le recours excessif aux heures supplémentaires. L'objectif est également de minimiser les coûts d'exploitation tout en répondant aux exigences des chirurgiens, des patients et du reste de l'équipe opératoire, y compris les infirmières et les anesthésistes. De plus, une utilisation efficace des salles de réveil est essentielle, tout comme la nécessité de maintenir un faible taux d'annulation. Ainsi, la planification opératoire est un exercice d'équilibre qui vise à atteindre l'efficacité opérationnelle tout en respectant les besoins de toutes les parties prenantes (De Winne, 2006).

L'élaboration du programme opératoire est donc une tâche extrêmement complexe dont le processus peut varier considérablement d'un établissement de santé à un autre. Cette programmation peut être fortement influencée par la politique de l'hôpital, et donc par le modèle qu'il a choisi d'adopter.

La programmation opératoire se divise généralement en deux sous-fonctions distinctes : Planification à l'avance (Advance planning) et ordonnancement d'affectation (allocation scheduling).

1.4.3.1 Planification à l'avance « Advance Scheduling »

La planification à l'avance est une approche qui consiste à déterminer une date future d'intervention pour chaque patient. Le schéma de construction du programme opératoire peut varier considérablement en fonction de la stratégie de gestion adoptée par l'établissement hospitalier. Trois modèles sont couramment utilisés : la programmation par allocation préalable de créneaux horaires (également connue sous le nom de "Time-block scheduling"), la programmation ouverte ("Open scheduling") et la programmation par allocation de créneaux ajustables ("Modified block scheduling") (Patterson, 1997), (Kharraja, 2003).

 **La stratégie « Time-block scheduling »** : C'est la stratégie de programmation par attribution préalable de plages horaires. Cette approche implique l'attribution préalable de créneaux horaires spécifiques aux chirurgiens, aux unités chirurgicales (groupes de chirurgiens) ou aux spécialités médicales. Ces créneaux réservés constituent l'ossature du programme opératoire hebdomadaire. Un créneau horaire désigne une période spécifique au

sein de la période de planification durant laquelle une salle d'opération est réservée pour une unité chirurgicale spécifique. Chaque unité chirurgicale est responsable de la répartition de ses interventions sur ses créneaux horaires ; cette répartition n'est pas incluse dans la tâche de planification. L'ensemble des créneaux horaires forme le Plan Directeur d'Allocation (PDA), également connu sous le nom de "Master Surgical Schedule" (MSS) (Przasnyski, 1986), (Kennedy, 1992), (Blake et Carter, 1997). Une fois que le MSS est établi, il est figé pour l'avenir jusqu'à ce qu'une mise à jour soit effectuée. Selon (Margerlein et Martin, 1978), cette stratégie comporte deux approches distinctes. Dans l'une, seules les heures de la salle d'opération sont prises en compte ; dans l'autre, les ressources humaines et matérielles (lits, etc.) sont également prises en compte. La difficulté de ce type de programmation réside dans la construction du PDA qui doit respecter les disponibilités et les préférences des différents chirurgiens.

Dans (Kharraja, 2003), l'auteur souligne les désavantages de cette approche : La position et la dimension des créneaux horaires sont des facteurs déterminants de la qualité et de l'efficacité du programme opératoire. Des créneaux horaires surdimensionnés peuvent offrir un certain confort aux chirurgiens, mais ils peuvent également entraîner une performance médiocre en raison d'une faible occupation des salles. À l'inverse, des créneaux horaires sous-dimensionnés ou limites peuvent créer des tensions entre les chirurgiens en cas de circonstances imprévues, entraînant des dépassements de délai et le non-respect des créneaux horaires, ce qui peut finalement conduire à un échec de la planification. De plus, le manque de flexibilité peut également nuire à la performance du bloc opératoire. En effet, lorsque les créneaux horaires sont figés, il peut arriver que certains chirurgiens refusent des interventions qui durent tandis que d'autres ne parviennent pas à remplir leurs créneaux horaires.

✚ **La stratégie « Open Scheduling »** : Il s'agit d'une programmation ouverte qui implique de commencer à partir de rien (planifier sans aucune contrainte d'emplacement initial) et de concevoir le planning du bloc opératoire pour la période à venir. Pour la gestion du planning (conception et maintenance), deux approches sont distinguées.

- **Premier arrivé, premier servi « First Come, First Served » (FCFS)** : Cette méthode de remplissage chronologique, basée sur le principe du "premier arrivé, premier servi", consiste à établir un "agenda collectif" tout au long de la période de construction du planning (Kharraja, 2003). Cet agenda est élaboré en utilisant un système d'information commun qui permet d'estimer la durée des interventions et d'intégrer de nouvelles interventions. Les secrétariats des différents services chirurgicaux soumettent leurs demandes au fur et à mesure de leur arrivée. En cas d'incompatibilité causée par une intervention, le responsable du bloc négocie la résolution du problème avec les services concernés, mais il est le seul à décider de la solution. Bien que cette méthode soit simple à mettre en œuvre, elle présente certains inconvénients. En effet, elle favorise les services chirurgicaux dont l'activité est facilement planifiable (ophtalmologie, chirurgie plastique) et défavorise les autres (maternité, pédiatrie). De plus, cette pratique entraîne un taux élevé de déprogrammation, une sous-utilisation des ressources, des dépassements horaires et peut créer des tensions entre les services de chirurgie qui sont constamment en concurrence pour la réservation d'emplacements (Kontak-Forsyth et Grant, 1995).
- **Planification coopérative** : Le programme opératoire est déterminé à la suite d'un processus de négociation hebdomadaire orchestré par le conseil de bloc, dont les participants représentent l'ensemble des services, sous l'égide du responsable de bloc (Figure 1.9). Le planning opératoire pour la semaine suivante est généralement conçu en alignant les préprogrammes, même s'ils sont partiels. L'enjeu est de trouver chaque semaine

un programme d'exploitation équilibré qui optimise le fonctionnement du bloc tout en tenant compte des contraintes et des désirs des différents services.

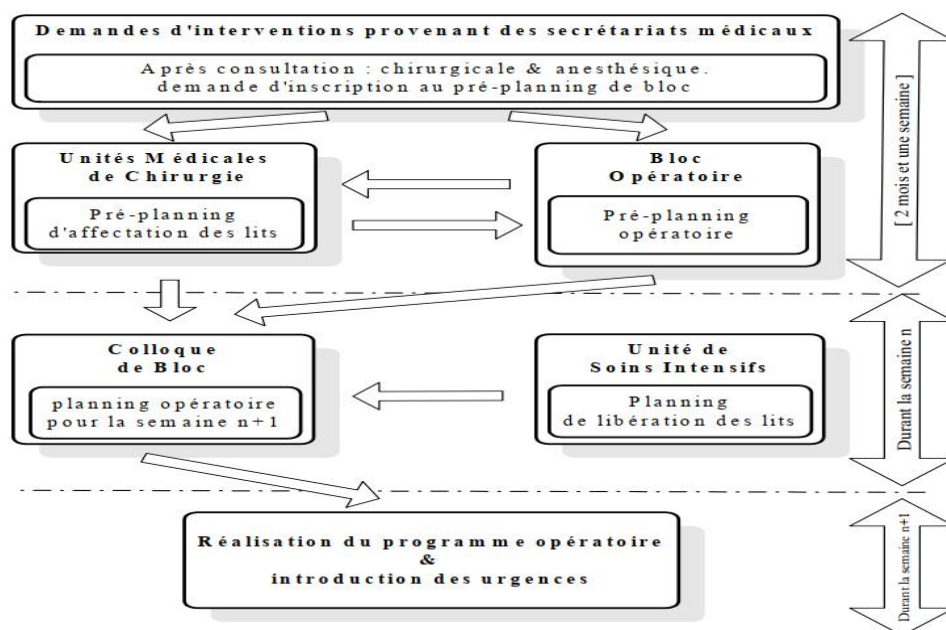


Figure 1.9 : Planification coopérative pour l'élaboration du programme opératoire (Kharraja, 2003)

✚ **La stratégie « Modified Block Scheduling » :** L'approche de programmation par allocation et ajustement de plages horaires est une synthèse des méthodes de « block scheduling » et d'« open scheduling ». Cette méthode s'inspire principalement des principes du « block scheduling », tout en offrant une plus grande souplesse.

Selon les travaux de (Fei, 2006) et de (Guerriero et Guido, 2011), une approche basée sur l'attribution préliminaire des créneaux horaires est proposée. Cette approche est reconnue pour sa flexibilité supérieure par rapport à la méthode sur laquelle elle est fondée. Fei (2006) a souligné deux mécanismes clés qui contribuent à cette flexibilité.

D'une part, un certain nombre de "créneaux horaires" sont délibérément laissés non attribués, ce qui permet d'accommoder les opérations prolongées ou les surcharges horaires. Ces créneaux sont ensuite comblés dans le cadre d'une programmation ouverte.

D'autre part, le système offre une flexibilité en permettant la redistribution des créneaux horaires non utilisés. Par exemple, un créneau peut être réservé jusqu'à 48 heures avant son début. Si ce créneau n'est pas utilisé, il peut être réattribué à un chirurgien ou à une spécialité qui en a besoin.

La stratégie du « modified block scheduling » offre une plus grande flexibilité que celle du « block scheduling » en termes de réutilisation des créneaux horaires (ou parties de ceux-ci) non utilisés. Il existe très peu de littérature sur cette problématique, à l'exception de certains auteurs (Kharraja et Marcon, 2003) et (Marcon et al., 2003) qui étudient l'intégrité du processus de fonctionnement du « modified block scheduling » pour l'amélioration et l'exploitation des créneaux non utilisés.

1.4.3.2 Ordonnancement d'affectation « Allocation Scheduling »

L'ordonnancement est le processus par lequel l'ordre des procédures en salle d'opération est établi pour une journée donnée (Fei, 2006). Lorsque les fonctions de planification et d'ordonnancement sont effectuées de manière séquentielle et distincte, en fonction de la stratégie de planification chirurgicale adoptée et des hypothèses de simplification choisies, le problème de l'ordonnancement des salles d'opération, des ressources et des unités de soins post-anesthésie peut présenter certaines caractéristiques uniques. Il peut être modélisé et résolu de différentes manières. Par exemple, il peut être envisagé comme un atelier de travail avec des machines dupliquées (Saadani et al., 2006), un atelier de flux hybride à trois étages (Kharraja et al., 2006) ou un atelier de flux hybride à deux étages (Fei, 2006). Il s'agit d'un problème combinatoire NP-Difficile (Gupta, 1988).

Nous synthétisons dans la figure 1.10 la procédure de la programmation opératoire allant de la planification à l'avance jusqu'à l'ordonnancement d'affectation.

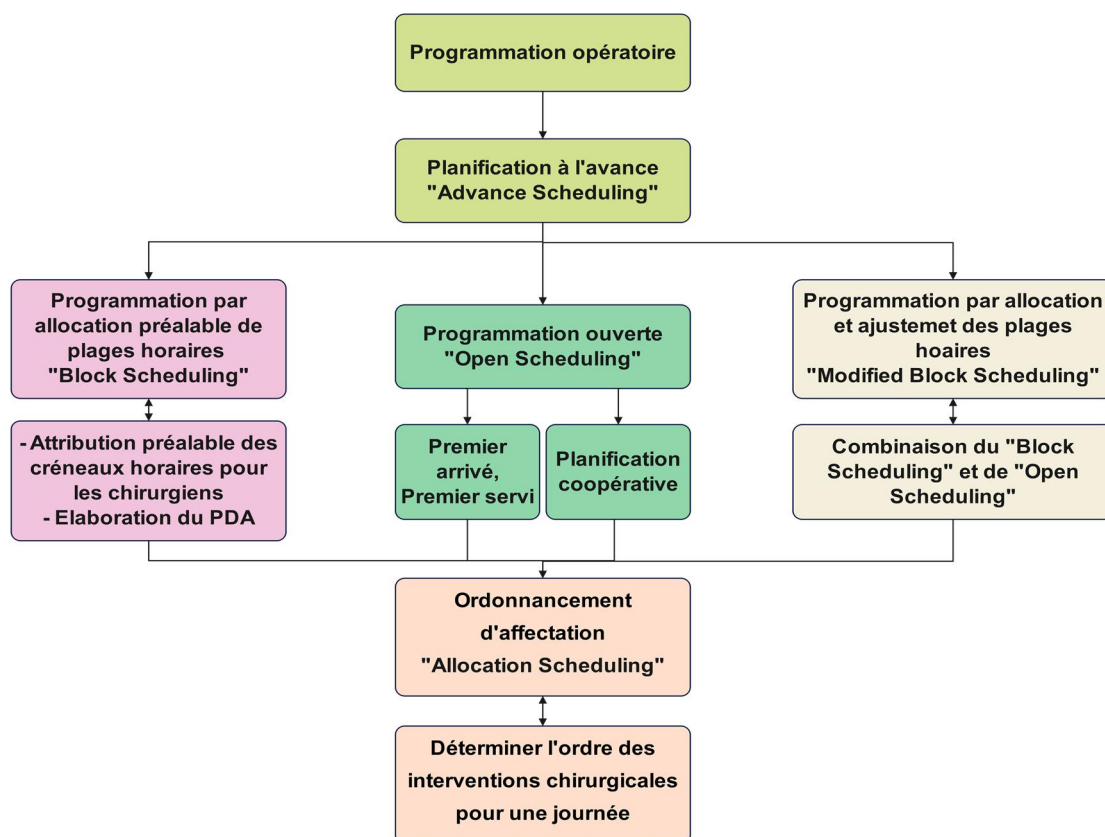


Figure 1.10 : la procédure de la programmation opératoire

1.4.4 Niveaux de décision

Les décisions relatives au bloc opératoire peuvent être regroupées en trois niveaux de prise de décision distincts : stratégique, tactique et opérationnel. (Guerriero et Guido, 2011) soulignent que ces niveaux ne sont pas isolés et ont une influence mutuelle. Par conséquent, le résultat d'un niveau « output » sert souvent de base « input » pour le niveau suivant. La figure 1.11 illustre généralement ces inputs et outputs. Elle indique également quand les opérations à programmer et les urgences sont ajoutées. De plus, cette figure fait une distinction entre l'open scheduling et le block scheduling. En effet, la première technique ne nécessite pas l'établissement d'un Master Surgical Schedule (MSS) et définit directement le planning.

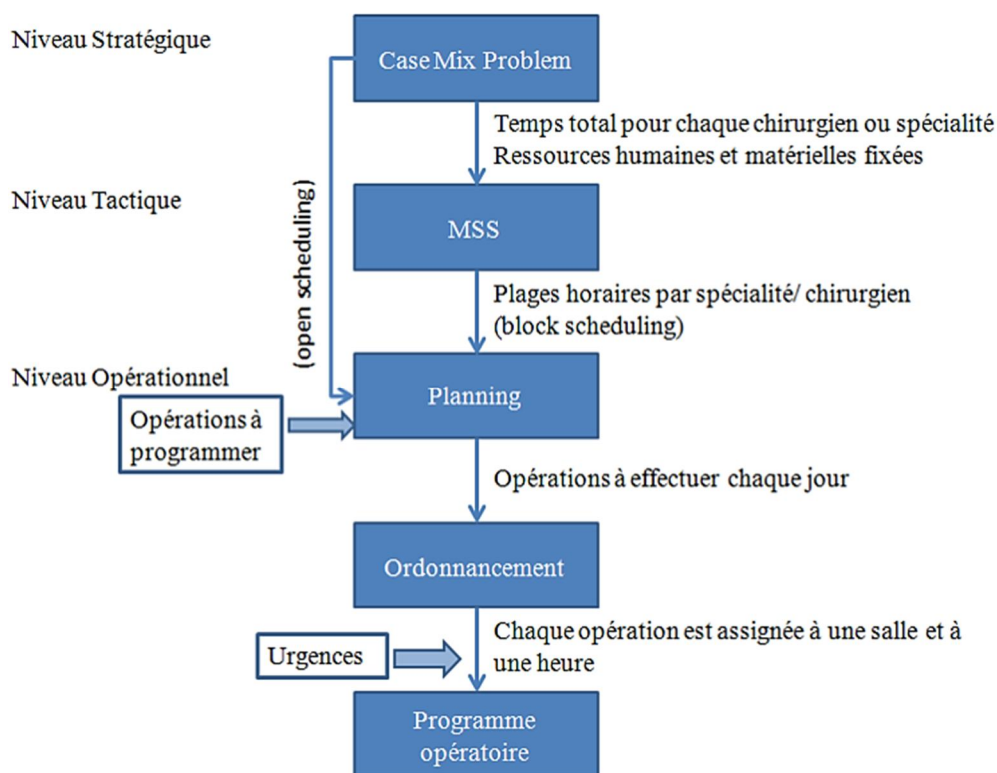


Figure 1.11 : Les niveaux de décision du bloc opératoire (Cornez et al., 2015)

- ✚ **Niveau stratégique** : Il s'agit de déterminer le temps total qui sera alloué à chaque chirurgien ou groupe de chirurgiens (Guerriero et Guido, 2011). Ce temps est généralement calculé sur une base hebdomadaire ou selon un cycle de deux semaines. Selon (Hans et al., 2012), c'est à ce niveau que sont prises les décisions concernant le redimensionnement des ressources humaines et matérielles, comme le nombre de lits, ainsi que la mise en œuvre de nouvelles techniques.
- ✚ **Niveau tactique** : C'est à ce stade que le "Master Surgical Schedule" (MSS) est élaboré (Guerriero et Guido, 2011). Ce dernier permet de diviser le temps total attribué à chaque groupe ou chirurgien en créneaux horaires spécifiques. Le MSS est utilisé dans le cadre du block scheduling et du modified block scheduling. Ce dernier est généralement établi une ou deux fois par an. (Hans et al., 2012) soulignent que cela doit être fait en respectant les décisions prises au niveau stratégique.
- ✚ **Niveau opérationnel** : A ce niveau la planification est réalisée progressivement. Lorsque le patient rencontre le chirurgien, une date d'opération est fixée. Cette date peut être déterminée plusieurs mois à l'avance ou jusqu'à la semaine précédant l'opération. L'ordonnancement, en revanche, est généralement effectué le vendredi pour toutes les opérations qui doivent avoir lieu la semaine suivante. L'établissement du programme opératoire se fait donc en deux étapes : la planification et l'ordonnancement. L'élaboration du programme opératoire n'est pas une tâche facile en raison du nombre et de la diversité des acteurs impliqués, tels que les chirurgiens, les anesthésistes et les infirmiers. Ces derniers peuvent avoir des objectifs qui peuvent être conflictuels. De plus, des contraintes matérielles peuvent compliquer l'ordonnancement si les ressources sont limitées (Cornez et al., 2015).

1.5 Problématique et orientation de l'activité de recherche

Dans les sections précédentes, nous avons examiné le cadre des établissements de soins, en se concentrant particulièrement sur les blocs opératoires. Étant donné que le bloc opératoire est le secteur le plus coûteux de l'hôpital, notre recherche aspire à améliorer l'efficacité de ce département. Il existe plusieurs stratégies pour réaliser cet objectif, comme la reconfiguration des blocs opératoires, l'amélioration des systèmes d'information, ou encore l'optimisation des programmes opératoires (Chaabane et al., 2007). Nous allons nous focaliser sur la gestion de la programmation opératoire. La typologie des problèmes associés à la programmation opératoire est variée et il est irréalisable de résoudre tous les problèmes concernés simultanément. Ces obstacles peuvent survenir à tout moment du parcours du patient et touchent donc les trois phases du processus opératoire. Voici quelques exemples, sans prétendre à l'exhaustivité (Bonvoisin, 2011) :

- Alors que le patient est déjà anesthésié dans la salle opératoire, le chirurgien peut être en retard ou même absent ;
- Il peut arriver que l'on découvre, en phase peropératoire, qu'un plateau d'instruments est incomplet ;
- Il ne se peut qu'aucun lit ne soit disponible en unité de soins intensifs alors que l'intervention a été programmée ;
- La salle de réveil peut être encombrée en raison d'un manque de suivi dans la sortie des patients de la part de l'anesthésiste responsable ;
- Le patient peut être oublié ou retardé dans son transfert de l'unité de soins vers le bloc opératoire ;
- Le choix entre plusieurs cas opératoires ajoutés simultanément au programme préétabli peut poser problème ;
- Des interventions peuvent être reportées ou annulées en raison de l'absence de résultats d'examens préopératoires ;
- Il peut y avoir une inadéquation entre la production de soins chirurgicaux et la dotation en personnel, pouvant aboutir à une situation de rupture correspondant à la fermeture d'une ou de plusieurs salles d'opération.

L'absence de coordination au sein du bloc opératoire peut généralement être attribuée à deux facteurs principaux : d'une part, le bloc opératoire est souvent le lieu de tensions entre divers intervenants et éléments constitutifs, d'autre part il représente une entité hétérogène où coexistent de nombreuses professions aux logiques et cultures variées. Cette diversité engendre souvent un décalage important entre les objectifs des différents acteurs, ce qui peut entraîner des complications susceptibles de perturber l'organisation générale.

Dans le cadre de cette étude, nous examinons un bloc opératoire, qu'il soit mono-disciplinaire ou multidisciplinaire, qui prend en charge des patients pour des interventions chirurgicales planifiées ou d'urgence. À cet égard, nous identifions deux groupes distincts de patients : les patients électifs, qui sont programmés pour une intervention chirurgicale, et les patients urgents, qui nécessitent une intervention chirurgicale immédiate. En effet, la nature hétérogène des interventions (programmées, ambulatoires, urgentes) ainsi que les différents types des patients à opérer (électifs, urgents) rendent de plus en plus la programmation opératoire délicate et complexe en raison des contraintes rencontrées lors de l'attribution des créneaux horaires d'un programme opératoire aux équipes chirurgicales d'une même spécialité ou de spécialités différentes.

L'objectif fondamental du processus du bloc opératoire est de maintenir l'intégrité de la planification et de la programmation des interventions chirurgicales, tout en gérant les divers imprévus susceptibles

de perturber ce processus. La question centrale qui se pose est la suivante : comment optimiser le processus du bloc opératoire en tenant compte de l'incertitude inhérente à l'activité chirurgicale ?

Dans un premier temps, on va présenter les travaux antérieurs traitant le sujet de la planification et l'ordonnancement du bloc opératoire. Par la suite, nous allons mettre le point sur l'effet de la pandémie Covid-19 sur l'organisation des blocs opératoires qui souffrent déjà de plusieurs contraintes dont les ressources humaines et matérielles. De plus, nous proposons des recommandations tirées de cette expérience pour mieux gérer de telles situations de stress dans l'avenir.

Nous envisageons aussi de mettre en place un programme opératoire quotidien des activités chirurgicales en utilisant un système multi-agents (SMA), ainsi qu'un programme opératoire hebdomadaire basé sur un planificateur multi-agents (PMA). Ce dernier permettra de répondre à deux questions essentielles que se posent les gestionnaires du bloc opératoire : le choix du jour d'opération pour chaque patient et l'ordre journalier des interventions chirurgicales d'un département spécifique. L'horizon de la planification opératoire sera de sept jours.

Enfin, nous élaborons également un programme opératoire hebdomadaire en utilisant un modèle mathématique, et nous comparons les résultats obtenus avec ceux du PMA.

Nous prendrons également en compte plusieurs contraintes afin d'atteindre l'objectif principal, qui est la maximisation de l'occupation des salles opératoires et la satisfaction des équipes chirurgicales du département étudié, ce qui permettra d'optimiser le rendement du bloc opératoire ainsi que la qualité des prestations de soins prodigués aux patients.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé le contexte de notre sujet d'étude ainsi que la problématique à résoudre. Nous avons défini le bloc opératoire de chirurgie en milieu hospitalier, les nombreuses ressources qu'il requiert et nous avons expliqué son processus opératoire ainsi que la complexité de son fonctionnement. Nous avons notamment mis en lumière les différents types d'aléas qui peuvent se produire et l'importance de les prendre en compte lors de la phase de planification ; ce qui constitue les motivations de ce travail.

Chapitre 2

Etat de l'art en planification et ordonnancement des blocs opératoires

Chapitre 2

Etat de l'art en planification et ordonnancement des blocs opératoires

2.1 Introduction

La qualité de vie des citoyens dépend principalement de leur bien-être, c'est pourquoi la santé est l'une des principales préoccupations de la société. Les systèmes de santé, et en particulier les hôpitaux, sont confrontés non seulement à des contraintes législatives et budgétaires mais aussi à une forte compétitivité basée sur la qualité des soins offerts dans les services hospitaliers, les urgences et les blocs opératoires. Selon plusieurs études (Macario et al., 2001), le bloc opératoire constitue près de 10 % du budget de fonctionnement d'un hôpital car il met en jeu des ressources humaines et matérielles variées, coûteuses et rares, telles que les chirurgiens, les anesthésistes, les infirmières et le matériel biomédical. Le bloc opératoire est la zone de l'hôpital où les soins chirurgicaux sont prodigués aux patients. La nature de ces soins nécessite une multitude d'équipements médicaux et un niveau élevé de compétences humaines. Par conséquent, le bloc opératoire est le cœur de l'hôpital, très gourmand en ressources. Il interagit constamment avec différents secteurs, départements et activités médicales. "Le bloc opératoire est à l'interface de nombreuses activités : chirurgie, obstétrique, anesthésie, explorations fonctionnelles, radiologie et biologie (Revel et al., 2003)".

Plusieurs chercheurs s'intéressent à la gestion des blocs opératoires, essayant d'améliorer le fonctionnement de ce secteur pour maximiser son efficacité et la satisfaction des patients. Le bloc opératoire est non seulement le secteur le plus important et le plus coûteux, mais c'est aussi le service le plus complexe à gérer et à planifier, compte tenu des nombreuses variables, du nombre élevé d'acteurs, de la difficulté de standardisation et de coordination des interventions chirurgicales. L'optimisation de son fonctionnement est donc l'une des premières préoccupations des gestionnaires et des acteurs qui y opèrent (Lamiri et al. 2007). L'objectif de ce chapitre est de présenter une revue de la littérature qui a abordé, analysé et développé les problèmes de planification et d'ordonnancement des activités chirurgicales sous contraintes de ressources en proposant une notation homogène qui identifie clairement le problème initialement. Ensuite, on va se concentrer sur le positionnement du problème en termes de complexité, des différentes approches de résolution et de la méthodologie de recherche adoptée. On va réaliser également des tableaux de synthèse regroupant une grande partie des travaux déjà traités dans la littérature conduisant à une analyse comparative des données.

2.2 Concepts généraux

Afin de gérer et coordonner les différentes activités du bloc opératoire, les établissements hospitaliers utilisent un outil de gestion appelée programmation opératoire (Kharraja, 2003) (Jebali, 2004) (Chaabane, 2004).

La notion de "programmation opératoire" peut varier d'un établissement à l'autre, mais l'objectif reste le même : élaborer un calendrier prévisionnel des interventions à effectuer sur une période définie, allant d'un jour à plusieurs semaines. Ce calendrier attribue des ressources (humaines et matérielles) aux interventions et détermine leur ordre d'exécution. Communément appelé "programme opératoire", il est le résultat d'une planification et d'un ordonnancement des interventions chirurgicales. Ces deux tâches peuvent être effectuées de manière séquentielle (hiérarchique) ou

simultanée, en fonction de la politique de l'hôpital.

Le mode de fonctionnement actuel de la planification des opérations chirurgicales n'est pas formalisé, ni accompagné d'outil d'aide à la décision permettant de tenir compte de la panoplie d'informations rendue disponible grâce à l'accessibilité des systèmes informatiques. La personne responsable établira la cédule d'opération pour les prochaines semaines de façon intuitive et en se fiant à son expérience (Dorval, 2019). Cette méthode permet difficilement de coordonner efficacement l'ensemble des ressources nécessaires, et encore moins d'optimiser l'utilisation de ces ressources. (Marcon et al., 2008) se basent sur leurs constats de ce mode de gestion pour affirmer qu'il génère une performance médiocre et conduit à des dysfonctionnements, particulièrement au niveau de la coordination des activités.

La figure 2.1 présente les problèmes de planification classés sur quatre paliers : le type de patients, les décisions, l'intégration de l'incertitude, l'objectif et les mesures de performances (Dorval, 2019).

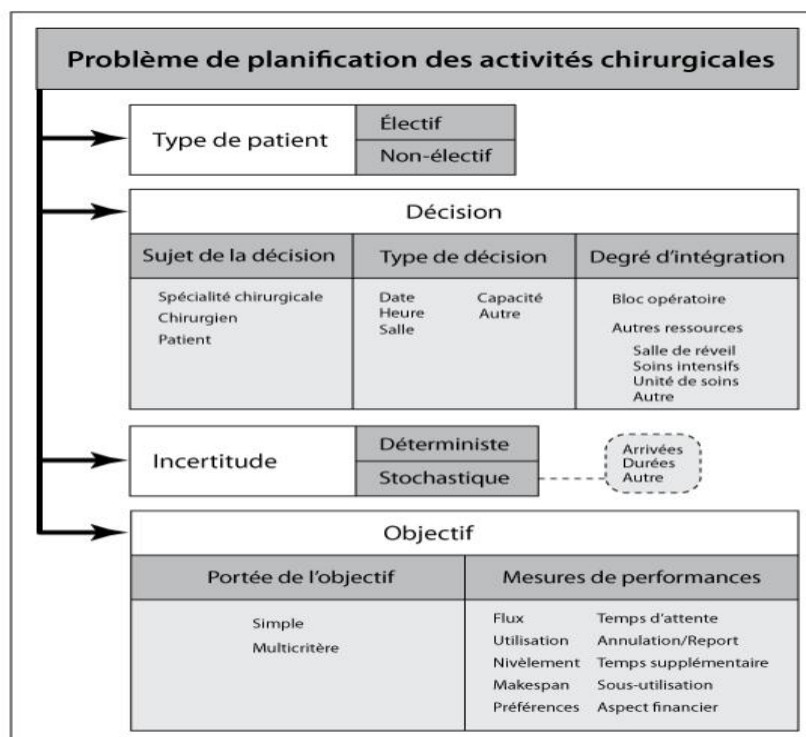


Figure 2.1 : Classification des problèmes de planification des activités chirurgicales.

2.3 Systèmes d'information hospitaliers

Un Système d'Information Hospitalier (SIH) peut être défini comme un système informatique destiné à faciliter la gestion de l'ensemble des informations médicales et administratives d'un hôpital. Il s'agit d'améliorer la qualité des soins distribués dans l'hôpital tout en augmentant son efficacité (Degoulet et Fieschi, 1994).

Actuellement, les systèmes d'information sont devenus un élément stratégique pour les entreprises, tant dans leur quête d'efficacité organisationnelle que de compétitivité sur les marchés. Les hôpitaux commencent à reconnaître les avantages d'un système d'information. Ils constatent que la gestion des flux d'information relatifs aux patients améliore leur sécurité, et qu'un outil de gestion de l'information peut aider à résoudre les problèmes de communication non seulement entre les services, mais aussi au sein d'un même service. De plus, la mise en place d'un système d'information adéquat peut conduire

à une meilleure compréhension de l'activité (Romeyer et Bongiovanni, 2000). L'étude de Romeyer et Bongiovanni (Romeyer et Bongiovanni, 2000) a examiné comment certains hôpitaux publics français développent des systèmes d'information caractérisés par une traçabilité des activités du personnel médical, leur permettant d'assurer une continuité dans la prise en charge des patients. Les auteurs identifient deux types de systèmes d'information : ceux centrés sur le patient et ceux centrés sur les activités.

Les systèmes d'information axés sur le patient sont extrêmement bénéfiques pour optimiser le parcours des patients depuis leur admission à l'hôpital jusqu'à leur sortie. En ce qui concerne les systèmes d'information axés sur les activités, ils reposent sur une traçabilité de toutes les activités générées autour du patient dans une unité de soins, par exemple le bloc opératoire. Ces systèmes permettent de comprendre l'activité et de recueillir les données nécessaires à la modélisation et à la simulation des systèmes hospitaliers, afin d'objectiver certaines décisions organisationnelles ou opérationnelles (Saleh, 2019).

Par exemple, dans (Lapierre et al., 1999), l'auteur propose une stratégie pour élaborer un système d'information basé sur un système local de mesures évaluant les temps de prestation de soins dans l'unité de soins concernée (bloc opératoire) afin d'identifier les retards et leurs différentes causes. L'interdépendance entre les différents acteurs impliqués dans la réalisation d'une chirurgie, tels que les brancardiers, les infirmiers, les anesthésistes, les aides-soignants et les chirurgiens, constitue une source significative de retard. Un indicateur de performance est établi à partir de mesures prélevées à une fréquence choisie, il renseigne sur l'amélioration d'une performance (par exemple la réduction des retards des chirurgies). Cependant, l'importance de cet indicateur réside dans la possibilité de l'utiliser pour intervenir sur le processus afin d'ajuster sa performance, à l'instar d'une boucle de retour dans un système automatique. Il est toutefois essentiel que les mesures soient fiables et pertinentes et que le système d'information soit bien conçu et intégré au système de pilotage et de contrôle dès le départ pour optimiser l'utilisation des informations.

La mise en place et développement d'un Système d'Information Hospitalier, L'inadaptation de l'organisation du travail, l'inexactitude des statistiques, la sous-utilisation des ressources et des données, ainsi que la difficulté de communication interpersonnelle résultant de la diversité des formations de base du personnel (infirmiers, médecins, techniciens, corps administratif, agents d'appui, etc.) et de la diversité des tâches qui leurs incombent (Diagnostic, interventionnel, organisation, logistique, etc.), telles sont les raisons qui ont conduit le CDHU Hassan II de Fès à opter pour l'implantation en 2005 d'un Système d'Information Hospitalier (SIH) afin d'améliorer la qualité du soin d'un côté et la maîtrise de la gestion des coûts d'un autre, qui s'avère -comme l'expérience le prouve- un choix prodigieux (Site officiel du CHU Hassan II de FES, 2023).

Un SIH étant inséré dans un centre hospitalier en perpétuelle évolution permet d'acquérir des données, de les évaluer, de les traiter par des outils informatiques ou organisationnels, de communiquer les informations contenant une forte valeur ajoutée à tous les partenaires internes et externes de l'établissement, collaborant à une œuvre commune orientée vers un but spécifique, à savoir la prise en charge d'un patient et le rétablissement de celui-ci (Site officiel du CHU Hassan II de FES, 2023).

2.4 Approche et méthodologie de recherche

La conduite d'une recherche pertinente repose sur différents piliers interdépendants, allant de l'élaboration du sujet principal à la synthèse des informations et à leur évaluation par le biais d'une revue de la littérature. Afin d'établir une bibliographie aussi générale et complète que possible concernant la résolution des problèmes de planification et d'ordonnancement dans les blocs opératoires à ressources limitées. Plusieurs bases de données ont été examinées en priorité :

PubMed/MEDLINE, Web of Science, Scopus, Embase et la Cochrane Library. Par ailleurs, le choix des mots-clés ou descripteurs correspondant aux problèmes considérés constitue l'une des étapes essentielles de la recherche. En effet, les mots-clés utilisés sont : planification ; ordonnancement ; bloc opératoire ; contraintes de ressources ; modélisation ; optimisation.

En outre, plusieurs combinaisons des descripteurs susmentionnés ont également été élaborées afin d'affiner les résultats. Les termes de recherche dans chaque base de données comprenaient tous les termes MeSH et/ou les mots-clés associés à notre question de recherche. Les termes de recherche ont été combinés à l'aide des opérateurs booléens "OR" et "AND", si nécessaire. Les dates de recherche ont été limitées aux articles publiés après 1999 pour assurer la pertinence des pratiques actuelles de gestion des salles opératoire. La littérature sélectionnée comprend environ 600 documents, répartis dans une bonne proportion entre des articles scientifiques et quelques thèses de doctorat. Un examen minutieux nous a permis de trouver 72 documents d'intérêt pour des études récentes menées entre 1999 et 2023. Afin d'assurer l'inclusion et la revue des articles les plus pertinents, le protocole de recherche documentaire (Figure 2.2) a été basé sur la sélection d'articles de revues et de thèses publiés en anglais et en français (Soualfi et al., 2023).

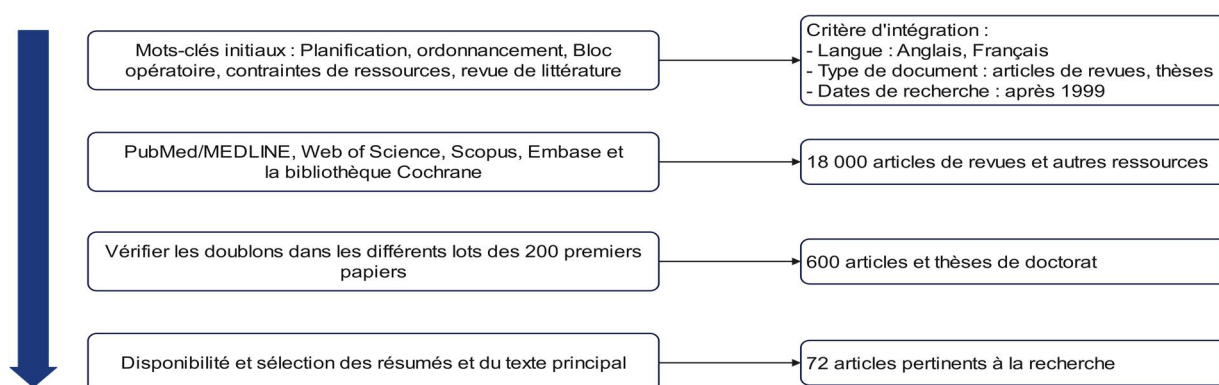


Figure 2.2 : Procédure et méthodologie de recherche

La figure 2.3 décrit l'évolution du nombre d'articles sélectionnés pour notre revue de littérature. En analysant la figure, nous pouvons voir que le nombre de publications concernant les problèmes de planification et d'ordonnancement des blocs opératoires a été variable. Le pic est observé en 2008 et 2010.

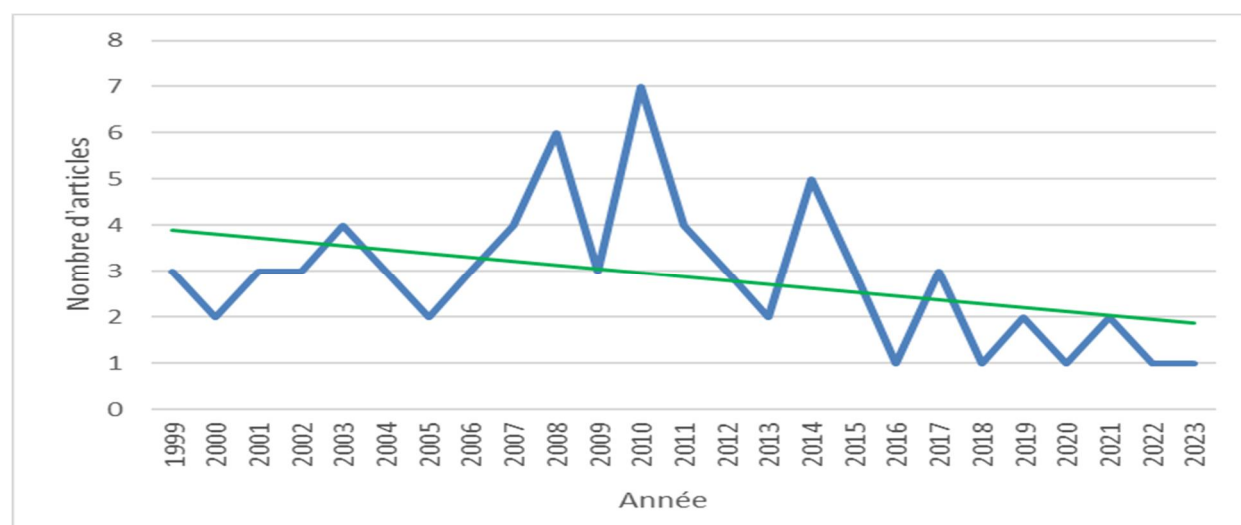


Figure 2.3 : Evolution des publications des problèmes de planification et d'ordonnancement du bloc opératoire

2.5 Programmation du bloc opératoire axé sur les ressources

2.5.1 Programmation prédictive axée uniquement sur les salles opératoires

L'utilisation optimale de la capacité disponible de la salle d'opération est un objectif de performance très populaire (Testi et al., 2007), (Fei et al., 2010), (Liu et al., 2011), (Devi et al., 2012) et (Marques et al., 2012). Dans certains travaux de planification, le dépassement des heures normales n'est pas autorisé (Addis et al., 2016), (Bruni et al., 2015), (Cappanera et al., 2018). Dans d'autres, bien que les heures supplémentaires soient autorisées, il est préférable de les minimiser (Hans et al., 2008), (Denton et al., 2010), (Min et Yih, 2010), (Rachuba et Werners, 2014), (Wang et al., 2014). Les auteurs de (Landa et al., 2016) cherchent à maximiser le taux d'occupation des salles et à minimiser les annulations dues au dépassement des plages horaires d'ouverture régulières.

Dans (Ogulata et Erol, 2003), les auteurs mettent en avant une méthode visant à minimiser la sous-utilisation des blocs opératoires, à équilibrer la distribution des interventions entre les équipes chirurgicales et à diminuer le temps d'attente des patients. Ils introduisent un modèle de programmation à objectifs multiples pour établir le programme opératoire hebdomadaire. Pour atteindre cet objectif, les auteurs ont opté pour une approche hiérarchique en décomposant le problème en trois étapes :

- ✚ Sélection de sous-ensembles de patients (priorité et urgence) à opérer la semaine suivante.
- ✚ Attribution des patients aux équipes chirurgicales.
- ✚ Attribution des interventions aux salles-jours.

Dans (Marques et al., 2011), l'objectif des auteurs était de maximiser le taux d'occupation des salles d'opération. Les auteurs ont proposé une méthode exacte pour construire le programme opératoire. En raison de la complexité de la méthode, ils ont ajouté une heuristique à leur proposition. Plus tard, les mêmes auteurs ont pris en compte la disponibilité des chirurgiens et ont proposé comme (Conforti et al., 2010) une approche de résolution basée sur un algorithme génétique (Marques, et al., 2014).

Dans (Marcon et al., 2001) et (Marcon et al., 2003), les auteurs visent à maximiser le taux d'occupation des salles tout en respectant les heures d'ouverture habituelles. Ils ont suggéré une approche en deux phases :

- ✚ Une phase de planification statique où l'outil de planification répartit les interventions sur les heures d'ouverture des blocs opératoires afin de minimiser les dépassements de temps et donc le risque de non-réalisation.
- ✚ Une phase dynamique où l'outil estime par calcul stochastique le risque de non-réalisation des interventions, puis aide à la négociation entre les différents acteurs pour apporter les modifications nécessaires.

2.5.2 Programmation prédictive incluant les salles opératoires et salle de réveil

De nombreux travaux ont été réalisés sur le problème de la planification de bloc opératoire, avec la contrainte de la disponibilité des lits de récupération (Fei et al., 2010) ; (Dekhici et al., 2012) ; (Huang et al., 2012) ; (Yu et al., 2013). Le problème d'ordonnancement est assimilé à un flow shop hybride à deux étages. Les méthodes de résolution adoptées sont : l'algorithme génétique hybride, l'algorithme de recherche Tabou et l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire. Les auteurs de l'étude Lee et Yih, 2014) déterminent les heures de début des interventions chirurgicales dans la salle d'opération en fonction de la disponibilité des lits dans l'unité de soins post-anesthésiques (USPA) et de l'incertitude quant à la durée des tâches. Le problème est abordé comme un atelier flexible avec des

temps flous. Pour résoudre ce problème, ils ont développé un algorithme génétique qui détermine l'ordre des interventions chirurgicales et une heuristique pour la détermination des temps de démarrage. Le problème de programmation opératoire a été résolu en deux étapes. Tout d'abord, les auteurs ont proposé un programme linéaire en nombres entiers pour la planification. La complexité du modèle proposé ne permettant pas sa résolution par un solveur commercial, les auteurs ont eu recours à une heuristique inspirée de la méthode Hongroise (Khun, 1955). Deuxièmement, en plus des salles opératoires, les auteurs ont pris en compte les lits de réveil. Ce problème a été modélisé comme un flow shop hybride à deux étages avec une contrainte de non-attente, puisque les auteurs supposent que les patients opérés doivent être directement transférés dans la salle de réveil.

Pour développer le programme opératoire, (Jebali et al. 2006) ont adopté une approche en deux étapes. La première étape, la planification, consiste à affecter les actes chirurgicaux aux salles- jour. Les auteurs ont proposé un MILP dont la fonction objective est exprimée en termes de coût. Deuxième étape, l'ordonnancement, les auteurs ont pris en considération la disponibilité des lits de récupération. Ils ont traité ce problème comme un flow shop hybride à deux étages avec l'objectif de minimiser les heures supplémentaires.

Deux stratégies différentes ont été testées. Dans la première, l'affectation des interventions aux salles n'est pas remise en question, tandis que dans la seconde, certaines affectations peuvent être modifiées. Dans (Kharraja et al., 2003), les auteurs ont assimilé le problème d'ordonnancement à celui d'un flow shop hybride à deux étages. L'objectif considéré était de minimiser le makespan dans la salle de réveil.

Les auteurs de (Fei et al., 2010) ont résolu les deux sous-problèmes (Advanced scheduling et Allocation scheduling) de manière séquentielle. Ils ont proposé un modèle mathématique en nombres entiers avec des objectifs multiples (minimiser le coût des heures supplémentaires et minimiser les heures de sous-utilisation). Ce modèle est résolu par des procédures heuristiques et par un algorithme de type "Branch-and-Price", basé sur la génération de colonnes. Le sous-problème « Allocation scheduling » a été modélisé comme celui d'un flow shop hybride à deux étages avec l'objectif de minimiser le makespan des salles d'opération et de la salle de réveil. Un algorithme hybride génétique-Tabou résout l'atelier hybride proposé.

2.5.3 Programmation prédictive incluant les ressources de transport du patient

Les auteurs (Saadani, et al, 2006) ont considéré dans leur travail : le brancardage aller, les salles d'opération, les postes de réveil et le brancardage de retour. Cet ensemble est assimilé à un flow shop hybride avec cycles, sous la forme d'un job shop avec machines dupliquées. L'objectif est de minimiser le makespan. Les auteurs ont proposé une heuristique utilisant une variation de l'indice de Palmer appliquée avec les règles NEH (Nawaz, nscore et Ham) et LBM.

Les auteurs (Perdomo et al., 2006) envisagent quatre étapes : le transfert du patient de sa chambre au bloc opératoire, la procédure chirurgicale, le transfert du patient vers la salle de réveil et le transfert du patient de son lit de réveil à sa chambre. Les auteurs tiennent également compte du nettoyage de la salle d'opération après l'intervention. Le réveil est programmé dans les salles d'opération si le transfert vers la salle de réveil n'est pas possible. Pour réaliser l'ordonnancement, les auteurs proposent un modèle mathématique et utilisent une relaxation lagrangienne pour le résoudre. L'objectif envisagé est de minimiser le temps nécessaire à la réalisation des différentes étapes du parcours du patient. Quatre ans plus tard, les mêmes auteurs assimilent le problème du flow shop hybride à 4 étapes et le résolvent en utilisant la relaxation lagrangienne (Augusto et al., 2010).

2.5.4 Programmation prédictive incluant l'unité de soins intensifs (USI).

Les facteurs externes à une unité peuvent avoir un impact significatif sur les programmes opérationnels, en particulier dans le contexte d'une unité de soins intensifs. Par exemple, la programmation d'un patient pour une intervention chirurgicale nécessitant des soins intensifs postopératoires est dépendante de la disponibilité d'un lit dans l'unité de soins intensifs. Des travaux tels que ceux de (Kim et al., 1999), (Seung-Chul et al., 2000) et (Kim et Horowitz, 2002) se sont concentrés sur la gestion des unités de soins intensifs. Dans leur étude de 1999, Kim et al. ont utilisé un outil de simulation pour évaluer les performances d'une unité de soins intensifs, modélisée comme un multiserveur en file d'attente. Les indicateurs de performance comprennent la probabilité qu'un patient soit admis sans délai ou le taux de refus. Dans leurs travaux, (Seung-Chul et al., 2000) et (Kim et Horowitz, 2002) ont examiné cinq stratégies d'attribution des lits dans les unités de soins intensifs. Le but de leur recherche était de réduire le nombre d'interventions électives annulées en raison d'une pénurie de lits dans l'unité de soins intensifs. Dans leur modèle, ils ont proposé des lois de distribution de probabilité pour les variables aléatoires, y compris l'arrivée des patients à l'USI, les temps de service pour les patients non électifs et les temps de service pour les patients électifs. L'attribution de lits dans l'unité de soins intensifs pour les interventions électives pourrait considérablement diminuer le nombre d'interventions annulées. Par conséquent, il est suggéré de réserver un certain nombre de lits, déterminé par calcul, pour les soins des patients électifs.

Dans leur étude, (Kharraja et al., 2006) ont proposé un modèle de flow shop à trois niveaux pour l'élaboration du programme opératoire. En plus des salles d'opération et du service post-intervention (réveil), le troisième niveau est l'unité de soins intensifs. L'objectif était de minimiser la différence, pour tous les chirurgiens, entre l'offre et la demande hebdomadaires de lits de soins intensifs pour les patients opérés.

2.5.5 Programmation prédictive incluant autres ressources

Dans l'élaboration du programme opérationnel, d'autres ressources, tant humaines que matérielles, ont été considérées. Dans les travaux de (Smolski et al., 2002) et (Marcon et al., 2003), les auteurs ont cherché à évaluer la capacité de ressources telles que les lits de récupération et le personnel de transport des patients, en utilisant une simulation d'événements discrets. Dans le cadre de la chirurgie ambulatoire, (Hsu et al., 2003) ont conceptualisé le problème de planification comme un flow shop à deux étapes avec une contrainte de non-attente entre les deux étapes. Les interventions en salle constituent la première étape, avec les chirurgiens comme ressource principale. La deuxième étape comprend tous les lits de récupération, avec les infirmières comme ressource principale. Deux objectifs ont été envisagés : minimiser le makespan et le nombre d'infirmières dans la salle de réveil. Pour résoudre ce problème, une heuristique de recherche tabou a été employée (Vijayakumar et al., 2013), qui prend en compte les ressources du problème et utilise un modèle de dual bin-packing. Étant donné le nombre de jours et les ressources disponibles pour le calendrier, ils cherchent à maximiser le nombre de chirurgies à programmer. Ils modélisent le problème comme un MILP et développent une heuristique pour résoudre le problème sans prendre en compte la deuxième étape (récupération).

Dans l'étude de (Pham et Klinkert, 2008), chaque procédure chirurgicale est représentée comme une séquence d'activités prédéfinies avec un délai d'attente maximal autorisé entre deux activités successives, un ensemble de ressources étant attribué à chaque activité. Les auteurs ont inclus l'unité de soins intensifs parmi les ressources, en plus des salles d'opération. Le problème a été formulé comme un job shop multi-mode avec blocage. L'objectif est de minimiser le makespan. Les auteurs développent un modèle de programmation linéaire en nombres mixtes (MILP).

Dans leur étude, (Roland et al., 2006) distinguent deux types de ressources : les ressources renouvelables (chirurgiens, anesthésistes, infirmières) et les ressources non renouvelables (produits pharmaceutiques et équipements stérilisés). Le modèle mathématique qu'ils proposent vise à minimiser les coûts associés à l'ouverture des salles d'opération et à réduire les heures supplémentaires.

La figure 2.4 offre un aperçu des recherches qui se sont intéressées à la programmation des salles d'opération en se concentrant sur les différentes ressources.

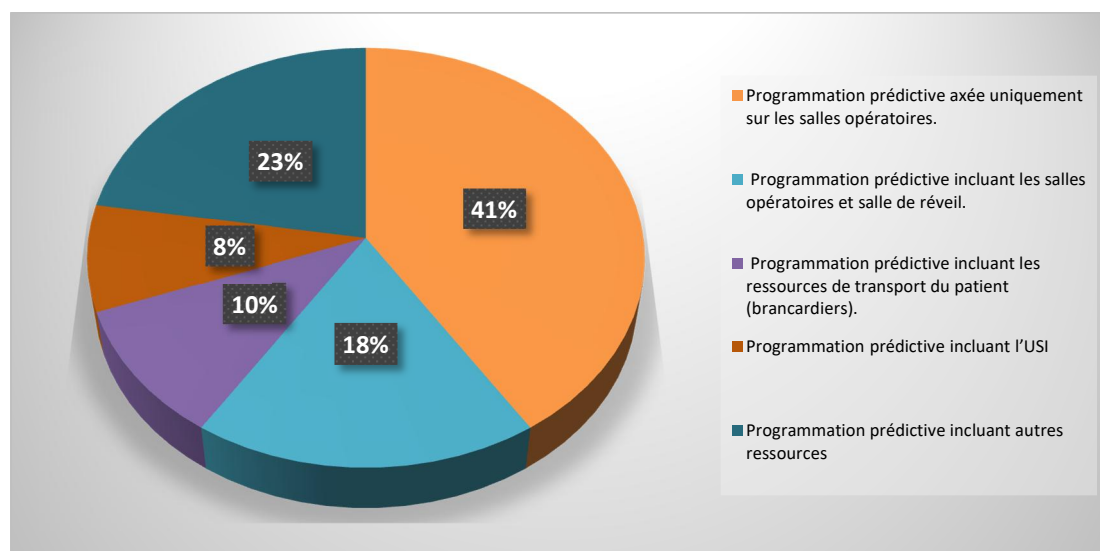


Figure 2.4 : Pourcentage des travaux intéressés par la programmation du bloc opératoire en fonction des ressources

2.6 Revue de littérature de la planification des interventions chirurgicales

2.6.1 Notation

La notation suggérée pour la planification opératoire, structurée en trois domaines, est analogue à celle utilisée par (Janvier Pensi., 2018) pour les problèmes de planification. Le premier domaine, noté α , décrit la structure en question, c'est-à-dire les caractéristiques des salles opératoires, des chirurgiens et des équipements. Le deuxième domaine, noté β , détaille les règles de gestion qui régissent le modèle, c'est-à-dire les règles qui définissent l'interaction entre les interventions chirurgicales (IC) et les différentes ressources. Le troisième domaine, noté γ , décrit les objectifs envisagés.

Champ α : structure

Sn :	Le nombre de salles : n correspond au nombre de salles du bloc opératoire.
Cn :	Le nombre de chirurgiens : n correspond au nombre de chirurgiens intervenant dans le bloc opératoire.
En :	Le nombre d'équipements : n indique le nombre d'équipements du bloc opératoire.
PlanningE :	La disponibilité des équipements est différente du planning des salles.
PlanningC :	La disponibilité des chirurgiens est différente du planning des salles.
ExperC :	La durée d'intervention dépend de l'expérience du chirurgien.
PrefC :	La préférence des chirurgiens à travailler le matin ou dans l'après-midi est prise en compte.

Champ β : règles de gestion

Modèle de programmation (OS, BS, MBS) : Trois modèles de planification opératoire sont recensés.

- OS :** Open Scheduling ou programmation ouverte.
- BS :** Block Scheduling ou programmation avec allocation préalable des plages horaires aux chirurgiens, aux groupes chirurgicaux ou services chirurgicaux.
- MBS :** Modified Block Scheduling ou programmation par allocation préalable avec ajustement des plages allouées.
- NonProg :** Les patients non programmés (NonProg) n'appartiennent pas à la liste des interventions programmées ou à programmer.
- PriorP :** L'affectation du patient dans la salle à partir de la liste d'attente dépend de la priorité de son intervention.
- ChoixP :** Le patient a la possibilité de choisir son chirurgien.

Champ γ : objectifs

- HS :** Le nombre d'heures supplémentaires à minimiser.
- TocS :** Le taux d'occupation des salles à maximiser.
- NS :** Le nombre de salles d'opération à minimiser.
- NICNA :** Le nombre d'IC non affectées dans les salles à minimiser.
- NICA :** Le nombre d'IC affectées à maximiser ;
- Npl :** Le nombre de plages allouées aux différents chirurgiens à minimiser.
- CA :** Le coût d'attente des patients à minimiser.
- CT :** Le coût total d'intervention à minimiser.
- CSU :** Les coûts moyens de sous-utilisation des salles à minimiser.
- Csu :** Les coûts moyens de sur-utilisation des salles à minimiser.
- Cus :** Le coût d'utilisation des salles.
- Cso :** Le coût de sous-utilisation des salles.
- CNP :** Les coûts de non planification des patients programmés sur l'horizon de planification à minimiser.
- TA :** Le temps d'attente entre deux interventions chirurgicales à minimiser.
- CO :** Le coût d'ouverture de salles pendant les heures supplémentaires à minimiser.
- EODH :** Ecart entre offre et demande hebdomadaire de l'ensemble des chirurgiens à minimiser. C'est-à-dire la différence entre la durée d'ouverture du bloc opératoire (qui est disponible) et le nombre d'heures d'intervention exigé par l'ensemble des chirurgiens dans la semaine.
- DIE :** La différence entre la date de rendez-vous et la date d'intervention à minimiser.
- NSP :** Le nombre de salles polyvalentes à minimiser.
- NEQ :** Le nombre d'équipes nécessaires à minimiser.

2.6.2 Méthodes de résolution

La résolution des problèmes d'optimisation s'appuie sur les techniques de recherche opérationnelle. Diverses stratégies de résolution ont été élaborées pour traiter une multitude de problèmes de planification dans divers contextes environnementaux. Les méthodes de résolution des problèmes de planification peuvent être regroupées en deux catégories : les méthodes exactes et les méthodes approximatives (Figure 2.5).

Les méthodes exactes ont pour objectif de trouver la solution optimale au problème, mais peuvent être très exigeantes en termes de temps et de mémoire pour les grands cas de problèmes. Leur efficacité dépend de l'ampleur des problèmes traités et des tâches à planifier (Fleischmann, 1990). Ces méthodes nécessitent souvent un effort de calcul considérable (Wolosewicz C., 2006).

Les méthodes approximatives cherchent à obtenir la solution la plus satisfaisante, bien que l'optimalité ne soit pas assurée. Elles sont fréquemment utilisées pour résoudre des problèmes NP-difficiles. Leur but est de réduire de manière significative l'effort de calcul en limitant l'espace des solutions à explorer. La figure 2.5 illustre les différentes méthodes de résolution approximatives et exactes (Gomez Urrutia et al., 2012).

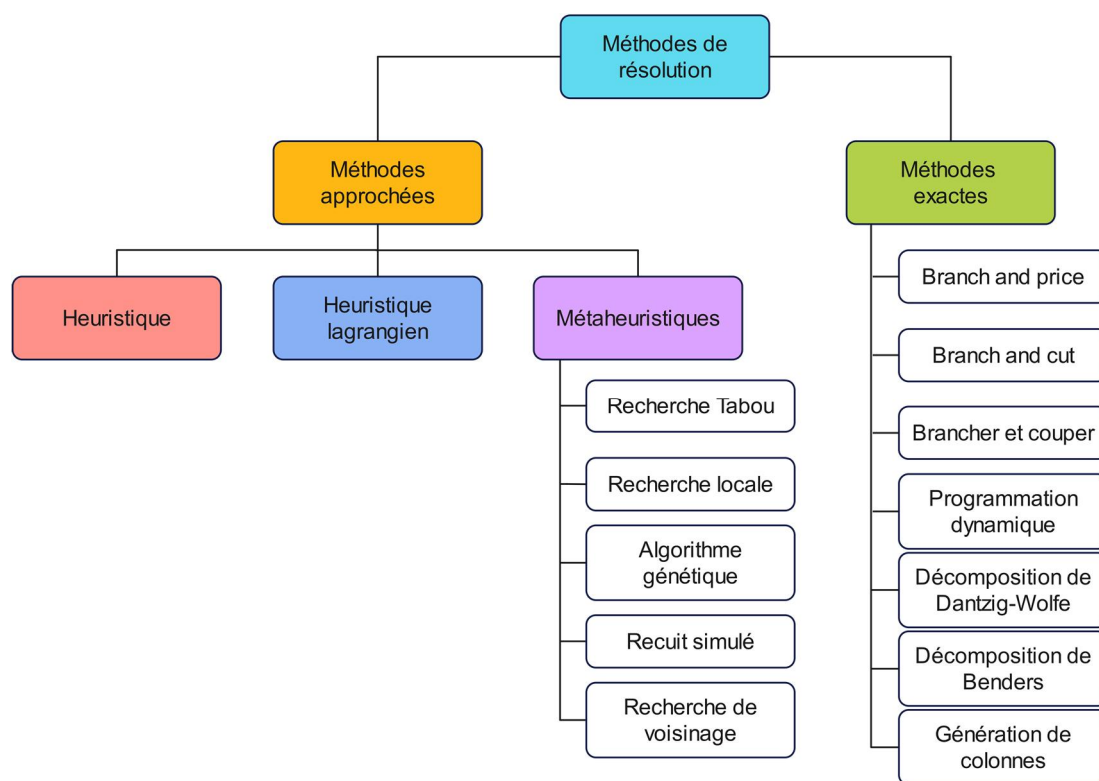


Figure 2.5 : Méthodes de résolution

Afin de faciliter notre travail, nous proposons le tableau 2.1 qui contient toutes les abréviations des méthodes exactes et approximatives qui seront utilisées par la suite.

Tableau 2. 1: Abréviation des méthodes exactes et approximatives

Méthodes	Abréviation
Heuristics	H
Meta-heuristics	MH
Branch and Bound	BB
Branch and Price	BP
Programmation linéaire en nombres entiers	PLNE
Programmation mathématique en nombres entiers mixtes	PM
Recuit simulé	RS
Méthode de la génération de colonnes	GC
Algorithme génétique	AG

2.6.3 Synthèse pour le champ α

Dans le champ α , tous les auteurs des articles examinés ont fourni au moins une caractéristique de la structure considérée. Les auteurs de trois articles ont pris en compte l'expérience du chirurgien dans l'élaboration du planning opératoire (Guinet et Chaabane, 2003), (Kharraja et al., 2006) et (Pariente et al., 2015). Un seul article a pris en compte la préférence du chirurgien pour le choix de son assistant (Roland et al., 2010). Plusieurs articles de la littérature, dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 2.2, ont fait l'objet d'une étude. Une case est coloriée si le paramètre en tête de la colonne du tableau est pris en compte dans l'article mentionné sur la ligne.

Tableau 2.2 : Champ α – Structure

Auteurs	Sn	Cn	En	Chirurgien			Equipement
				PlanningC	ExperS	PrefS	PlanningE
Kharraja et al.,(2004)							
Fei et al.,(2005b)							
Kharraja et al.,(2006)							
Jebali et al.,(2006)							
Hammami et al.,(2007)							
Chaabane et al.,(2007)							
Hans et al.,(2008)							
Fei et al.,(2008)							
Chaabane et al.,(2008)							
Iser et al.,(2008)							
Fei et al.,(2010)							
Rodier,(2010)							
Roland et al.,(2010)							
Aniba et Jebali.,(2011)							
Agnetis et al.,(2012)							
Bouguerra et al.,(2015)							
Razmi et al.,(2015)							
Pariente et al.,(2015)							
Chraibi, (2015)							
Alejandra Duenas ,(2017)							
Arnaud Augustin,(2017)							
Janvier Pensi, ,(2017)							
Linda Wahyuni ,(2018)							
Seyda Gür, (2019)							
Bilal Bou Saleh, (2019)							
Valérie Dorval, (2020)							
Arezki et al,(2020)							

2.6.4 Synthèse pour le champ β

Comme l'indique le tableau 2.3, on observe que la majorité des articles ont exclusivement utilisé le modèle de programmation ouverte (Guinet et Chaabane, 2003), (Fei et al., 2005b, 2008, 2010), (Jebali et al., 2006), (Hans et al., 2008), (Rodier, 2010), (Roland et al., 2010), (Aniba et Jebali., 2011), (Bouguerra et al., 2015), (Razmi et al., 2015) et (Pariante et al., 2015). Il y a peu d'articles qui ont utilisé à la fois la programmation ouverte et la programmation par allocation préalable des plages horaires.

Les différentes règles de gestion des modèles dans la littérature que nous avons examinée sont synthétisées dans le tableau 2.3. Le modèle de planification le plus couramment utilisé est le modèle de programmation ouverte, ou Open Scheduling. Un seul article donne la priorité à l'affectation des patients lors de l'élaboration du planning opératoire. Deux articles offrent aux patients la possibilité de choisir leur chirurgien.

Tableau 2.3 : Champ β – règles de gestion

Auteurs	Modèle de programmation			Patient		
	OS	BS	MBS	NonPro	PriorP	ChoixP
Kharraja et al.,(2004)						
Fei et al.,(2005b)						
Kharraja et al.,(2006)						
Jebali et al.,(2006)						
Hammami et al.,(2007)						
Chaabane et al.,(2007)						
Hans et al.,(2008)						
Fei et al.,(2008)						
Chaabane et al.,(2008)						
Iser et al.,(2008)						
Fei et al.,(2010)						
Rodier,(2010)						
Roland et al.,(2010)						
Aniba et Jebali.,(2011)						
Agnetis et al.,(2012)						
Bouguerra et al.,(2015)						
Razmi et al.,(2015)						
Pariante et al.,(2015)						
Chraïbi, (2015)						
Alejandra Duenas ,(2017)						
Arnaud Augustin,(2017)						
Janvier Pensi, ,(2017)						
Linda Wahyuni ,(2018)						
Seyda Gür, (2019)						
Bilal Bou Saleh, (2019)						
Valérie Dorval, (2020)						
Arezki et al,(2020)						

2.6.5 Synthèse pour le champ γ

Plusieurs critères ont été identifiés dans les différents modèles de la littérature que nous avons examiné. Parmi les critères les plus couramment utilisés, on trouve le coût d'intervention à minimiser, qui est présent dans les articles de (Guinet et Chaabane, 2003), (Fei et al., 2005, 2008), (Jebali et al., 2006), (Chaabane et al., 2007) et (Razmi et al., 2015). Le temps d'attente entre deux interventions à

minimiser est un autre critère fréquemment utilisé, présent dans neuf articles. Le coût d'ouverture des salles pendant les heures supplémentaires à minimiser est un critère qui apparaît dans cinq articles. Enfin, le taux d'occupation des salles à minimiser est un critère considéré dans quatre articles.

Les critères considérés dans les différents modèles proposés dans la littérature sont synthétisés dans le tableau 2.4. Les critères les plus fréquemment rencontrés sont la minimisation des coûts, des heures supplémentaires, du taux d'occupation des salles et du temps d'attente entre deux interventions chirurgicales.

[illegible]

2.6.6 Synthèse de méthodes de résolution

Le tableau 2.5 résume les méthodes rencontrées dans la littérature examinée. Ces méthodes sont diverses. Parmi les méthodes exactes, la Programmation Linéaire a été employée dans seize articles. D'autres approches ont été proposées pour trouver des solutions et limiter les temps de calcul. Un algorithme de branch and price a été utilisé par (Fei et al., 2005). Un algorithme de branch and bound a été utilisé par (Fei et al., 2008). Plusieurs heuristiques ont été employées, y compris des heuristiques spécifiques aux problèmes de planification opératoire, comme l'heuristique de (Rodier, 2010), (Kharraja et al., 2006), (Hans et al., 2008) et (Chahinez Arezki et al, 2020).

Les métaheuristiques sont également représentées, comme on peut le voir dans les travaux de (Hans et al., 2008), (Roland et al., 2010), (Razmi et al., 2015) et (Alejandra Duenas, 2017). On trouve aussi une hybridation de méthodes entre heuristique, méthode de simulation et métaheuristique, comme illustré dans les travaux de (Rodier, 2010) et (Janvier Pensi, 2018).

Tableau 2.5 : Etat de l'art de la modélisation de la planification et d'ordonnancement du bloc opératoire

Auteurs	PLNE	P M	BB	BP	H	S	H+ S	GC	MH	H+S +MH	DA I
Kharraja et al.,(2004)											
Fei et al.,(2005b)											
Kharraja et al.,(2006)											
Jebali et al.,(2006)											
Hammami et al.,(2007)											
Chaabane et al.,(2007)											
Hans et al.,(2008)											
Fei et al.,(2008)											
Chaabane et al.,(2008)											
Iser et al.,(2008)											
Fei et al.,(2010)											
Rodier,(2010)											
Roland et al.,(2010)											
Aniba et Jebali.,(2011)											
Agnetis et al.,(2012)											
Bouguerra et al.,(2015)											
Razmi et al.,(2015)											
Pariente et al.,(2015)											
Chraïbi, (2015)											
Alejandra Duenas ,(2017)											
Arnaud Augustin,(2017)											
Janvier Pensi, ,(2017)											
Bilal Bou Saleh, (2019)											
Valérie Dorval, (2020)											
Arezki et al,(2020)											

S : simulation ; H+S : heuristique + simulation ; IAD : Intelligence Artificielle Distribuée

La figure 2.6 montre le pourcentage des méthodes de résolution utilisées dans la littérature pour planifier et ordonnancer les blocs opératoires.

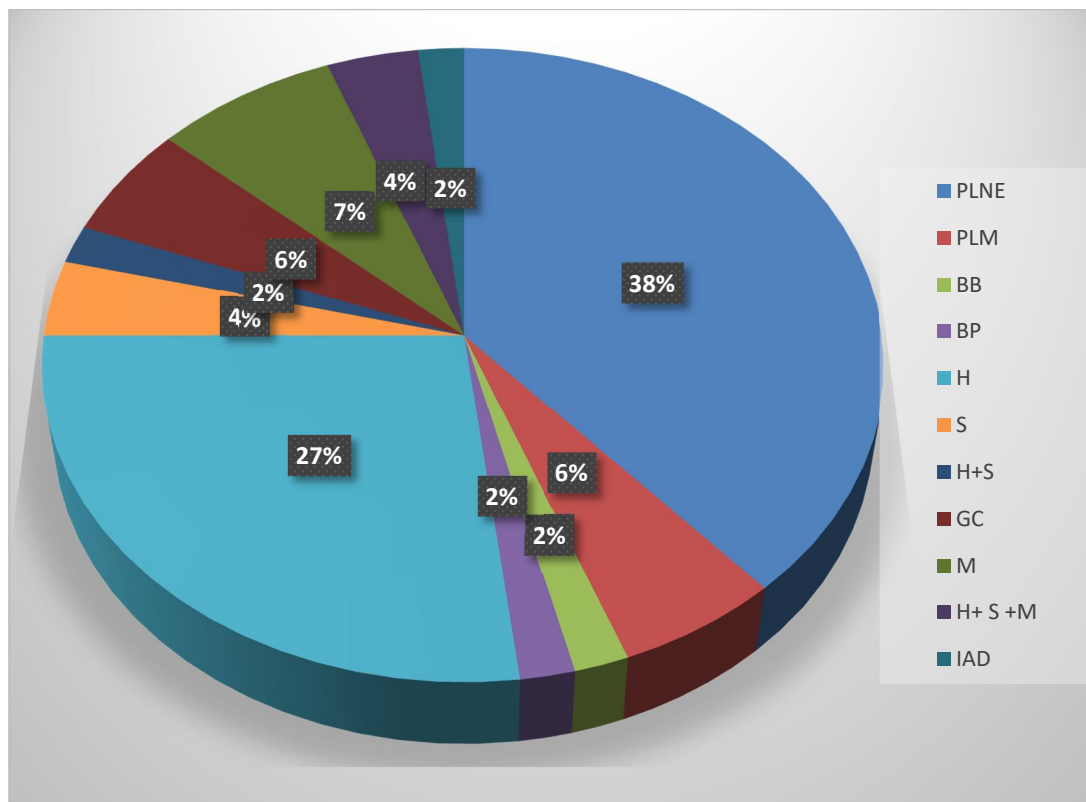


Figure 2.6 : Pourcentage des méthodes de résolution utilisées

2.7 Revue de la littérature de l'ordonnancement des blocs opératoires

L'ordonnancement des interventions chirurgicales dans un bloc opératoire implique l'établissement d'une séquence d'interventions sur diverses ressources disponibles. Deux approches principales sont discutées dans la littérature scientifique (Lamiri, 2007) :

- ✚ **Ordonnancement centré sur les salles opératoires** : Cette approche se concentre principalement sur l'organisation des salles opératoires.
- ✚ **Ordonnancement du bloc opératoire** : Cette approche prend en compte une gamme plus large de ressources, y compris les salles d'opération, les lits de la salle de réveil et potentiellement d'autres ressources telles que le personnel de transport des patients, les équipes de nettoyage, les chirurgiens, le personnel infirmier et la salle de soins intensifs.

2.7.1 Ordonnancement centré sur les salles opératoires

Dans le contexte d'un bloc opératoire, une fois que les patients sont assignés à chaque salle, le défi de l'ordonnancement est de définir l'ordre et le moment (heure de début) des interventions pour chaque patient. Deux catégories de travaux sont généralement reconnues dans ce domaine :

- ✚ **L'ordonnancement d'une seule salle** : Cette approche se concentre sur l'optimisation de l'ordonnancement au sein d'une seule salle opératoire.
- ✚ **L'ordonnancement simultané de plusieurs salles** : Cette approche cherche à optimiser l'ordonnancement en tenant compte de plusieurs salles en même temps.

(Lebowitz, 2003) suggère une méthode d'approximation des durées d'intervention en utilisant leurs moyennes, basées sur des données historiques. Une comparaison par simulation numérique de plusieurs règles de séquençage a été effectuée. Il en ressort que l'ordonnancement des patients en fonction de l'ordre croissant de leurs durées moyennes d'intervention peut contribuer à minimiser le temps d'attente des chirurgiens et à éviter une utilisation sous-optimale ou excessive de la salle opératoire.

(Denton et Gupta, 2003) ainsi que (Denton et al., 2007) ont étudié le même problème d'ordonnancement, mais avec l'objectif de minimiser les coûts associés à l'attente des chirurgiens, ainsi qu'à la sous-utilisation et à la sur-utilisation de la salle d'opération. Dans leur première étude (Denton et Gupta, 2003), ils ont supposé que l'ordre des patients fût prédéterminé. Ils ont formulé le problème comme un programme linéaire stochastique en deux étapes et ont proposé une méthode de résolution exacte (méthode en forme de L). Dans une publication ultérieure (Denton et al., 2007), ils ont comparé leur approche à plusieurs heuristiques pour le séquençement des patients. Ils ont conclu que la meilleure approche consiste à effectuer les interventions dans l'ordre croissant des variances, confirmant ainsi les résultats de certains auteurs (Weiss, 1990). Dans une autre étude (Denton et al., 2006), ils ont utilisé la simulation Monte Carlo et le recuit simulé pour résoudre le problème d'ordonnancement.

Il est observé que le problème d'ordonnancement est généralement divisé en deux étapes : la détermination de l'ordre des interventions, suivie de l'estimation de leurs heures de début. Cette division est probablement due à la complexité du problème lorsqu'il est traité de manière conjointe. Il est également à noter que seuls les patients programmés sont pris en compte, sans tenir compte des activités non planifiées.

D'autres études ont abordé le problème de l'ordonnancement en considérant un ensemble de salles opératoire de manière simultanée.

Certaines procédures médicales nécessitent un équipement spécifique (par exemple, un microscope chirurgical, amplificateur de brillance, colonne d'arthroscopie ...) ou un personnel médical hautement spécialisé qui n'est disponible qu'en quantité limitée. Par conséquent, ces procédures ne peuvent pas être effectuées simultanément, même dans des salles différentes. Les auteurs (Dexter et Traub, 2000) ont développé une méthode statistique pour estimer la probabilité qu'une intervention dure plus longtemps qu'une autre, ce qui permet de séquencer les interventions de manière à éviter les conflits de ressources. De leur côté, les chercheurs (Sier et al., 1997) ont abordé le problème de l'ordonnancement des interventions avec des durées déterministes dans plusieurs salles, tout en tenant compte des contraintes liées à la disponibilité des équipements, à l'âge du patient, à la durée des interventions, etc. Ils ont modélisé le problème sous la forme d'un programme non linéaire en nombres entiers et ont utilisé le recuit simulé pour une résolution approximative.

Un problème étroitement lié à celui discuté dans cette section est celui de la gestion des rendez-vous (out patient appointment problem) (Cayiril et Veral, 2003) (Klassen et Rohleder, 1996). Il s'agit de déterminer les heures de rendez-vous des patients pour des soins (qu'ils soient chirurgicaux ou non) en ambulatoire pour une journée donnée. L'objectif est généralement de minimiser le temps d'attente du patient et l'inactivité des ressources. Deux types d'ordonnancements sont généralement discutés dans la littérature :

- ✚ **Ordonnancement par bloc (Block Appointment) :** Cette méthode implique la division de la période d'ordonnancement en plusieurs blocs de taille égale. L'objectif est de déterminer le groupe de patients qui doivent arriver au début de chaque bloc.

- ✚ **Ordonnancement individuel (Individual Appointment Scheduling)** : Dans cette approche, un rendez-vous est déterminé pour chaque patient sans discrétiser la période d'ordonnancement.

2.7.2 Ordonnancement du bloc opératoire

Deux principales catégories de travaux sont distinguées (Lamiri, 2007):

- ✚ La première catégorie permet au patient de commencer son réveil dans la salle d'opération si la salle de réveil est occupée, ce qui peut entraîner un blocage de la salle d'opération (contrainte de blocage).
- ✚ La deuxième catégorie stipule que le réveil doit commencer dans la salle de réveil (contrainte de non-attente, ou no-wait).

L'objectif principal de l'ordonnancement est souvent de minimiser le temps d'exécution total de la salle de réveil et/ou des salles opératoires. Cet objectif est équivalent à minimiser les dépassements de temps dans les salles opératoires et/ou dans la salle de réveil.

Dans leur travail, certains auteurs (Roland et al., 2010) cherchent à optimiser une fonction qui comprend les coûts associés à l'utilisation des salles d'opération et les coûts liés au paiement des heures supplémentaires. De leur côté, (Wang et al., 2015) se concentrent sur la minimisation des coûts des salles d'opération (y compris les coûts de dépassement) ainsi que les coûts associés à la salle de réveil lors de la deuxième phase d'ordonnancement.

Dans leur travail, les chercheurs ont visé à minimiser les pénalités associées à plusieurs facteurs. D'une part, ils ont pris en compte le temps d'attente du patient entre sa demande d'intervention et son opération, et d'autre part, le temps d'attente entre l'arrivée du patient et l'heure de l'intervention. De plus, ils ont également considéré le temps supplémentaire d'utilisation des ressources, qu'elles soient humaines ou matérielles (Cornez, 2015).

Un intervalle de temps est nécessaire entre deux opérations pour remettre la salle en état, effectuer le nettoyage et préparer le patient suivant. Certains chercheurs, (Roland et al., 2010), (Fei et al., 2010) et (Van Huele et Vanhoucke, 2014), considèrent ce temps de changement comme inclus dans la durée opératoire. D'autres, (Marques et al., 2012), prévoient une ou plusieurs périodes vides après chaque opération pour permettre le nettoyage de la salle d'opération, ces périodes correspondent à 30 minutes dans tous les cas. Que ce soit par le biais d'une contrainte ou inclus dans les durées opératoires, le temps de changement est pris en compte dans l'ordonnancement du programme opératoire. (Hashemi Doulabi et al., 2014) insèrent un temps de changement entre les opérations sur des patients infectés et des patients non infectés, sans tenir compte de ce temps entre deux patients infectés ou entre deux patients non infectés. (Wang et al., 2015) distinguent le temps de nettoyage du temps de préparation, ces deux durées étant spécifiques à chaque intervention.

L'objectif du séquençage peut être orienté de différentes manières. Par exemple, trois objectifs distincts pourraient être de minimiser le risque de temps supplémentaire en cas de durées d'intervention stochastiques, de prioriser les patients en fonction de certaines de leurs caractéristiques, ou de respecter certaines contraintes préopératoires, peropératoires et postopératoires (Augustin, 2017).

En ce qui concerne les contraintes, elles peuvent être de nature diverse. D'une part, elles peuvent concerner l'utilisation du matériel chirurgical. D'autre part, le séquençage peut également permettre d'équilibrer efficacement le travail des infirmières travaillant en amont et en aval de la salle d'opération. En effet, limiter le nombre d'interventions commençant ou se terminant simultanément

peut aider à éviter les pics de demande trop intenses. Enfin, certaines contraintes peuvent inclure les trajets des patients entre l'hôpital et leurs domiciles (Augustin, 2017).

(Cardoen et al., 2009) ont défini une fonction objective cherchant à optimiser plusieurs de ces critères en leur associant des poids reflétant leur importance. Hsu et al. (2003), quant à eux, cherchent à minimiser le temps total de réalisation pour un nombre donné de patients à opérer ainsi que le nombre d'infirmières nécessaires en salle de réveil. La première étape consiste à déterminer le nombre minimal d'infirmières permettant de ne pas dépasser un certain horaire de réveil et la seconde consiste, une fois fixé le nombre d'infirmières, à minimiser le temps total de réalisation.

Encore une fois, nous pouvons observer que les objectifs peuvent être plus sensibles aux intérêts économiques (par exemple, limiter le risque de dépassement pour le personnel), aux intérêts du personnel (par exemple, horaires équilibrés) ou à ceux des patients (par exemple, réduire le temps d'attente, prioriser certains patients). Les contraintes concernent les ressources humaines et matérielles mais peuvent aussi inclure des caractéristiques supplémentaires comme, par exemple, la disponibilité des chirurgiens (Jebali et al., 2006).

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré une variété de modèles de programmation chirurgicale. Nous avons cherché à comprendre leurs objectifs, leurs contraintes et la façon dont les auteurs ont abordé le problème de la planification et de l'ordonnancement du bloc opératoire.

La classification décrite et la notation proposée ont structuré notre compréhension de l'état actuel de la recherche sur le problème de la planification opératoire. Nous avons synthétisé les trois domaines définis dans la notation. Les méthodes de résolution proposées par les auteurs mentionnés ont été discutées. Il est à noter que les hypothèses et les contraintes considérées varient d'un auteur à l'autre. L' "Open Scheduling" est la méthode la plus couramment utilisée. La planification opératoire est principalement abordée à l'aide de la programmation linéaire en nombres entiers. Peu d'auteurs ont appliqué leurs solutions à des cas réels, soulignant ainsi le besoin d'approfondir nos recherches pour trouver des solutions plus efficaces, dans le but de promouvoir l'optimisation du bloc opératoire.

Nous suggérons d'aborder les problèmes de gestion du bloc opératoire en utilisant une approche bien établie et efficace dans d'autres domaines, mais relativement nouvelle dans le contexte du bloc opératoire : l'intelligence artificielle distribuée dans un système multi-agents coopératif. Cette méthode repose sur la communication et la négociation entre différents agents représentant les acteurs réels du bloc opératoire, et dont le résultat prend en considération toutes les contraintes et le contexte global du processus du bloc opératoire. Cela est particulièrement pertinent dans des situations de stress (comme la Covid-19) ou de catastrophes naturelles (comme le séisme d'Al-Haouz) qui sont à l'origine de crises sanitaires ayant des conséquences importantes sur l'organisation générale de notre système de santé marocain, et plus précisément sur la planification opératoire, avec toutes les difficultés et les échéances qu'elle implique.

Chapitre 3

Impact de la pandémie COVID - 19 sur la planification des blocs opératoires

Chapitre 3

Impact de la pandémie COVID - 19 sur la planification des blocs opératoires

3.1 Introduction

La crise sanitaire mondiale provoquée par le virus SARS-CoV-2, communément appelé COVID-19, a posé un défi sans précédent pour les systèmes de santé. Le nombre de cas confirmés a dépassé les 771 678 854, tandis que le nombre de décès a dépassé les 6 977 010 à l'échelle mondiale (Mathieu, E et al, 2020).

L'impact de la pandémie de COVID-19 sur le domaine chirurgical a été significatif, obligeant toutes les spécialités à élaborer des directives spécifiques pour naviguer dans cette crise. Un triage des procédures chirurgicales quotidiennes a été nécessaire, avec une préférence pour les alternatives non chirurgicales lorsque cela était possible. Cette situation sans précédent a influencé les méthodes de travail, les techniques chirurgicales (qu'elles soient ouvertes ou peu invasives), le déroulement des interventions, ainsi que la sécurité des patients et du personnel. Elle a également eu un impact sur la formation et l'enseignement. Cependant, en suivant et en respectant les directives propres à chaque spécialité, les chirurgiens ont pu continuer à offrir des soins sûrs et efficaces à leurs patients pendant la pandémie (Al-Jabir, A., Kerwan, A. et al, 2020).

L'expansion mondiale rapide du virus COVID-19, a présenté des défis inédits à la communauté médicale et chirurgicale internationale (Sohrabi, C. et al, 2020). Cette situation a malheureusement entraîné une pression sans précédent sur les unités de soins à travers le monde, se traduisant par une augmentation des infections par le virus COVID-19 et des décès consécutifs parmi le personnel médical et paramédical (Remuzzi, A., & Remuzzi, G., 2020).

Dans le contexte de cette crise sanitaire sans précédent, des mesures ont été prises pour répondre aux défis posés par la pandémie. En s'appuyant sur les connaissances actuelles, des directives ont été formulées par des sociétés savantes nationales et internationales. Ces recommandations visent à réduire le risque d'infection pour le personnel et les patients, et à prévenir la transformation des services hospitaliers et des blocs opératoires en zones de propagation du virus (Bouchikh, M. et al, 2020).

Dans ce chapitre, nous allons présenter les répercussions de la pandémie COVID-19 sur l'activité des blocs opératoires à l'échelle mondiale et nationale. Ensuite, on va réaliser une étude de cas réel au sein d'un service de chirurgie du CHU Hassan II de Fès, afin d'analyser l'impact de cette crise sanitaire sur l'activité opératoire globale du service étudié. Nous clôturons cette section par les leçons apprises et les recommandations proposées pour faire face à des situations critiques similaires dans le futur.

3.2 Répercussion de la pandémie COVID-19 sur l'activité des blocs opératoires :

3.2.1 Contexte général

Suite à l'apparition de plusieurs cas de pneumonie de cause inconnue dans la province de Wuhan, Hubei, en Chine, le virus SARS-CoV-2 a été identifié comme l'agent pathogène responsable de la "maladie à coronavirus 2019" (COVID-19). Ce virus à ARN s'est rapidement répandu à l'échelle mondiale, conduisant à une déclaration de pandémie (Zhu, N. et al, 2020), (Sohrabi, C. et al, 2020), (Al-Jabir, A. et al, 2020) et (Nicola, M. et al, 2020). Cette situation a eu des conséquences significatives dans divers secteurs, entraînant des répercussions socio-économiques mondiales (Nicola, M., Alsafi, Z. et al, 2020).

L'impact de la COVID-19 sur la pratique chirurgicale est vaste, englobant des aspects tels que les questions de main-d'œuvre et de personnel, la priorisation des interventions, le risque de transmission virale en peropératoire, ainsi que les répercussions sur l'enseignement de la chirurgie.

Alors que la documentation détaillant l'évolution clinique initiale de la COVID-19 (Guan, W. J. et al, 2020) et les aspects des soins intensifs associés au traitement de ces patients s'étoffe, il existe un manque de données précises sur l'impact de cette pandémie sur la pratique chirurgicale dans les établissements hospitaliers à travers le monde.

Dans le contexte de la pandémie de COVID-19, des modifications significatives des protocoles chirurgicaux ont été suggérées par (Brindle, M. E. et al, 2020) ainsi que par le COVIDSurg Collaborative (Al-Jabir, A. et al, 2020). Ces modifications visent à garantir la sécurité des interventions chirurgicales à l'échelle mondiale. Les domaines clés identifiés pour ces modifications sont les suivants :

- ✚ Élaborer une stratégie d'intervention chirurgicale pandémique pour répondre à l'évolution rapide de la situation, y compris le report des interventions non essentielles, la conversion des blocs opératoires en unités de soins intensifs et l'adaptation des procédures opératoires.
- ✚ Concevoir un plan d'action basé sur la collaboration d'équipe pour assurer la continuité des services chirurgicaux d'urgence pendant la pandémie.
- ✚ Assurer la formation du personnel sur l'utilisation de l'équipement de protection individuelle (EPI) et sur la gestion du COVID-19 pour garantir la sécurité des interventions chirurgicales pendant la pandémie.
- ✚ Identifier et gérer les cas de COVID-19 tout en minimisant l'exposition du personnel de santé.
- ✚ Aménager un espace opératoire spécifique pour le COVID-19 dans le cadre d'une réponse hospitalière plus large.

3.2.2 Impact sur le plan mondial

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a déclaré la maladie à coronavirus comme une urgence de santé publique internationale le 30 janvier 2020 (Neher, R. A. et al, 2020), (Wang, C. et al, 2020) et (OMS, 2020). Le 12 février 2020, l'OMS a officiellement désigné la maladie causée par ce nouveau coronavirus comme "Maladie à coronavirus 2019 (COVID-19)" (Roosa, K. et al, 2020). Le 29 février 2020, 53 pays avaient signalé des épidémies de COVID-19 ; celle-ci a été considérée comme une pandémie à partir du 11 mars 2020 (Huang Y. S. et al, 2020) et (Bracey T. et al, 2021). Depuis le

début de la pandémie de COVID-19, le monde a été confronté à d'importants défis sur les plans politique, économique et sanitaire (Ntumba J. M., et al, 2020). Cette pandémie se distingue par son envergure, la rapidité de sa propagation, l'absence de données scientifiques préexistantes et l'ampleur de la couverture médiatique (Peiffer-Smadja N. et al, 2020).

L'analyse des crises mondiales passées a souligné la nécessité de disposer de systèmes de santé résistants, capables d'identifier et de répondre aux crises sociétales (Gilson L. et al, 2017). La résilience d'un système de santé est définie comme "la capacité des acteurs de la santé, des institutions et des populations à se préparer et à répondre efficacement aux crises, à maintenir les fonctions essentielles lorsqu'une crise survient et à se réorganiser en fonction des leçons apprises pendant la crise, si les circonstances l'exigent" (Kruk M. E. et al, 2015).

Dans le contexte d'une urgence de santé publique, il peut être complexe de déterminer si les structures de soins de santé agissent de manière efficace, appropriée et opportune (Olu O., 2017). Il est donc pertinent d'analyser comment les hôpitaux de divers pays ont adapté leur fonctionnement en temps de crise, afin de fournir des services de soins optimaux à la population (Chabrol, F. et al, 2019), (Fallah-Aliabadi S. et al, 2020) et (Iyengar K. et al, 2020).

Dans les pays à revenu faible et intermédiaire, les systèmes de santé ont dû faire face à de nombreux défis, notamment des performances insuffisantes, une réactivité limitée et une capacité de résilience réduite (Dye C. et al, 2013). À diverses étapes de la pandémie de COVID-19, ces systèmes de santé n'ont pas réussi à répondre rapidement aux besoins de la population en matière de tests de laboratoire, d'équipements de protection individuelle, de traitements et de vaccins, ainsi qu'à d'autres demandes de soins (Ridde V. et al, 2021).

Dans le contexte hospitalier, la crise sanitaire due au COVID-19 a engendré une pression considérable sur les ressources, une réorganisation de l'offre de soins et une mobilisation des professionnels de santé dans un environnement incertain (Begun, J. W. et al, 2020), (Riou B., 2020), (Dumez H. et al, 2020), (El-Hage W. et al, 2020), (Cohen J. et al, 2020) et (Wang C et al, 2020). Les hôpitaux ont dû faire face à une multitude de défis, notamment la gestion des afflux massifs de patients, une surmortalité, la déprogrammation de leurs activités habituelles, la réorganisation des services de soins, afin de prévenir la propagation de la pandémie aux patients et aux professionnels de santé (Begun, J. W. et al, 2020), (Barro K. et al, 2020) et (Messekher M. et al, 2021).

Dans le contexte de la crise sanitaire, des mesures rapides ont été prises pour augmenter la capacité de réponse du système de santé. Cela comprenait l'installation de tests de dépistage rapide sur site, l'expansion de la capacité en lits, le renforcement du personnel médical et infirmier, ainsi que le report des interventions chirurgicales non urgentes (Begun, J. W. et al, 2020). De plus, les activités de rééducation ont été suspendues. Cependant, cette restructuration organisationnelle a dû faire face à plusieurs défis. Parmi ceux-ci, on peut citer la pénurie préexistante de ressources humaines, la nécessité de mobiliser des ressources financières, des problèmes structurels dans la chaîne d'approvisionnement (Ridde V. et al, 2021) et une utilisation excessive des unités de soins intensifs (Carinci F., 2020), (Spina S. et al, 2020).

L'implication professionnelle a joué un rôle crucial en facilitant la résilience pendant la crise. La flexibilité organisationnelle des bureaucraties professionnelles a été rendue possible grâce à l'engagement volontaire du personnel de santé (El-Hage W. et al, 2020). Ces individus ont relevé le défi et ont acquis de nouvelles compétences, comme la polyvalence des médecins et des infirmiers dans le traitement de cette pandémie, ainsi que le développement de stratégies de communication adaptées à ce nouvel environnement (Iyengar K. et al, 2020). La communication a joué un rôle essentiel dans le renforcement de la résilience organisationnelle, facilitant la coordination pendant la

crise de Covid-19. Plusieurs chercheurs mettent en avant l'importance de la communication interne et externe dans la gestion de la crise et dans le renforcement de la résilience (Begun J. W. et al, 2020).

Des recherches ont révélé que les hôpitaux ont dû restructurer leurs services pour gérer l'afflux massif de patients atteints de COVID-19. Cette augmentation de la charge de travail due à la pandémie a entraîné une réorganisation profonde, massive et rapide des activités cliniques et chirurgicales. L'objectif était d'assurer la continuité des soins, de mettre en place des mesures pour prévenir la transmission virale et de protéger les patients et le personnel. Comme mentionné dans d'autres études (El-Hage W. et al, 2020), (Zangrillo A. et al, 2020), cette réorganisation a impliqué la création de services exclusivement dédiés au COVID-19.

Comme l'ont démontré diverses études (Ridde V. et al, 2021), (Begun J. W. et al, 2020), (Carinci F., 2020) et (Lodha R. et al, 2020), la capacité limitée en lits a représenté un obstacle majeur à la réponse hospitalière pendant la pandémie de COVID-19, affectant ainsi la résilience organisationnelle. De plus, ces chercheurs ont constaté que cette capacité en soins intensifs était restreinte partout. Même les pays hautement industrialisés ont dû faire face à une pénurie de lits de soins intensifs en raison de l'augmentation soudaine du nombre de cas de patients infectés par le COVID-19. Certains auteurs confirment que, dans les crises actuelles, il est probable qu'il y aura un écart considérable entre la demande et la disponibilité des lits d'hôpitaux (Ridde V. et al, 2021), (Begun J. W. et al, 2020), (Carinci F., 2020) et (Lodha R. et al, 2020).

Selon plusieurs études (Barro K. et al, 2020), (Zangrillo A. et al, 2020), (De Filippis G. et al, 2020), (Willan J. et al, 2020) et (Daniels C. E. et al, 2020), la réponse des hôpitaux à la pandémie de COVID-19 a nécessité une déprogrammation massive, une diminution et/ou une cessation immédiate de certaines activités hospitalières. Cela comprenait la suspension de la majorité des activités pouvant être reportées (Tableau 3.1). Cette restructuration a eu des conséquences sur la performance hospitalière, ainsi que sur le traitement des patients souffrant d'autres maladies que le COVID-19.

Tableau 3.1 : Proportion des suspensions complète des chirurgies programmées dans le monde
(Angelliaume A. et al, 2023)

Pays	Pourcentage d'arrêt
Inde (Sahu D et al, 2020)	97%
Etats-unis (Navarro RA et al, 2020) et (Sarac NJ et al, 2020)	72%
Allemagne / Autriche / Suisse (Liebensteiner MC et al, 2020)	70 à 93%
Suède (Lindeman R-J et al, 2020)	50%
Italie (D'Apolito R et al, 2020)	100%
Singapour et Malaisie (Tay K et al, 2020)	100%
Iran (Askari A et al, 2020)	
Governmental health care	100%
Orthopaedics clinics	0%
Japan (Athey AG et al, 2020)	0%

Tous ces éléments et facteurs nouvellement et rapidement émergeants suite à la pandémie COVID-19, ont influencé négativement le déroulement et la fluidité de l'activité globale des structures hospitalières. En particulier, la réalisation du processus des blocs opératoires y compris; et en partie considérable ; la planification et l'ordonnancement des interventions chirurgicales. Ce qui a confronté les gestionnaires des blocs opératoires avec de complexes difficultés organisationnelles et a engendré des répercussions graves sur la qualité de vie du personnel soignant, ainsi que sur la qualité des prestations de soins prodiguées aux patients.

3.2.3 Impact sur le plan national

En réponse à l'émergence du virus SARS-CoV-2, responsable de la pandémie de COVID-19 qui a touché le Maroc à partir du 2 mars 2020, les autorités marocaines ont adopté une stratégie proactive. Face à la gravité de la situation sanitaire, une mesure de confinement de la population a été mise en place dès le 16 mars 2020 (Portail officiel du Coronavirus au Maroc, www.covidmaroc.ma).

Par ailleurs, le gouvernement a pris la décision d'implanter des hôpitaux militaires afin de compléter les infrastructures sanitaires existantes, notamment en termes de salles de réanimation et de lits. De plus, un effort a été fait pour doter ces structures de matériel médical et sanitaire importé (Abdelaaziz Ait Ali et al., 2020).

Face à la situation épidémiologique préoccupante, le Ministère de la Santé a opté pour une suspension immédiate de toutes les activités non urgentes, y compris les interventions chirurgicales programmées et les consultations. L'objectif était de se focaliser principalement sur les urgences vitales, permettant ainsi de conserver les ressources et l'énergie nécessaires pour combattre cette crise sanitaire et de restreindre les déplacements des individus.

Plusieurs sociétés savantes nationales ont mis en place divers protocoles et recommandations pour le traitement des patients durant la pandémie de COVID-19. L'adhésion à ces directives est impérative pour garantir la continuité des soins au Maroc. Parmi ces sociétés, citons la Société Marocaine de Chirurgie Thoracique (SMCT) et la Société Marocaine de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique (SMACOT). Ces dernières ont appelé tous les orthopédistes et chirurgiens thoraciques à se conformer à cette décision et à se mettre au service de la population (site officiel de la SMACOT) et (Bouchikh, M. et al., 2020).

Au service de chirurgie orthopédique B4 du CHU Hassan II-Fès, les interventions orthopédiques programmées ont été graduellement différées jusqu'à une cessation complète de l'activité ambulatoire. Cette mesure était en accord avec les recommandations visant à permettre à l'ensemble du personnel soignant de se consacrer à la prise en charge des patients atteints de COVID-19. Les équipes médicales et paramédicales ont été réquisitionnées pour s'occuper des patients en soins intensifs, tout en maintenant une activité chirurgicale limitée aux cas les plus urgents (Abdelaaziz Ait Ali et al., 2020). Les contraintes imposées par cette crise sanitaire sont inédites, en raison de la vitesse de propagation du virus et de l'absence de données scientifiques préalables (Shimizu. K, 2020) et (Heymann et al., 2020). Il est donc pertinent d'évaluer l'impact de la crise sanitaire lors de son pic épidémique sur la diminution de l'activité chirurgicale globale, afin de tirer des enseignements utiles pour faire face à d'éventuelles situations critiques futures.

3.2.4 Impact direct sur les ressources humaines de santé au Maroc

3.2.4.1 Etude national transversale, descriptive et analytique

Depuis l'apparition de la pandémie de COVID-19, les professionnels de santé impliqués dans les unités de veille sanitaire (COVID-19) au Maroc ont subi une surcharge et une perturbation de leurs

horaires de travail. Les jours de repos ont été annulés ou reportés et le temps de sommeil a été réduit. Ces changements ont eu des conséquences négatives importantes sur la qualité de vie physique et psychologique de toutes les catégories du personnel de santé, déjà en nombre insuffisant. Les premiers rapports des pays touchés par la pandémie soulignent la prévalence élevée de la charge psychologique et professionnelle chez les prestataires de soins de santé, en dehors du contexte des soins intensifs (Vignaud P. et al, 2020), (Lai, J. et al, 2020), (Azoulay E. et al, 2020) et (Rossi R. et al, 2020).

Une enquête à l'échelle nationale a été menée avec pour objectif principal de quantifier la prévalence du syndrome d'épuisement professionnel parmi les professionnels de la santé opérant dans les unités de surveillance épidémiologique COVID-19 au Maroc, ainsi que d'identifier les facteurs y étant associés (Kapasa R. L. et al, 2021). Les conclusions qui en ont été tirées sont les suivantes :

- ✚ Une grande partie des participants (70,4 %) avait plus de 40 ans, avec une prédominance féminine de 57,0 % (sexe-ratio : 1,32). La majorité était mariée (77,0 %) avec en moyenne deux enfants à charge. Les médecins constituaient la catégorie professionnelle la plus représentée (48,9 %), suivis des infirmiers (14,8 %), puis des professionnels d'appui (administrateurs, techniciens de statistiques, techniciens de radiologie et ambulanciers) à 18,5 %.
- ✚ Seuls 17,0 % des professionnels de santé étaient satisfaits des ressources fournies par les autorités sanitaires pour accomplir leurs tâches dans la lutte contre la pandémie de COVID-19, 22,2 % étaient satisfaits de la relation professionnelle avec leurs collègues et 14,1 % satisfaits de la relation professionnelle avec leurs supérieurs hiérarchiques.
- ✚ La majorité (84,44 %) des participants était en situation de burn-out. Un niveau sévère de burn-out a été observé chez 14,07 % des cas, un niveau modéré chez 16,29 % des cas et un niveau faible chez 54,07 % des cas, selon les dimensions ou phases pathologiques du burn-out, avec une moyenne de $24,2 \pm 8$ pour l'épuisement émotionnel (EE), $7,4 \pm 4$ pour la dépersonnalisation (DP) et $26,9 \pm 6$ pour l'accomplissement personnel (AP).
- ✚ 35,6 % des participants étaient en situation d'épuisement émotionnel (EE) élevé, 17 % présentaient un niveau élevé de dépersonnalisation (DP) et 85,9 % avaient un faible sentiment d'accomplissement personnel (AP).
- ✚ Les participants travaillant plus de 40 heures par semaine étaient les plus touchés par l'EE (43,9 %) et la DP (20,7 %).
- ✚ Parmi les facteurs sociodémographiques et professionnels, les facteurs ayant une signification statistique pour les trois dimensions du burn-out étaient le nombre de gardes par mois pendant la période COVID-19 ($p = 0,048$) ; le nombre d'heures de travail par semaine pendant la période COVID-19 ($p = 0,034$) ; le nombre d'heures de travail par jour pendant la période COVID-19 ($p = 0,007$) ; la durée d'occupation ($p = 0,007$) ; la satisfaction de la relation professionnelle avec les supérieurs hiérarchiques ($p = 0,003$) et la peur d'être contaminé par la COVID-19 ($p = 0,016$).

Ces résultats peuvent être attribués, d'une part, à la charge de travail qui a presque doublé, obligeant la majorité (61,7 %) des professionnels de santé à travailler plus d'heures (> 8 heures) par jour que d'habitude, plus de 40 heures par semaine et à effectuer plus de 10 gardes par mois. D'autre part, ils peuvent être dus à la pression exercée par leurs supérieurs hiérarchiques et à la crainte d'être contaminés par le virus et de le transmettre à leurs familles et à leur entourage. Plusieurs études précédemment publiées ont démontré que les facteurs mentionnés ci-dessus sont associés à

l'épuisement professionnel (El-Hage, W. et al, 2020), (Shanafelt, T. et al, 2020), (Ngalagou, P. M. et al, 2018), (Amamou, B. et al, 2014), (Nossi, A. T. et al, 2021) et (Zhang W. R. et al, 2020). Il a également été rapporté que la surcharge de travail due aux gardes entraîne une fatigue mentale supplémentaire, et ajoute un caractère anxiogène en renforçant la notion de responsabilité (Lacaze C., 2019).

3.2.4.2 Mesures préventives

Pour les professionnels de santé en première ligne et les responsables des unités de surveillance sanitaire spécifiques à la COVID-19, il est vivement recommandé d'adopter des stratégies préventives contre l'épuisement professionnel afin de minimiser le double fardeau psychologique et professionnel. Ces stratégies peuvent comprendre des interventions d'écoute active, un soutien psychologique et psychiatrique, une reconnaissance des efforts déployés et une motivation diversifiée (Kapasa R. L. et al, 2021). Il serait également bénéfique de mettre à leur disposition des installations pour le sport et la méditation, ainsi que des thérapies de groupe axées sur la discussion et l'expression à des fins préventives et thérapeutiques. L'instauration de mécanismes de coordination des actions et de gestion participative démocratique visant à fluidifier les relations avec la hiérarchie pourrait également contribuer à réduire les risques d'épuisement professionnel. En outre, les consultations en médecine du travail devraient être orientées vers la détection de maladies associées, telles que le diabète, l'hypertension artérielle et la dépression (Kapasa R. L. et al, 2021).

3.3 Etude d'un cas réel

3.3.1 Présentation du Service étudié

Notre étude a été menée au sein du service de chirurgie traumatologique et orthopédique B4, situé au quatrième étage du bâtiment « B » de l'hôpital des spécialités du CHU Hassan II de Fès.

Le service B4 du CHU Hassan II de Fès est spécialisé dans le traitement des affections osseuses, articulaires et musculaires de l'appareil locomoteur. Il joue également un rôle clé dans la formation théorique et pratique des étudiants en médecine, des internes du CHU Hassan II et des résidents en chirurgie traumatologique et orthopédique, que ce soit au sein du même CHU ou d'autres, dans le cadre de partenariats nationaux ou internationaux. L'admission dans le service peut être programmée ou urgente. Les interventions chirurgicales comprennent la chirurgie traumatologique, orthopédique et oncologique. De plus, des consultations spécialisées en traumatologie et en orthopédie sont proposées du lundi au vendredi sur rendez-vous préalable au centre de diagnostic du CHU Hassan II de Fès.

Le service B4 de chirurgie traumatologique et orthopédique du CHU Hassan II de Fès dispose de 28 lits. L'hospitalisation des patients est déterminée en fonction du diagnostic initial et de la durée prévue du séjour (court, moyen ou long). Le service comprend 02 chambres individuelles pour les séjours de courte durée et 07 chambres à deux lits pour les séjours de moyenne durée. Il comprend aussi 03 chambres à quatre lits pour les séjours de longue durée, des lits pour les hospitalisations d'urgence, une salle de soins, 12 salles de bain pour les patients, une salle de repos pour les médecins et une salle de repos pour les infirmiers (site officiel du CHU Hassan II de Fès).

En ce qui concerne le bloc opératoire, le service dispose de trois salles opératoires. Une salle est dédiée aux patients programmés et une autre à la chirurgie ambulatoire. Ces deux salles sont opérationnelles du lundi au vendredi de 8h30 à 16h30. Une troisième salle est réservée aux urgences traumatologiques et orthopédiques, et elle est opérationnelle 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.

3.3.2 Analyse de l'impact de la pandémie COVID-19 sur l'activité opératoire globale du service étudié

3.3.2.1 Les catégories chirurgicales effectuées

Au sein du service B4 de chirurgie traumatologique et orthopédique du Centre Hospitalier Universitaire Hassan II de Fès, une variété de procédures chirurgicales est effectuée. Cela comprend les interventions sur la hanche et le genou, la ligamentoplastie du genou, ainsi que les interventions pour les traumatismes des membres supérieurs et inférieurs. De plus, des opérations spécifiques à la main, à la cheville et au pied sont également réalisées. Le service traite également les tumeurs bénignes et malignes des tissus mous, ainsi que les tumeurs osseuses. Les luxations sont également prises en charge, ainsi que d'autres interventions telles que l'exploration des plaies et le traitement des infections. (Tableau 3.2 pour plus de détails)

Tableau 3.2 : Distribution de la durée d'intervention pour toutes les catégories chirurgicales (Soualfi, O. H. et al, 2022)

Catégories chirurgicales	Principales indications chirurgicales	Moyenne globale (Mg) de la durée de l'intervention (heure) Moyenne (min ; max)
Groupe 1		Mg <2
Chirurgie de la main	Ostéosynthèse de fractures	1 (0,5 ; 1,5)
Chirurgie des tumeurs bénignes des tissus mous	Excision de lipomes et de kystes	1 (0,5 ; 1,5)
Traitement des luxations	Réduction orthopédique	0,75 (0,75 ; 1)
Groupe 2		2 ≤ Mg ≤ 2,5
Chirurgie du genou	Arthroplastie totale du genou, Ostéotomie de valgisation	2,25 (2 ; 2,5)
Ligamentoplastie du genou	Arthroscopie du genou, Chirurgie ouverte	2,25 (2 ; 2,5)
Chirurgie des traumatismes du membre supérieur	Ostéosynthèse de fractures	2,25 (2 ; 2,5)
Chirurgie de la cheville et du pied	Ostéosynthèse de fractures, Chirurgie de l'hallux valgus	2,25 (2 ; 2,5)
Chirurgie des tumeurs malignes des tissus mous	Biopsie, résection, amputation	2,25 (2 ; 2,5)
Autres chirurgies	Exploration des plaies, infections	2,25 (2 ; 2,5)
Groupe 3		Mg >2,5
Chirurgie de la hanche	Prothèse totale de hanche, Prothèse intermédiaire de hanche	3,25 (2,75 ; 3,75)
Chirurgie des traumatismes des membres inférieurs	Ostéosynthèse de fractures	3,125 (2,75 ; 3,5)
Chirurgie des tumeurs osseuses	Biopsie, résection, amputation + / - : Remplacement prothétique (genou), Ostéosynthèse	3,25 (2,75 ; 3,75)

3.3.2.2 Analyse de la variation de l'activité chirurgicale entre 2019 et 2020

Au cours de l'année 2019, un total de 1022 interventions de traumatologie et d'orthopédie ont été effectuées chez les adultes, comparativement à 551 en 2020, ce qui représente une réduction globale de l'activité de 46% (Tableau 3.3). La chirurgie traumatologique a connu une baisse de 34% (607 en 2019 contre 403 en 2020). L'activité d'hospitalisation d'urgence a diminué de 49% (387 en 2019 contre 198 en 2020). L'activité de chirurgie ambulatoire a connu une réduction de 64% en 2020 par rapport à 2019. L'activité de chirurgie oncologique a connu une réduction de 72% sur la même période (tableau 3). En 2019, l'activité orthopédique représentait 32% de l'activité totale, contre 22% en 2020 ($p < 0,005$).

Les baisses d'activité les plus marquées pour la chirurgie traumatologique concernent les chirurgies de la main, des membres inférieurs et des membres supérieurs (respectivement 42%, 34% et 34%) (Tableau 3.3). Le nombre de prothèses totales et intermédiaires de hanche a diminué de 60% (200 en 2019 contre 80 en 2020). Les ligamentoplasties du genou ont diminué de 78% (18 en 2019 contre 4 en 2020) (Tableau 3.3). Pour l'activité de chirurgie oncologique, on observe une réduction de près de 70% du nombre de patients opérés pour des tumeurs osseuses malignes ou bénignes (Tableau 3.3).

La réduction de l'activité est significativement plus importante pour la chirurgie non oncologique (ratio oncologie/non oncologie : 0,09 en 2019 et 0,05 en 2020 ($p < 0,005$)). En 2019, l'activité ambulatoire représentait 16% de l'activité totale, contre 10% en 2020 ($p < 0,005$).

Tableau 3.3 : Impact de la pandémie de COVID-19 sur l'activité chirurgicale globale
(Soualfi, O. H. et al, 2022)

	Nombre de patients (2019)	Nombre de patients (2020)	Variation (%)
Selon les procédures chirurgicales			
Chirurgie traumatologique	607	403	-34
Chirurgie orthopédique	325	123	-62
Chirurgie oncologique	90	25	-72
Total	1022	551	-46
Selon le type d'hospitalisation			
Hospitalisation planifiée	635	353	-44
• Ambulatoire	164	59	-64
• Conventionnelle	471	294	-36
Hospitalisation urgente	387	198	-49
Total	1022	551	-46
Selon le type de chirurgie			
Chirurgie de la hanche	200	80	-60
Chirurgie du genou	93	37	-60
Ligamentoplastie du genou	18	4	-78
Chirurgie traumatologique du membre supérieur	273	180	-34
Chirurgie traumatologique du membre inférieur	218	143	-34
Chirurgie de la main	33	19	-42
Chirurgie de la cheville et du pied	47	32	-32
Chirurgie des tumeurs bénignes des tissus mous	39	12	-69
Chirurgie des tumeurs malignes des tissus mous	31	7	-77
Chirurgie des tumeurs osseuses	20	6	-70
Traitement des luxations	28	19	-32
Autres interventions	22	12	-45
Total	1022	551	-46

Les courbes d'évolution illustrant la progression mensuelle des interventions chirurgicales indiquent une baisse de l'activité totale en 2020 par rapport à 2019. Cette réduction commence de manière significative après la période de confinement (aucun patient n'a été opéré en avril 2020), puis se stabilise entre 24 et 54 interventions par mois (Figure 3.1).

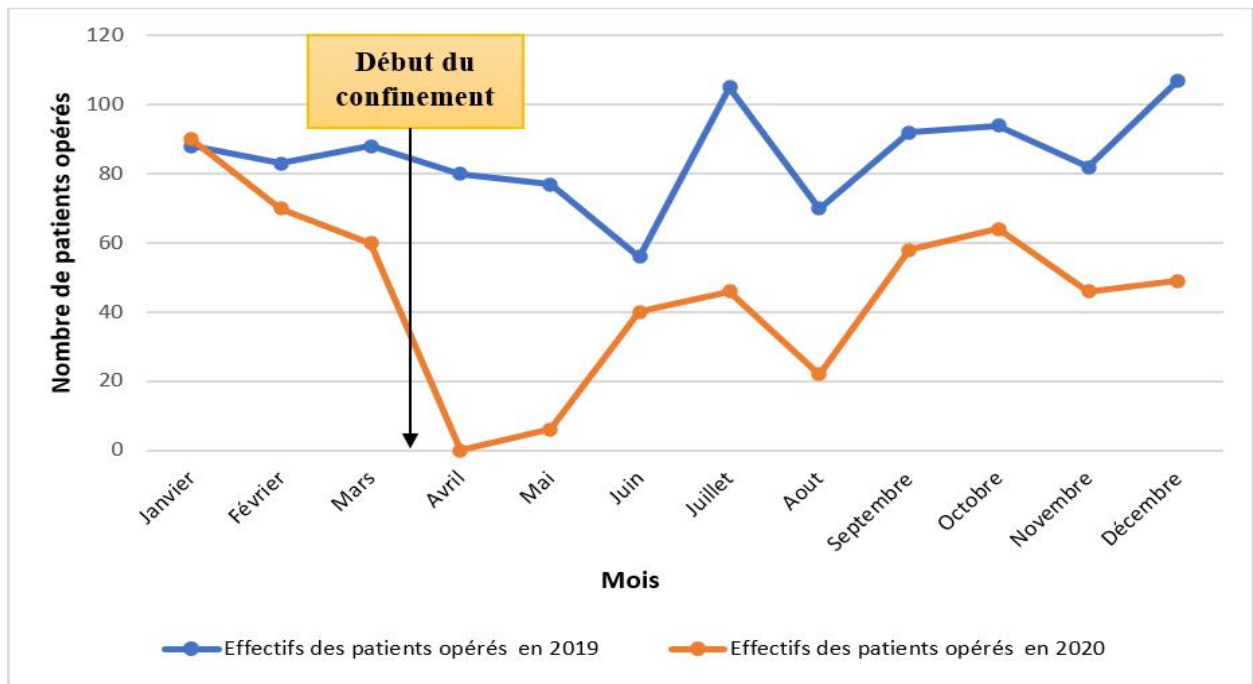


Figure 3.1 : Impact de la pandémie COVID-19 sur l'activité chirurgicale mensuelle du service étudié (Soualfi, O. H. et al, 2022).

3.3.2.3 Estimation des heures opératoires à reprogrammer

Dans l'ensemble, une divergence de 471 procédures a été notée entre 2019 et 2020. En se basant sur la durée moyenne globale des interventions pour chaque catégorie, on arrive à un total d'environ 1195 heures de chirurgie à reprogrammer (Tableau 3.4). Les volumes opératoires les plus conséquents concernent la chirurgie de la hanche, la chirurgie traumatologique des membres inférieurs et supérieurs (respectivement 390, 234 et 209 heures). En prenant en compte une durée d'occupation de la salle d'opération pendant une journée d'opération équivalente à 8 heures (8h30-16h30), cela équivaut à environ 149 journée opératoire.

Tableau 3.4 : Estimation du nombre d'heures d'opération à reprogrammer (Soualfi, O. H. et al, 2022).

Catégories chirurgicales	Moyenne globale de la durée de l'intervention (heures) Dt	Nombre de patients (2019) A	Nombre de patients (2020) B	Nombre des interventions à reprogrammer C=A-B	Heures opératoires à reprogrammer par catégorie (heures) Dt*C
Chirurgie de la hanche	3,25	200	80	120	390
Chirurgie du genou	2,25	93	37	56	126
Ligamentoplastie du genou	2,25	18	4	14	31,5
Chirurgie traumatologique du membre supérieur	2,25	273	180	93	209,25
Chirurgie traumatologique du membre inférieur	3,125	218	143	75	234,375
Chirurgie de la main	1	33	19	14	14
Chirurgie de la cheville et du pied	2,25	47	32	15	33,75
Chirurgie des tumeurs bénignes des tissus mous	1	39	12	27	27
Chirurgie des tumeurs malignes des tissus mous	2,25	31	7	24	54
Chirurgie des tumeurs osseuses	3,25	20	6	14	45,5
Traitement des luxations	0,75	28	19	9	6,75
Autres	2,25	22	12	10	22,5
Total				471	1194,625

3.3.3 Discussion

Cette étude nous offre une évaluation objective et quantitative de l'impact de la pandémie de COVID-19 sur la planification et la programmation des blocs opératoires, ainsi que sur le nombre d'interventions reportées à la suite de cette crise sanitaire. Nous avons également tiré des enseignements qui nous seront utiles face à des situations similaires à l'avenir. Pour répondre à cette situation critique, le Maroc a dû procéder à une restructuration complète de l'activité chirurgicale non urgente (Abdelaaziz Ait Ali et al, 2020). La décision de reporter toutes les chirurgies électives a entraîné une réduction drastique du volume opératoire et de l'offre de soins dans toutes les disciplines chirurgicales, en particulier en traumatologie et orthopédie. La réorientation de l'activité hospitalière au profit des patients atteints de COVID-19 a clairement influencé l'activité normale de traumatologie, d'orthopédie et de chirurgie tumorale, et en grande partie l'activité des urgences. Selon certains auteurs, le nombre de patients opérés a été significativement réduit : 194 patients ont été inclus en 2020, soit une incidence de 57 pour 100000 habitants contre 772 patients inclus en 2019, soit une incidence de 227 pour 100000 habitants ; $p < 0,001$ (Allia et al, 2021). La chirurgie orthopédique programmée a diminué, passant d'un taux d'incidence de 147 en 2019 à 5 en 2020 pour 100000 habitants ($p < 0,001$) (Allia et al, 2021). La chirurgie traumatologique est passée d'un taux d'incidence de 80 en 2019 à 50 en 2020 pour 100000 habitants ($p : NS$) (Allia et al, 2021). Selon d'autres chercheurs, en 2020, une diminution de 35% du nombre de consultations urgentes pour des lésions traumatiques de la main ou du poignet a été observée par rapport à 2019 (Buffet. A et al, 2022).

Au sein du département de chirurgie traumatologique et orthopédique B4 du CHU Hassan II, nous avons constaté une diminution significative et notable de l'activité opératoire globale, touchant tous les aspects des services de soins fournis aux patients (oncologie, traumatologie, orthopédie, ainsi que la chirurgie programmée, ambulatoire ou urgente), ce qui est conforme aux données de la littérature déjà mentionnées.

Depuis le début de cette pandémie de COVID-19, les professionnels de la santé faisant partie des unités de veille sanitaire (COVID-19) au Maroc ont vu leurs horaires de travail doubler, les jours de congé reportés et le nombre d'heures de sommeil réduites. Les rapports préliminaires des pays touchés au début de la pandémie soulignent la prévalence élevée du fardeau psychologique et professionnel parmi les prestataires de soins de santé en dehors du cadre des soins intensifs (Kapasa, R. L. et al, 2021).

La mise en évidence de l'impact de la pandémie de COVID-19 sur les différentes activités chirurgicales est d'un grand intérêt pour l'évaluation de la situation actuelle et pour faire face à d'éventuelles situations de stress liées à une crise sanitaire pouvant affecter tout système de soins de santé, que ce soit au niveau national ou international.

3.3.4 Limites de l'étude

Cette recherche présente des contraintes spécifiques, y compris la diversité des participants atteints de maladies distinctes qui présentent des symptômes cliniques variés. De plus, la morbidité et la mortalité diffèrent entre les affections traumatiques, orthopédiques et tumorales, ce qui peut influencer la décision de consulter. Par ailleurs, plusieurs chirurgiens du même département ont participé à l'étude, tous spécialisés et expérimentés dans le traitement de ces patients. L'aspect rétrospectif de l'étude peut avoir introduit des biais dus à l'absence d'informations détaillées sur l'échantillon qui pourraient expliquer la diminution de l'activité (peur d'une contamination nosocomiale, infection par le COVID-19, choix d'une autre structure de soins, décès...) (Soualfi, O. H. et al, 2022).

Cependant, cette étude a également des atouts significatifs, notamment la taille conséquente de l'échantillon (1022 en 2019 contre 551 en 2020), l'examen complet de tous les registres informatisés mensuels, la période d'analyse s'étendant sur deux ans (2019 et 2020) et la comparaison de plusieurs activités du département (orthopédique, traumatologique, oncologique, programmée, ambulatoire, urgente) (Soualfi, O. H. et al, 2022).

3.4 Leçons apprises pour faire face à des situations critiques similaires

3.4.1 Dans un contexte global

L'histoire nous enseigne que les approches de lutte contre les maladies telles que le COVID-19 doivent être endogènes, c'est-à-dire qu'elles doivent s'appuyer sur les compétences culturelles, socio-économiques et environnementales locales. La pérennité des solutions proposées en dépend, car l'équité sociale, l'acceptation des mesures par la population et la viabilité de l'environnement dans lequel évoluent les différents acteurs sont essentielles au succès des initiatives. De plus, les décisions doivent reposer sur des bases scientifiques solides et objectives, bien que cette exigence puisse souvent être difficile à concilier avec les mesures politiques. Par conséquent, un dialogue entre les décideurs politiques et les scientifiques est essentiel avant toute décision concernant la santé publique (Corral-Broto P. et al, 2020).

New York City, une métropole compacte de seulement 302 miles carrés, a été le point focal de la pandémie de COVID-19 aux États-Unis en mars 2020. Au 15 juin 2021, elle a enregistré 33 359 décès et 109 192 hospitalisations liés au COVID-19 (Wei EK et al, 2021). En se basant sur le plus grand système hospitalier municipal du pays, plusieurs enseignements ont été tirés qui pourraient être utilisés pour améliorer les soins hospitaliers à l'avenir (Wei EK et al, 2021). D'autres chercheurs (GUERCI et al, 2020) ont également tiré des leçons de l'épidémie initiale à Wuhan. Dans un monde globalisé, toute épidémie peut se propager facilement par un simple vol d'avion. Si nous avions eu la possibilité de revenir en arrière, nous aurions dû mettre en œuvre ces recommandations plus tôt.

De plus, il aurait été bénéfique d'identifier immédiatement des centres de référence spécifiques à chaque pathologie afin de maintenir des zones et des hôpitaux "propres" (GUERCI et al, 2020). Il est également important de ne pas négliger la détresse psychologique que les médecins peuvent ressentir lors d'une situation d'urgence liée au coronavirus. C'est pourquoi un soutien psychosocial a été mis en place pour le personnel de santé. Il s'agit d'une mesure très importante, que nous suggérons de mettre en œuvre et de préparer complètement (GUERCI et al, 2020).

Des scientifiques ont conçu un schéma détaillant les phases et les acteurs impliqués dans la gestion des cas de COVID-19 dans les salles d'opération. Les patients doivent être pris en charge dans le bloc opératoire en modifiant le flux habituel de patients. Cette modification est nécessaire pour minimiser le risque de propagation et en raison de la réaffectation de la zone habituelle de récupération post-opératoire.

3.4.2 Dans le cadre de notre étude

En se basant sur les informations recueillies lors de notre expérience de la pandémie de COVID-19 et les résultats de notre recherche, nous sommes d'avis que malgré le coût élevé de cette crise sanitaire, nous avons acquis plusieurs enseignements qui, à notre avis, seront bénéfiques dans les situations d'urgence futures (Oumaima Hajji Soualfi et al, 2022) :

- Chaque établissement de santé devrait avoir un plan d'urgence stratégique, adapté à sa position dans le système de santé global, à mettre en œuvre en cas de crise, idéalement dans le cadre des directives d'une politique nationale de santé bien définie.
- Pour le personnel de santé, il est essentiel de garantir un environnement de travail approprié en termes de protection, sans oublier de renforcer les ressources humaines et matérielles si nécessaire.
- Nous soulignons l'importance d'un parcours COVID-19 sécurisé bien défini et bien équipé pour contrôler la contamination.
- Nous suggérons de mobiliser le personnel de santé dans les services où l'activité chirurgicale est la plus urgente, ou dans ceux où les listes d'attente sont longues.
- En ce qui concerne les patients en traumatologie et orthopédie, nous estimons qu'il est crucial, si les conditions le permettent, de continuer à opérer pendant la crise :
 - ◆ Les patients programmés avec un temps opératoire moyen global de moins d'une heure afin de réduire les listes d'attente,
 - ◆ Les patients atteints d'une pathologie osseuse tumorale maligne pour éviter toute aggravation secondaire pouvant compromettre le pronostic vital,
 - ◆ Et les urgences traumatologiques et orthopédiques, préservant ainsi le pronostic vital et fonctionnel de ces patients.
- La reprogrammation des journées chirurgicales à réaliser doit prendre en compte :
 - ◆ Le degré d'urgence de chaque patient,
 - ◆ Le statut vaccinal contre le COVID-19 des patients (il est préférable de commencer par les patients vaccinés pour éviter les récidives),
 - ◆ Le type de pathologie (oncologique/non-oncologique),
 - ◆ Et les nouveaux patients.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence l'impact de la pandémie COVID-19 sur l'offre de soins assurée par les blocs opératoires sur le plan mondial, ainsi que sur le plan national. En effet, nous avons mis le point sur l'activité chirurgicale globale du service étudié au cours de l'année 2020 par rapport à l'année 2019, qui a diminué de manière significative.

Pour faire face à cette crise sanitaire, plusieurs enseignements ont été tirés sur le plan international et national. La planification des procédures chirurgicales à reprogrammer constitue un défi pour les responsables des blocs opératoires. Elle nécessite une évaluation du nombre de patients en attente d'intervention, de leurs caractéristiques et du degré d'urgence de l'intervention, sans influencer à contre-courant la fluidité du programme opératoire normal. Ceci pourrait être facilité grâce à des outils de l'intelligence artificielle distribuée, permettant l'optimisation du programme opératoire.

Chapitre 4

L'intelligence artificielle distribuée au service de la planification des blocs opératoires

Chapitre 4

L'intelligence artificielle distribuée au service de la planification des blocs opératoires

4.1 Introduction

L'intelligence artificielle distribuée a émergé dans les années 80 pour compléter les approches traditionnelles de l'IA. Elle consiste en un ensemble d'entités distribuées ou d'agents qui interagissent entre eux pour atteindre un objectif. Ces agents peuvent ne pas être intelligents, auquel cas l'intelligence émerge de leurs interactions. Alternativement, ils peuvent être intelligents.

Dans cette section, nous explorerons diverses définitions relatives à la notion d'agent, une terminologie dont l'interprétation continue d'évoluer en raison de son incorporation dans divers champs de recherche. Nous examinerons également les différentes catégories d'agents et leurs attributs distinctifs. Par la suite, nous aborderons les systèmes multi-agents, en mettant l'accent sur les mécanismes d'interaction entre les agents et les modes de communication. Nous présenterons ensuite les architectures des systèmes multi-agents, leurs domaines d'application et les plateformes de développement. Nous mettons l'accent sur la plateforme JADE qui sera utilisé pour modéliser notre processus réel du service étudié. En conclusion, nous discuterons la planification multi-agents pour résoudre le problème de la gestion des blocs opératoires.

4.2 Historique des méthodes de programmation

Dans la Figure 4.1, nous présentons un aperçu des méthodes de planification en fonction de leur séquence temporelle.

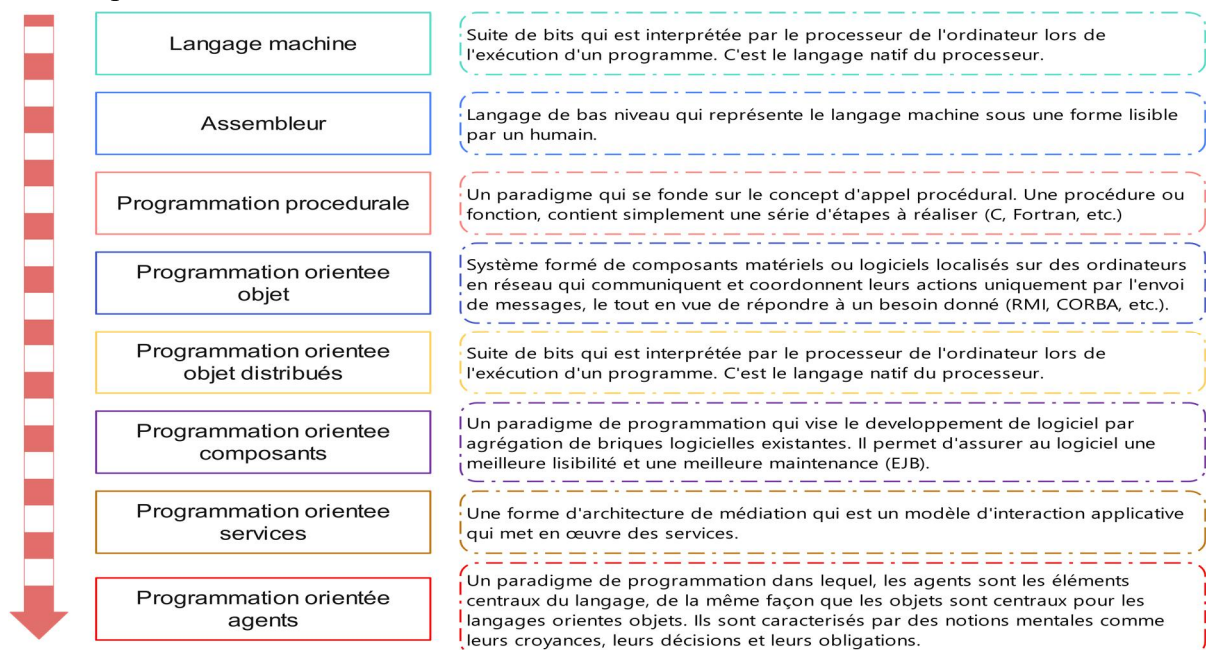


Figure 4.1 : Historique des méthodes de programmation

4.3 L'intelligence artificielle distribuée

L'expansion des champs d'exploitation de l'Intelligence Artificielle (IA) englobant des secteurs diversifiés et sophistiqués tels que le soutien à la prise de décision, l'identification et l'interprétation des motifs, la gestion des processus industriels, etc., a révélé les contraintes de la méthode traditionnelle de l'IA qui repose sur une concentration de l'expertise dans un système unique.

Les recherches initiées au début des années 70 sur la compétition et la distribution ont conduit à l'émergence d'un nouveau domaine : l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD). L'IAD vise à pallier les lacunes de la méthode traditionnelle de l'IA en favorisant la répartition de l'expertise parmi un ensemble d'agents capables d'opérer et d'agir dans un environnement commun tout en résolvant les conflits potentiels. Cela a conduit à l'apparition de nouveaux concepts en IA, tels que la coopération, la coordination d'action, la négociation et l'émergence (Labidi et Lejouad, 1993).

L'IAD peut être caractérisée comme le secteur de l'IA qui se consacre à la modélisation du comportement « intelligent » par le biais de la collaboration entre un groupe d'agents (Labidi et Lejouad, 1993).

Les défis à relever dans le domaine de l'IAD peuvent être classés en deux catégories (Labidi et Lejouad, 1993) :

- La première englobe les problèmes traditionnels de l'IA qui ont acquis une nouvelle dimension dans le contexte multi-agents.
- La seconde comprend les nouveaux défis spécifiquement associés au domaine de l'IAD.

Dans la première catégorie, on peut mentionner :

- ✚ La modélisation de la connaissance et la question de sa distribution parmi les différents agents.
- ✚ Les défis liés à la génération de plans d'action où la présence d'autres agents doit être prise en compte.
- ✚ La gestion des conflits entre les agents et le maintien de la cohérence des décisions et des plans d'action.
- ✚ Le problème de la communication entre les agents.

Les problèmes de la seconde catégorie peuvent être subdivisés en deux :

- ✚ Les problèmes spécifiques aux ensembles d'agents, qui concernent l'organisation, l'architecture de l'ensemble des agents et les paradigmes de coopération et d'action.
- ✚ Les problèmes liés au comportement d'un agent au sein d'un groupe. On s'intéresse aux capacités sociales d'un agent : la répartition des tâches, le partage des ressources et le raisonnement sur les autres agents.

En effet, à l'inverse de l'intelligence artificielle traditionnelle (IA) qui vise à modéliser/simuler le comportement "intelligent" d'un agent unique, l'IAD se concentre sur les comportements intelligents qui sont le "produit" de l'activité coopérative de plusieurs agents. À cet égard, on peut mentionner les travaux qui ont été menés dans les années 1980 autour des systèmes multi-experts, des systèmes à base de tableaux noirs (blackboard systems), etc. En somme, l'IAD visait (El Fallah-Seghrouchni. A. et Briot. J. P., 2009) :

- ✚ Une structuration et une organisation optimisées des connaissances factuelles et opératoires ;
- ✚ La conversion d'un ensemble d'expertises en une forme unifiée, c'est-à-dire la gestion de la diversité et l'intégration de plusieurs perspectives.

La répartition de l'expertise sur un ensemble d'entités qui communiquent pour atteindre un objectif global peut se faire de deux manières (El Fallah-Seghrouchni. A. et Briot. J. P., 2009) :

- Une distribution descendante : elle consiste à décomposer le problème en sous-problèmes et à les attribuer aux différentes entités. Cependant, cette hypothèse n'est pas toujours facile à mettre en œuvre car de nombreux problèmes ne peuvent pas être partitionnés.
- Une distribution ascendante : l'accomplissement d'un objectif global nécessite la synergie (connaissances, compétences, expertises, etc.) de plusieurs entités. Dans ce cas, il est nécessaire de gérer les incompatibilités, incohérences, contradictions, etc. Par conséquent, l'intégration multi-expertise a soulevé un autre problème, celui de la coopération entre plusieurs entités et leur coordination .

Une proposition d'élargissement des systèmes d'IAD est mise en avant : les entités doivent avoir la capacité de réfléchir sur les connaissances et les compétences des autres dans le but d'une collaboration efficace. Pour atteindre cet objectif, elles doivent être équipés de capacités de perception et d'action sur leur environnement et doivent démontrer une certaine autonomie comportementale. On fait alors référence à ces entités en tant qu'agents, conduisant à la notion de système multi-agents.

4.4 Notion d'agent

Le concept d'agent a fait l'objet de recherches pendant plusieurs décennies dans diverses disciplines. Il a été employé non seulement dans les systèmes basés sur la connaissance, la robotique, le langage naturel et d'autres domaines de l'intelligence artificielle, mais aussi dans des disciplines telles que la philosophie et la psychologie. Aujourd'hui, avec l'émergence de nouvelles technologies et l'expansion de l'Internet, ce concept est encore lié à de nombreuses nouvelles applications telles que l'agent ressource, l'agent courtier, l'assistant personnel, l'agent interface, l'agent ontologique, etc. Dans la littérature, on trouve une multitude de définitions d'agents (Chaib-Draa et al., 2001).

Selon (Jennings et Wooldridge, 1998), « Un agent est un système informatique situé dans un environnement donné et capable d'agir de manière autonome dans cet environnement pour atteindre ses objectifs pour lesquels il a été conçu. Le système devrait pouvoir agir sans l'intervention directe des humains (ou d'autres agents), et devrait avoir le contrôle de ses propres actions et de son état interne ».

(Nouri et Belkahla, 2015) proposent une autre définition : « Les Agents intelligents exécutent sans interruption trois fonctions : perception des conditions dynamiques dans l'environnement ; action pour affecter des conditions dans l'environnement, et le raisonnement pour interpréter des perceptions, résoudre des problèmes, mener des inférences et déterminer des actions ».

Et parmi l'une des premières définitions de l'agent due à Ferber, « Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi agent, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents ».

4.4.1 Propriétés d'un agent

En se référant aux différentes définitions du concept d'agent dans la littérature, on peut dégager certaines caractéristiques communes de l'agent (Chaib-Draa et al., 2001), (Triki, S., 2018).

- ✚ **L'autonomie** : C'est la caractéristique fondamentale d'un agent, qui se distingue par sa capacité à accomplir certaines tâches et à prendre des initiatives sans l'intervention d'un tiers, qu'il s'agisse d'un humain ou d'un autre agent, afin de réaliser ses objectifs.
- ✚ **La communication et la coopération** : L'agent doit être en mesure de communiquer avec les autres agents ou utilisateurs humains afin d'échanger des informations qui lui permettent d'atteindre ses objectifs. Il doit également être social c'est à dire capable d'établir des relations avec les autres agents pour mener à bien des actions qui conduisent à un objectif commun.
- ✚ **La rationalité ou l'intelligence** : Un agent doit être en mesure, en se basant sur sa base de connaissances et ses mécanismes de raisonnement, d'effectuer des actions autonomes et flexibles pour réaliser ses objectifs, et éventuellement d'apprendre et de s'adapter au fil du temps.
- ✚ **La proactivité** : Un agent doit être apte à se fixer des buts pour atteindre ses objectifs sur sa propre initiative ;
- ✚ **La capacité d'apprentissage** : Un agent doit être capable à mémoriser ses expériences et à adapter son comportement en conséquence.
- ✚ **La mobilité** : Un agent doit avoir la capacité de se transférer d'un système à un autre et doit être compatible avec plusieurs plateformes et architectures.

4.4.2 Types d'agent

La complexité des fonctionnalités d'un agent varie selon deux écoles coexistantes aujourd'hui (Tableau 4.1) : l'école réactive et l'école cognitive (Labidi et Lejouad, 1993).

- ✚ **Agent réactif** : Ces agents sont perçus comme ayant une intelligence limitée ou inexistante, ils ne possèdent pas une représentation symbolique de leur environnement, ni du monde auquel ils appartiennent. Ils répondent par stimulus-réponse à l'état actuel de l'environnement. Leur intelligence émerge de leur association et communication.
- ✚ **Agent cognitif** : En opposition aux agents réactifs, les agents cognitifs sont dotés d'une certaine forme d'intelligence, ils possèdent une représentation symbolique de leur environnement et une base de connaissances qui leur permet de prendre des décisions pour atteindre leurs objectifs. Les systèmes d'agents cognitifs sont fondés sur la coopération d'agents capables à eux seuls d'effectuer des opérations complexes. Un système cognitif comprend un petit nombre d'agents qui disposent d'une capacité de raisonnement sur une base de connaissances, d'une aptitude à traiter des informations diverses liées au domaine d'application, et d'informations relatives à la gestion des interactions avec les autres agents et l'environnement.

Tableau 4.1 : Agents cognitifs vs agents réactifs

Systèmes d'agents cognitifs	Systèmes d'agents réactifs
Représentation explicite de l'environnement	Pas de représentation explicite
Peut tenir compte de son passé	Pas de mémoire de son histoire
Agents complexes	Fonctionnement Stimulus/ action
Petit nombre d'agent	Grand nombre d'agents

4.5 Système Multi Agents

Les Systèmes Multi-Agents (SMA) ont émergé avec l'apparition de l'Intelligence Artificielle Distribuée. Au début, l'IAD se concentrait uniquement sur la coopération entre les solveurs de problèmes pour atteindre un objectif commun. Pour ce faire, un problème était généralement divisé en sous-problèmes, et ces sous-problèmes étaient attribués à différents solveurs qui étaient appelés à coopérer pour élaborer des solutions partielles. Ces solutions étaient finalement synthétisées en une réponse globale au problème initial. Ainsi, l'IAD privilégiait initialement le "problème à résoudre", en mettant l'accent sur la résolution d'un tel problème par de multiples entités intelligentes. Dans les SMA actuels, les agents sont (entre autres) autonomes, potentiellement préexistants et généralement hétérogènes. Dans ce cas, l'accent est plutôt mis sur la façon dont les agents vont coordonner leurs connaissances, objectifs et plans pour agir et résoudre des problèmes (Chaib-Draa et al., 2001).

Le SMA est un nouveau paradigme de programmation qui prend de plus en plus une place importante parmi les technologies du développement des systèmes complexes et les systèmes distribués et hétérogènes où la solution est le résultat de l'interaction de plusieurs entités (Marir et al., 2016).

Les SMA sont à l'intersection de plusieurs domaines scientifiques : informatique répartie et génie logiciel, intelligence artificielle, vie artificielle. Ils s'inspirent également d'études issues d'autres disciplines connexes notamment la sociologie, la psychologie sociale, les sciences cognitives et bien d'autres (Chaib-Draa et al., 2001). C'est ainsi qu'on les trouve parfois à la base des :

- ◆ Systèmes distribués (Antonelli, 2000), (Wooldridge, 1996);
- ◆ Interface personnes-machines (Kobsa, 1989);
- ◆ Bases de données et bases de connaissances distribuées coopératives (Babin et al., 1997);
- ◆ Systèmes pour la compréhension du langage naturel (Cohen et al., 1990);
- ◆ Protocoles de communication et réseaux de télécommunications (Nwana et Ndumu, 1999) ;
- ◆ Programmation orientée agents et génie logiciel (Jennings, 2000) ;
- ◆ Robotique cognitive et coopération entre robots (Lakemeyer et Levesque, 1999) ;
- ◆ Applications distribuées comme le web, l'Internet, le contrôle de trafic routier, le contrôle aérien, les réseaux d'énergie, etc (Jennings et Wooldridge, 1998).

Les études dans le domaine des systèmes multi-agents visent deux objectifs principaux : Le premier est l'analyse théorique et expérimentale des mécanismes qui se produisent lorsque plusieurs entités autonomes interagissent. Le second concerne la mise en œuvre de programmes distribués capables

d'accomplir des tâches complexes grâce à la coopération et à l'interaction. Leur position est donc double : d'une part, elles s'inscrivent dans le cadre des sciences cognitives, des sciences sociales et des sciences naturelles pour modéliser, expliquer et simuler des phénomènes naturels, et susciter des modèles d'auto-organisation ; d'autre part, elles se présentent comme une pratique, une technique visant à réaliser des systèmes informatiques complexes à partir des concepts d'agent, de communication, de coopération et de coordination d'actions (Chaib-Draa et al., 2001).

L'utilisation des SMA présente une série d'avantages (Ferber.J., 1997) :

-  **Système dynamique** : les SMA héritent des bénéfices de l'IA au niveau du traitement symbolique (au niveau des connaissances). En revanche, contrairement aux approches traditionnelles de l'Intelligence Artificielle qui simulent, dans une certaine mesure, les capacités du comportement humain, les SMA permettent de modéliser un ensemble d'agents qui interagissent.
-  **Nombre important d'agents** : un grand nombre d'agents est au cœur du problème dans ce type de modélisation contrairement à la théorie des jeux où rarement plus de trois acteurs sont représentés.
-  **Souplesse de l'outil informatique** : qui permet de modifier le comportement des agents, ajouter ou supprimer des actions possibles, étendre les informations disponibles à l'ensemble des agents à la différence des modèles traditionnellement utilisés en science économique.
-  **Une résolution distribuée de problèmes** : il est possible de décomposer un problème en sous-parties de résoudre chacune de façon indépendante pour aboutir à une solution stable.

4.5.1 L'association FIPA

Pour maximiser l'exploitation des technologies basées sur les agents et élargir leur domaine d'application, il est nécessaire de disposer de fonctionnalités d'agents conformes aux normes, ainsi que de cadres structurels appropriés pour le développement de systèmes d'agents. Plusieurs structures de recherche, comme la Fondation pour les Agents Physiques et Intelligents (FIPA) (<http://www.fipa.org/>), se consacrent à la normalisation des technologies des agents. D'autres se concentrent sur les cadres de développement pour la conception d'applications basées sur des systèmes d'agents, comme JADE (Java Agent Development) (Sycara et al., 1996).

FIPA est une organisation internationale à but non lucratif composée d'entreprises et d'organisations qui collaborent pour élaborer des spécifications génériques pour les technologies des agents. FIPA est reconnue non seulement comme une technologie pour une application spécifique, mais surtout comme une technologie générique applicable à divers domaines. FIPA est reconnue non seulement pour des technologies autonomes, mais aussi pour un ensemble de technologies fondamentales qui peuvent être intégrées par les développeurs pour construire des systèmes complexes avec un haut degré d'interopérabilité. FIPA repose sur une hypothèse clé : seule la spécification du comportement externe des composants du système est nécessaire, laissant aux développeurs d'agents la liberté de déterminer les détails de mise en œuvre et les architectures internes (<http://www.fipa.org/>).

FIPA soutient les formes de conversation courantes entre agents par le biais de la spécification de protocoles d'interaction, qui sont des modèles de messages échangés par deux agents ou plus. Ces protocoles comprennent des protocoles de demande simples, le célèbre Contract Net Protocol (CNP) de négociation et les enchères "anglaises ou néerlandaises". D'autres parties de la norme FIPA

spécifient d'autres aspects, notamment l'intégration agent-logiciel, la mobilité et la sécurité des agents, le service d'ontologie et la communication homme-agent. Les agents utilisent différents comportements pour communiquer entre eux. Dans la section suivante, certains de ces comportements sont expliqués (Saleh, 2019).

La spécification FIPA SC00023K (FIPA Agent Management Specification, Foundation For Intelligent Physical Agents Std. SC00 023K, 2004) établit deux niveaux internes de gestion, du cycle de vie et de fonctionnement des agents. Le premier niveau, dénommé niveau d'agent, se rapporte à chaque agent individuellement, tandis que le second concerne des groupes d'agents et la façon dont ils interagissent, appelé niveau SMA. Au niveau de l'agent, il définit le cycle de vie de l'agent, et au niveau SMA, il propose des services de gestion d'agent et un système de transport de messages. Ces services sont indispensables pour permettre au SMA de fonctionner de manière distribuée et flexible.

Le premier niveau définit comment les agents traversent leur cycle de vie, de leur création à leur cessation. Au cours de sa vie, un agent peut se trouver dans cinq états possibles (Figure 4.2) :

- **Initié**, juste après sa création. Dans cet état, l'agent exécute une série d'instructions définies par l'utilisateur et s'exécute une fois en tant que procédure d'initialisation.
- **Actif**, qui est l'état normal dans lequel l'agent fonctionne.
- **En attente**, lorsque l'agent est en attente d'un événement externe et reste dans cet état jusqu'à ce qu'il soit réveillé. Cet état peut par exemple être celui d'un agent attendant un message d'un autre agent.
- **Suspendu**, lorsque l'agent a été arrêté de l'état actif. Par exemple, un agent représentant un chirurgien peut être suspendu pour la période où le chirurgien est indisponible pour une raison quelconque.
- **En transit**, lorsque l'agent se déplace physiquement d'une plate-forme d'agent à une autre (par exemple, d'un ordinateur à un autre).

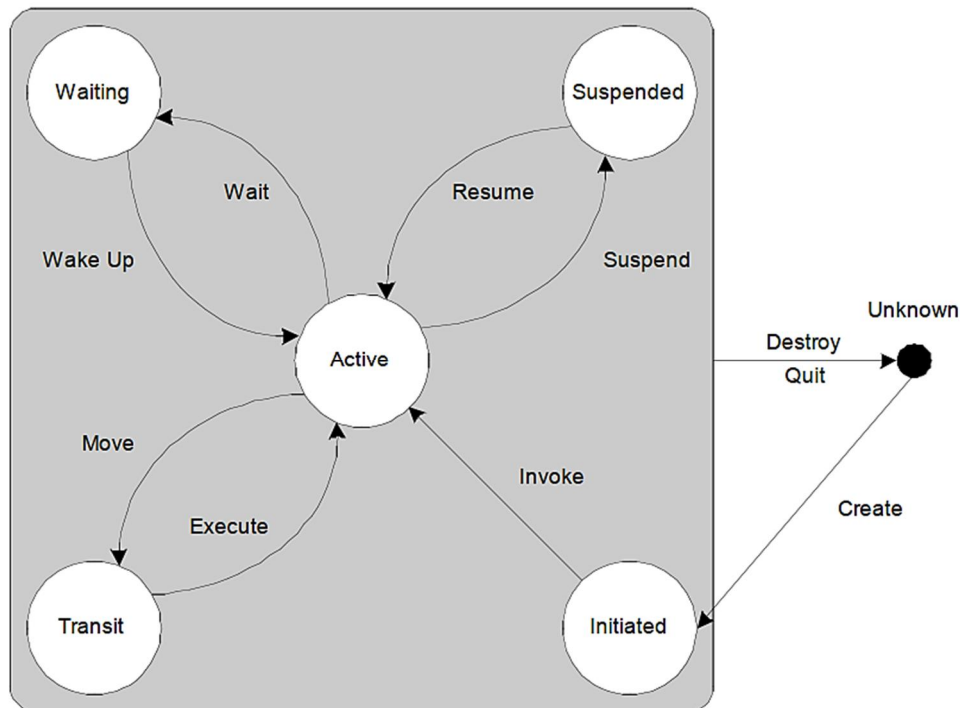


Figure 4.2 : Cycle de vie d'un agent, (FIPA ,Std. SC00023K)

Au niveau du SMA, chaque plate-forme d'agent comprend les entités obligatoires énumérées ci-dessous (AMS, DF, ACC) et au moins un agent. Une seule plate-forme peut inclure des agents situés dans différents emplacements physiques, tels que des ordinateurs distants. Sur la plate-forme, on doit commencer par l'implémentation du modèle de référence de gestion des agents (Figure 4.3), qui définit les entités de gestion, à savoir :

- ✚ Un Facilitateur d'Annuaire (**Directory Facilitator**), qui offre un service de pages jaunes aux agents, c'est-à-dire une liste d'agents avec leurs compétences et capacités respectives. Chaque agent peut enregistrer ses services dans le DF, puis interroger celui-ci pour savoir quels sont les services disponibles (enregistrés). La mise en place d'un DF est facultative et plusieurs DF peuvent coexister simultanément.
- ✚ Un Système de Gestion des Agents (**Agent Management System**), qui supervise le point d'accès et maintient à jour une liste de tous les agents et de leurs adresses. Cette fonctionnalité est similaire à un service de pages blanches, c'est-à-dire une liste d'agents, ainsi que leurs noms et adresses, auxquels chaque agent doit s'inscrire.
- ✚ Le Système de Transport de Messages (**Message Transport System**) , qui permet le transport de messages d'un agent à l'autre. Un Protocole de Transport de Messages (MTP) est utilisé pour transférer physiquement des messages entre agents sur des plates-formes potentiellement différentes ; tous les messages échangés entre plates-formes passent par le MTP.
- ✚ L'agent lui-même, qui communique avec d'autres agents en utilisant le langage ACL et peut avoir accès à un logiciel externe.

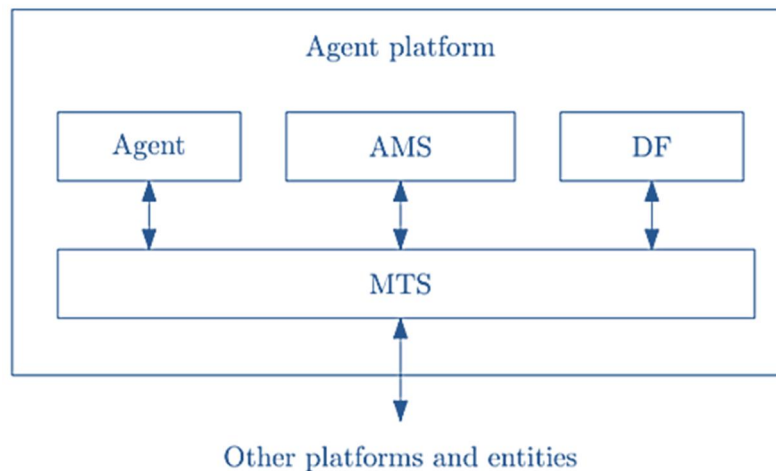


Figure 4.3 : Modèle de référence de gestion des agents FIPA,
(FIPA ,Std. SC00023K)

Afin d'assurer le bon fonctionnement des services mentionnés précédemment, un identifiant d'agent unique (AID) est attribué à chaque agent. L'AID est constitué de trois éléments distincts : un nom unique, généralement une combinaison d'un nom local et de l'adresse de la Plateforme d'Agent (AP); une liste d'adresses pour la livraison des messages; et un résolveur, qui est utilisé par le Système de Gestion des Agents (AMS) pour déterminer l'adresse de transport de l'agent.

4.5.2 Langage de communication ACL

Les langages de communication d'agent (ACL) sont considérés comme l'une des spécifications les plus cruciales et fondamentales pour les SMA. La communication d'agent à agent repose sur

l'échange de messages standardisés. FIPA-ACL (Fondation pour Agents Physiques Intelligents - Langage de communication d'agent) spécifie un langage de message standard en définissant le codage, la sémantique et la pragmatique des messages (Finin et al., 1994).

En effet, la conception d'un SMA nécessite de formaliser la façon dont les agents se coordonnent, coopèrent, prennent des décisions, etc., ce qui signifie que les agents et les SMA doivent au minimum adopter des langages communs. Des langages tels que l'ACL (Agent Communication Language) et le KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) ont été développés pour être utilisés dans la création de SMA, afin que les agents puissent utiliser un langage et un vocabulaire communs pour communiquer. Lorsque deux agents communiquent, leur but est d'échanger des informations, ce qui nécessite qu'ils se comprennent mutuellement. La communication se fait par l'envoi de messages ou de signaux (stimuli). Ainsi, quelle que soit la forme de communication, l'impératif est qu'un agent soit capable de comprendre les autres agents. À cette fin, la Fondation pour les Agents Physiques Intelligents (FIPA) a établi certaines spécifications et normes relatives à l'utilisation des SMA. L'ACL est une spécification FIPA et est généralement le plus utilisé. Plusieurs attributs sont assignés à chaque message, y compris son contenu, ainsi que des informations sur les participants et des informations sur les identités des propriétaires de la conversation. La structure d'un message ACL (Tableau 4.2) comprend les paramètres suivants (Saleh, 2019) :

- ✚ Un paramètre qui définit le type de communication, appelé performatif. Ce champ indique si le message est une requête, une réponse, une information, etc.
- ✚ La liste des participants à la conversation, avec des informations sur l'expéditeur et le ou les destinataires, ainsi que des champs de réponse, y compris le nom des agents correspondants.
- ✚ Le contenu du message.
- ✚ Une description du contenu, la référence du langage, le codage et le vocabulaire, appelée ontologie.
- ✚ Et des paramètres de contrôle de la conversation, tels qu'un identifiant de conversation et un protocole.

Tableau 4.2 : Structure d'un message FIPA-ACL

Élément	Signification
Performative	Type de l'acte communicatif
Sender	L'émetteur du message
Receiver	Le destinataire du message
Reply-to	Participant à l'acte de communication
Content	Le contenu du message (l'information transportée par la performative)
Language	Le langage dans lequel le contenu est représenté
Encoding	Décrit le mode d'encodage du contenu du message
Ontology	Le nom de l'ontologie utilisé pour donner un sens aux termes utilisés dans le <i>content</i>
Protocol	Contrôle la conversation
Conversation-id	Identificateur de la conversation
Reply-with	Identificateur unique du message, en vue d'une référence ultérieure
In-reply-to	Référence à un message auquel l'agent est entrain de répondre (précisé par l'attribut reply-with de l'émetteur)
Reply-by	Impose un délai pour la réponse

Au cours des dernières années, KQML cède la place au langage plus riche en termes de sémantique. L'ACL est également basé sur la théorie du langage et a largement bénéficié des résultats de recherche de KQML. Bien que les deux langages partagent des similitudes en termes d'actes de langage, ils diffèrent considérablement en termes de sémantique. Il semble qu'un soin particulier a été apporté à l'ACL, tant au niveau de certains protocoles qui sont plus explicites, qu'au niveau de la sémantique des actes eux-mêmes.

4.5.3 Mécanismes d'interaction entre agents

L'une des notions clés des SMA est l'interaction entre les agents. En effet, l'environnement est vaste et ouvert, et il n'est pas envisageable qu'un agent puisse stocker une représentation complète du monde. Cependant, un agent a la capacité de se déplacer ou d'interagir avec d'autres agents dans son environnement immédiat pour explorer et acquérir, partager et échanger des connaissances distribuées.

4.5.3.1 Coopération :

La coopération se définit comme l'interaction ou la participation des agents dans le but d'accomplir une tâche ou d'atteindre un objectif commun. Chaque agent est défini par ses objectifs, ses capacités à accomplir certaines tâches et les ressources dont il dispose. L'interaction est motivée par le fait qu'un agent peut avoir besoin de ressources détenues par d'autres agents (Chaib-Draa et al., 2001).

La coopération peut être réalisée à travers deux modèles distincts (Sabar, 2008) : la coopération par le partage de tâches et la coopération par le partage de résultats. La coopération par le partage de tâches implique une décomposition du problème principal en un ensemble de sous-problèmes moins complexes, qui sont ensuite répartis entre les différents agents. Cette allocation est généralement effectuée par des mécanismes d'appel d'offres tels que le Contract Net, ou directement par un agent supérieur qui connaît les compétences de chaque agent du système. D'autre part, la coopération par le partage de résultats implique un partage des informations relatives aux sous-problèmes. Ce partage d'information peut être effectué de manière proactive (un agent envoie des informations à un autre en pensant que cela peut lui être utile) ou de manière réactive (un agent envoie des informations en réponse à une demande qui lui a été adressée).

Le protocole Contract-Net (CNP), est un protocole d'interaction largement adopté pour faciliter les processus de négociation coopérative. Ce protocole, proposé à l'origine par Davis et Smith, est conçu pour la répartition des tâches entre un ensemble d'agents formant un "contrat network"(Smith & Davis, 1981).

Il existe deux types principaux d'agents dans ce réseau : le gestionnaire et les agents contractuels. Un cycle typique de ce protocole commence par l'envoi d'un appel à propositions par l'agent initiateur, qui peut également définir une date limite pour recevoir les réponses. Les agents contractuels, ou participants, peuvent alors répondre en soumettant des propositions (par exemple, le coût, le temps nécessaire pour accomplir une tâche, etc.) ou en refusant l'offre. L'agent initiateur évalue ensuite les propositions reçues et choisit aucun, un ou plusieurs agents pour accomplir la tâche en question. Les agents sélectionnés ont alors la liberté d'accepter ou de refuser l'offre finale (Saleh, 2019).

4.5.3.2 Coordination

Dans un cadre coopératif, les entités disposent d'une représentation de leur contexte ainsi que de celui des autres participants. Ils sont capables de détecter les conséquences des actions entreprises par les autres entités au sein de l'environnement, ce qui leur permet d'actualiser les représentations qu'ils ont des autres participants.

D'après (Sabar, 2008), deux méthodes principales sont couramment employées pour orchestrer les actions des agents : la « Planification Globale Partielle » (PGP) et la coordination par intentions partagées. Dans le cadre de la PGP, chaque agent élabore des plans à court terme détaillant les actions futures nécessaires pour atteindre ses objectifs. Ces plans sont ensuite partagés entre les agents afin d'identifier les opportunités d'amélioration de la coordination et d'éviter toute action incohérente ou contradictoire. Si besoin, ces plans locaux peuvent être ajustés. En ce qui concerne la coordination par intentions partagées, les SMA sont perçus comme une équipe de travail dont les membres peuvent développer une intention partagée d'accomplir une activité commune.

4.5.3.3 Négociation

La négociation est un mécanisme efficace pour résoudre les conflits entre les agents. Il s'agit d'un processus qui favorise l'évolution de la satisfaction de chaque agent lors de l'examen d'une proposition, dans le but d'atteindre un accord mutuellement bénéfique.

Un conflit peut être caractérisé comme une divergence entre deux ou plusieurs parties interdépendantes dont les objectifs semblent incompatibles en ce qui concerne la distribution d'un ensemble de ressources multilatérales indispensables à la mise en œuvre d'un processus de gestion (Klabi, 2012).

Les agents ont la possibilité d'interagir soit par le biais d'actions linguistiques (en communiquant entre eux), soit par des actions non linguistiques qui modifient leur environnement. Par la communication, les agents sont en mesure d'échanger des informations et de coordonner leurs activités. Dans le contexte des SMA, deux stratégies principales ont été mises en œuvre pour faciliter la communication entre les agents : l'échange direct de messages entre agents ou l'accès à une base de données partagée (communément appelée "tableau noir" ou "blackboard") où les informations sont publiées. Les communications constituent le fondement des interactions et de l'organisation sociale d'un SMA (Chaib-Draa et al., 2001).

4.5.4 Modes de communication entre les agents

Deux modes de communication sont distingués :

-  **Communication par transmission de messages** : Chaque agent possède une perspective locale du problème et communique directement avec les autres agents qu'il connaît. Cette forme de communication peut être résumée comme des échanges asynchrones. Ainsi, ce mode de communication repose sur deux variantes principales, à savoir une communication point à point (lorsque le destinataire est connu) et une communication par diffusion (lorsque le destinataire n'est pas connu) (Nouri et Belkahla, 2015).

- ✚ **Communication par mémoire partagée** (communication indirecte) : Ces systèmes sont basés sur des tableaux noirs (blackboard). Le modèle de tableau noir repose sur une division en modules indépendants qui ne transmettent directement aucune information, mais qui interagissent indirectement en partageant des informations. Ces modules, appelés sources de connaissance ou KS (pour Knowledge Sources), travaillent sur un espace qui comprend tous les éléments nécessaires à la résolution d'un problème (Ferber et Weiss, 1999).

4.5.5 Architectures des SMA

4.5.5.1 Architecture BDI

L'architecture BDI est une approche employée dans la conception des agents délibératifs, qui s'appuie sur le modèle "Belief-Desire-Intention" pour orienter le choix des actions des agents (Figure 4.4).

- ♦ **Belief** (Croyance) : Elle représente les informations qu'un agent détient sur son environnement. Ces informations peuvent évoluer au fil du temps en raison de l'interaction de l'agent avec d'autres agents, ce qui entraîne l'acquisition de nouvelles informations.
- ♦ **Desire** (Désir) : Il symbolise les objectifs que l'agent souhaite atteindre. Il s'agit de la description du comportement souhaité de l'agent en termes de satisfaction.
- ♦ **Intention** : Ce sont les actions que l'agent a décidé d'entreprendre pour réaliser ses désirs (Adina et Stefan 2002).

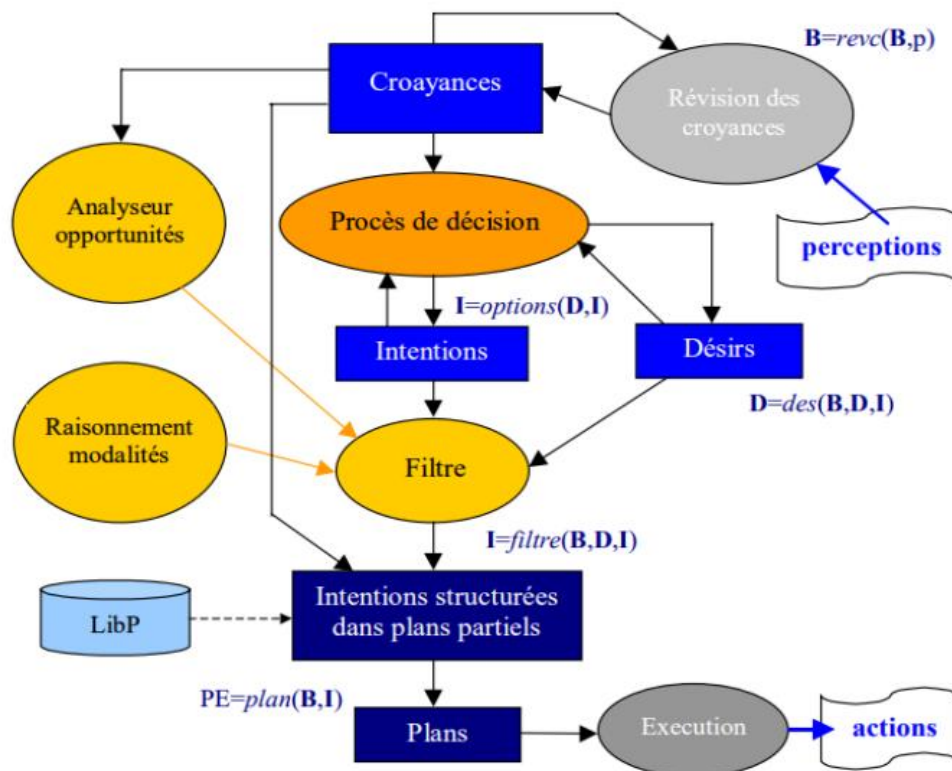


Figure 4.4 : Architecture BDI (Adina et Stefan 2002)

4.5.5.2 Architecture réactive

Les architectures réactives décrivent le fonctionnement de l'agent à travers des composants dotés d'une structure de contrôle simple, sans nécessiter une représentation avancée des connaissances de l'agent. L'intelligence de l'agent est perçue comme le produit des interactions entre ces composants et l'environnement (Figure 4.5). Cela signifie qu'une telle architecture est capable de résoudre des problèmes complexes, qui exigeraient normalement un comportement intelligent, sans aborder l'intelligence du point de vue traditionnel de l'intelligence artificielle (Adina et Stefan 2002).

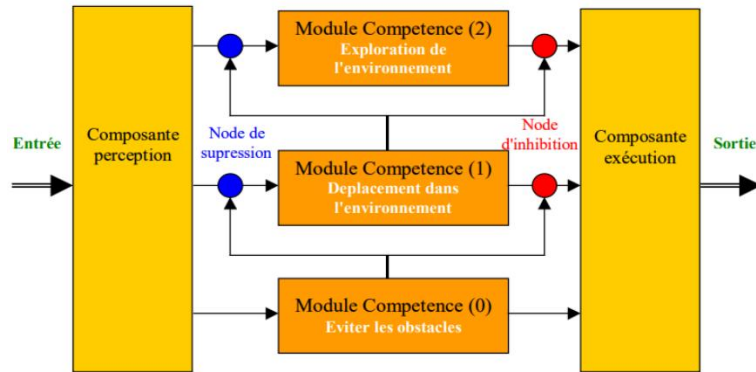


Figure 4.5 : Architecture réactive (Adina et Stefan 2002)

4.5.5.3 Architecture hybride

Depuis le début des années 90, il a été reconnu que les systèmes réactifs étaient bien adaptés à certains types de problèmes, mais moins à d'autres. De même, pour la majorité des problèmes, les solutions de l'IA classique, basées uniquement sur la planification, ne sont pas non plus appropriées. Par conséquent, des recherches ont été lancées pour explorer la possibilité de combiner ces deux approches afin de créer une architecture hybride (Ferguson. I. A., 1992) (Fischer.K et al, 1999). Dans ce cas, un agent est constitué de plusieurs couches, disposées en hiérarchie, la plupart des architectures estimant que trois couches sont largement suffisantes. Ainsi, au niveau le plus bas de l'architecture, on trouve généralement une couche purement réactive, qui prend ses décisions en se basant sur des données brutes provenant des capteurs. La couche intermédiaire fait abstraction des données brutes et travaille plutôt avec une vision qui se situe au niveau des connaissances de l'environnement. Enfin, la couche supérieure s'occupe des aspects sociaux de l'environnement, c'est-à-dire du raisonnement tenant compte des autres agents (Figure 4.6).

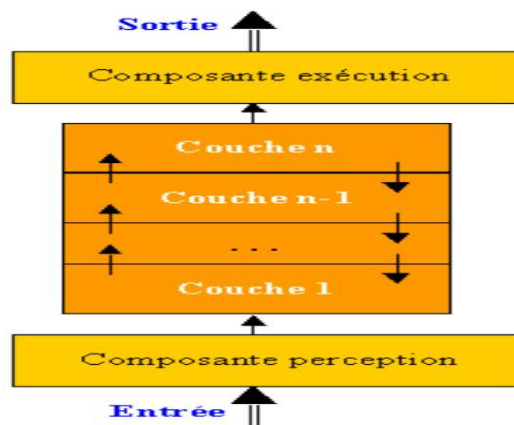


Figure 4.6 : Architecture hybride (Adina et Stefan 2002)

4.5.6 Domaines d'application des SMA

Parmi les premières implémentations utilisant la technologie multi-agents, on trouve une application dans la régulation du trafic aérien et une autre dans la surveillance des véhicules motorisés. Pour la régulation du trafic aérien, Cammarata a exploré des tactiques de collaboration pour résoudre les conflits entre les plans d'un ensemble d'agents. Ces tactiques ont ensuite été mises en œuvre dans un système de contrôle du trafic aérien. Dans ce système, chaque agent (symbolisant un avion) tente de construire un plan de vol qui devrait le maintenir à une distance sûre de chaque autre agent. Si des agents se retrouvent dans une situation conflictuelle, ils doivent alors sélectionner parmi eux un agent capable de concevoir un nouveau plan de vol sans créer de nouveaux conflits (Cammarata et al., 1988).

Ultérieurement, le concept d'agent a fait l'objet de recherches dans de nombreuses disciplines, ce qui explique pourquoi les domaines d'application des Systèmes Multi-Agents (SMA) sont si diversifiés. Nous allons énumérer les principales catégories d'application des SMA (Ferber . J. et Weiss.G. ,1999) et (Chaib-Draa et al., 2001) :

- ✚ **La résolution de problèmes** : La résolution de problèmes dans un sens général englobe toutes les situations où des agents logiciels exécutent des tâches bénéfiques pour les humains. Cette catégorie se distingue des applications de robotique distribuée du fait que les agents sont strictement numériques et ne possèdent pas de structure physique concrète.
- ✚ **La robotique distribuée** : La robotique distribuée concerne la mise en œuvre non pas d'un seul robot, mais d'un ensemble de robots qui collaborent pour accomplir une tâche. Elle fait appel à des agents tangibles qui se déplacent dans un environnement physique.
- ✚ **La simulation multi-agents** : La simulation multi-agents repose sur le postulat qu'il est envisageable de modéliser numériquement le comportement des entités agissant dans le monde réel, permettant ainsi de représenter un phénomène comme le résultat des interactions d'un ensemble d'agents dotés de leur propre autonomie opérationnelle. L'avantage des simulations est qu'elles permettent de prendre en compte aussi bien des paramètres quantitatifs que qualitatifs.
- ✚ **Les systèmes d'informations coopératifs** : actuellement, les informations sont réparties partout (dans les réseaux locaux ou le réseau Internet) avec des structures et des natures hétérogènes. Les systèmes d'information coopératifs (SIC) sont des systèmes capables de rechercher, filtrer et fusionner les informations. Ces systèmes peuvent être exploités dans le domaine financier, le domaine touristique...

Récemment, les agents et les systèmes multi-agents sont devenus des solutions prometteuses pour des nouveaux problèmes comme le contrôle temps réel des systèmes embarqués, la gestion des architectures orientées-services, la gestion des réseaux, la recherche d'informations, le commerce électronique et la planification des tâches.

4.5.7 Plates-formes de développement des SMA

Les environnements de développement ou les plateformes multi-agents sont indispensables pour soutenir le succès de la technologie multi-agents. Ces plateformes multi-agents offrent aux développeurs la possibilité de concevoir et de mettre en œuvre leurs applications sans avoir à consacrer du temps à la réalisation de fonctions de base pour la création et l'interaction entre agents, éliminant ainsi, dans la plupart des cas, le besoin de se familiariser avec les différents concepts théoriques des systèmes multi-agents.

Dans le domaine des logiciels libres, plusieurs plates-formes ont été employées pour la création de diverses applications. Parmi ces plates-formes, on peut citer JADE, MACE, ZEUS et MADKIT et Agent Builder, qui sont utilisées pour le développement d'agents cognitifs, ainsi que SWORM pour les agents réactifs. Il convient de souligner que cette énumération n'est pas exhaustive, et qu'il existe d'autres plates-formes qui ont également été utilisées avec succès pour la mise en œuvre de différentes applications.

MACE est reconnu comme le premier environnement permettant la conception et l'expérimentation de diverses architectures d'agents dans une multitude de domaines d'application. Dans cet environnement, un agent est défini comme un objet actif qui communique par le biais de l'envoi de messages. Ces agents coexistent dans un environnement qui englobe tous les autres agents et entités du système. Un agent a la capacité d'effectuer trois types d'actions : modifier son état interne, envoyer des messages à d'autres agents et faire des requêtes au noyau MACE pour gérer les événements internes. Chaque agent est équipé d'un moteur qui constitue la partie active de l'agent. Ce moteur est responsable de l'activité de l'agent et de l'interprétation des messages. MACE a été employé pour la réalisation de simulations d'applications distribuées (Gasser et al., 1988).

ZEUS est un environnement intégral qui emploie une méthodologie dénommée « role modeling » pour la création de systèmes collaboratifs. Les agents dans cet environnement sont structurés en trois couches. La première couche, celle de la définition, considère l'agent comme une entité autonome capable de raisonner en fonction de ses croyances, ressources et préférences. La seconde couche, celle de l'organisation, établit les relations entre les agents. La dernière couche, celle de la coordination, détermine les modes de communication entre les agents, y compris les protocoles, la coordination et d'autres mécanismes d'interaction. ZEUS est un outil très complet. Les différentes phases de développement sont réalisées au sein de plusieurs éditeurs : ontologie, description des tâches, organisation, définition des agents, coordination, faits et variables, ainsi que les contraintes. Cependant, le développement de SMA avec ZEUS est conditionné par l'utilisation de l'approche « role modeling ». Bien que l'outil soit assez complexe, sa maîtrise nécessite un investissement de temps considérable (Garneau .T.,2003).

MADKIT est une plate-forme conçue par le Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM) affilié à l'Université Montpellier II. Cette plate-forme est libre d'accès pour les usages éducatifs. MADKIT est spécifiquement destinée au développement et à l'exécution de systèmes multi-agents, avec un accent particulier sur les systèmes multi-agents basés sur des critères organisationnels tels que les groupes et les rôles. MADKIT est codé en Java et fonctionne en mode distribué de manière transparente grâce à une architecture "peer to peer", sans nécessiter de serveur dédié. Cela permet aux agents de communiquer à distance sans avoir à gérer les problèmes de communication, qui sont pris en charge par la plate-forme elle-même (Ferber. J., 2009).

Agent Builder est un environnement intégré de développement pour les systèmes multi-agents, construit en Java et fonctionnant sur cette plateforme. Il repose sur deux éléments clés : une boîte à outils pour la conception des agents et un environnement d'exécution. L'environnement de développement comprend la gestion du développement de logiciels basés sur des agents, l'analyse des domaines d'activité des agents, la spécification des comportements des agents, la conception des réseaux de communication inter-agents, ainsi que des outils pour tester et déboguer les agents logiciels. Les agents conçus avec Agent Builder utilisent KQML pour les communications et sont de type BDI, implémenté par le langage Agent 0 (Grouls .A., 2013).

Il convient de souligner qu'Agent Builder comprend une section consacrée aux ontologies, qui peuvent être utilisées par les agents. Par conséquent, Agent Builder est principalement destiné au développement de systèmes multi-agents entièrement logiciels, qui utilisent spécifiquement des agents intelligents (Grouls .A., 2013).

SWARM est une plateforme multi-agents qui utilise des agents réactifs, s'inspirant du domaine de la vie artificielle. SWARM est l'outil de choix pour la communauté américaine et les chercheurs en vie artificielle. Cet environnement fournit une série de bibliothèques facilitant l'implémentation de systèmes multi-agents composés d'un grand nombre d'agents simples interagissant dans un environnement commun. SWARM a été utilisé pour développer de nombreuses applications et est actuellement disponible en plusieurs langages de programmation, dont Java et Objective-C (Minar et al., 1996).

Plusieurs critères ont été évalués lors de la sélection de la plateforme de développement pour le système multi-agents, notamment :

- ♦ La conformité des protocoles d'interaction avec les spécifications FIPA ;
- ♦ La flexibilité de la plateforme ;
- ♦ La capacité de distribution ;
- ♦ L'extensibilité de la plateforme.

En tenant compte de ces critères, la plateforme **JADE** a été choisie comme l'outil optimal pour la mise en œuvre de notre architecture distribuée et sera présentée en détail dans la section suivante.

4.6 Plateforme JADE

JADE (Java Agent DEvelopment) est une plateforme dédiée au développement d'agents et de systèmes multi-agents, conçue en Java. En tant que logiciel libre, JADE est accessible à tous. Un point crucial à souligner est que JADE est conforme à la norme FIPA-ACL. La plateforme JADE facilite le débogage et le déploiement des systèmes conçus. Elle se compose de trois composants essentiels pour la mise en place d'un système multi-agents : un service d'annuaire pour les agents, un service qui gère la communication entre les agents, et un service de gestion des agents (Grouls. A., 2013).

L'initialisation d'une plate-forme est la première étape, au cours de laquelle le premier conteneur abritant des agents est créé. Ce premier conteneur, également connu sous le nom de conteneur principal (Figure 4.7), héberge deux agents internes spécialisés : les agents AMS et DF. L'agent AMS est responsable de la création ou de la destruction des autres agents, conteneurs et plates-formes. L'agent DF, quant à lui, met en œuvre un service de pages jaunes que les autres agents peuvent consulter pour obtenir des informations sur les services offerts par d'autres agents.

L'exécution de MAS sur JADE suit un modèle basé sur les comportements des agents. Le concept de comportement décrit la réaction d'un agent à un événement et permet aux agents de fonctionner de manière autonome en fonction du contexte. Cette fonctionnalité est rendue possible en attribuant un thread Java à chaque comportement plutôt qu'un seul thread par agent, chaque agent pouvant être impliqué dans plusieurs tâches en parallèle (Saleh, 2019).

Trois outils graphiques facilitent le débogage et la surveillance :

-  L'agent Introspector, qui offre une surveillance et un contrôle des agents en fournissant des informations sur leur cycle de vie, leurs comportements et les échanges de messages ACL.
-  L'agent factice, qui peut être utilisé pour créer et envoyer des messages ACL à d'autres agents et consulter la liste des messages envoyés et reçus par un agent.

- ✚ L'agent Sniffer, qui intercepte les messages ACL et les affiche de manière similaire aux diagrammes de séquence UML, ce qui est utile pour surveiller la manière dont les agents interagissent lors des échanges de messages.

Ces outils permettent une surveillance plus rapide et plus facile du système (Saleh, 2019).

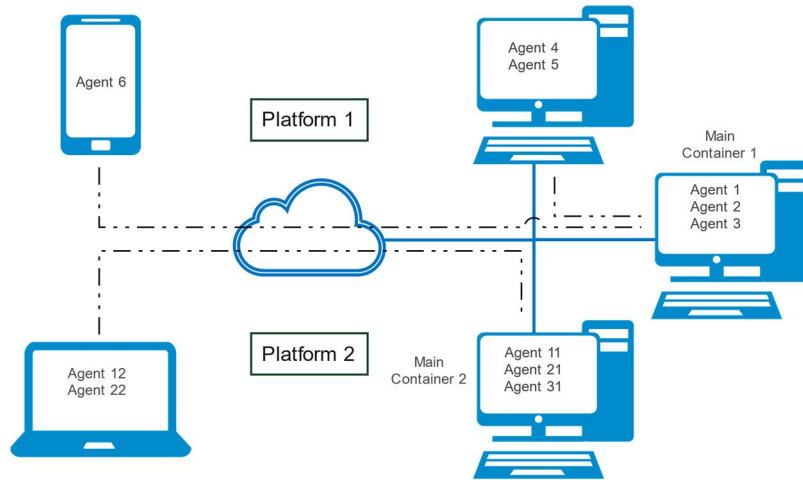


Figure 4.7 : Un exemple de deux plateformes JADE.

4.7 Planification multi-agents

La planification multi-agents est une extension de la planification automatisée traditionnelle, ou planification à agent unique, qui distribue la tâche de planification entre plusieurs agents. Ces agents collaborent pour élaborer un plan commun efficace. Cette approche permet une répartition plus équilibrée de la charge de travail de planification.

Une tâche de planification multi-agents coopérative implique la participation de plusieurs agents de planification qui collaborent dans un environnement partagé. Ces agents sont chargés d'élaborer un plan commun pour atteindre un ensemble d'objectifs globaux. Les actions de planification sont réparties entre les agents de planification. La distribution spatiale et/ou fonctionnelle des agents conduit à la création d'agents spécialisés dotés de connaissances et de compétences spécifiques. Cette spécialisation des agents entraîne la nécessité de coopérer, car les agents sont contraints d'interagir pour atteindre les objectifs de la tâche commune.

4.7.1 Modèles de la planification multi-agents

Pour différencier les différents modèles de planification multi-agents (Figure 4.8), il est nécessaire de considérer le problème de la planification multi-agents comme un problème de planification distribuée.

Des méthodes telles que la planification centralisée pour des groupes d'agents, la conciliation de plans, la planification distribuée, et l'analyse organisationnelle sont toutes des stratégies visant à aider les agents à coordonner leurs activités. Ces techniques permettent d'attribuer des tâches après avoir réfléchi aux conséquences de l'exécution de ces tâches dans des ordres spécifiques. Dans le cadre de la planification multi-agents, un plan multi-agents est élaboré de manière à ce que plusieurs agents puissent le mettre en œuvre. La création d'un tel plan peut être faite par un seul ou par plusieurs agents (Chaib-draa, 2001).

✚ **La planification centralisée** : repose sur la présence d'un agent coordinateur. Cet agent centralise tous les plans des agents du système et résout les conflits potentiels entre leurs activités en introduisant des actions de synchronisation. L'agent coordinateur a deux rôles possibles (Ilhem.B., 2014) :

- ◆ Il peut planifier pour tous les agents. Dans ce cas, il doit décomposer le plan global en sous-plans synchronisés qui peuvent être exécutés par les agents.
- ◆ Chaque agent peut planifier localement. Dans ce cas, le rôle de l'agent coordinateur se limite à la synchronisation des plans reçus. Ces deux approches permettent une coordination efficace des activités des agents dans le système.

✚ **La planification distribuée** : est un processus où la planification est répartie. Deux modèles sont envisageables dans cette approche (Ilhem.B., 2014):

- ◆ **Planification distribuée avec plan centralisé** : Dans ce modèle, l'objectif global des agents est d'accomplir une tâche T. Cette tâche est décomposée en plusieurs sous-tâches non ordonnées T_j . Après l'attribution de ces sous-tâches aux différents agents, chaque agent du système élabore un sous-plan pour résoudre la sous-tâche qui lui est assignée. Enfin, une synchronisation entre les agents permet d'élaborer un plan global centralisé pour réaliser la tâche T.
- ◆ **Planification distribuée avec plan distribué** : est un modèle où le processus de synthèse et d'exécution d'un plan multi-agents est entièrement distribué. Deux approches sont envisageables dans ce modèle :
 - ✓ L'approche orientée tâches : Dans cette approche, chaque agent se voit attribuer une tâche spécifique à accomplir. Il n'y a pas nécessairement de but global, mais chaque agent travaille de manière autonome pour accomplir sa tâche.
 - ✓ L'approche orientée agents : Dans cette approche, chaque agent a un objectif spécifique à atteindre. Il peut y avoir un but global que tous les agents s'efforcent d'atteindre, ou chaque agent peut avoir son propre but individuel.

La différence entre ces deux approches réside dans l'existence ou non d'un but global.

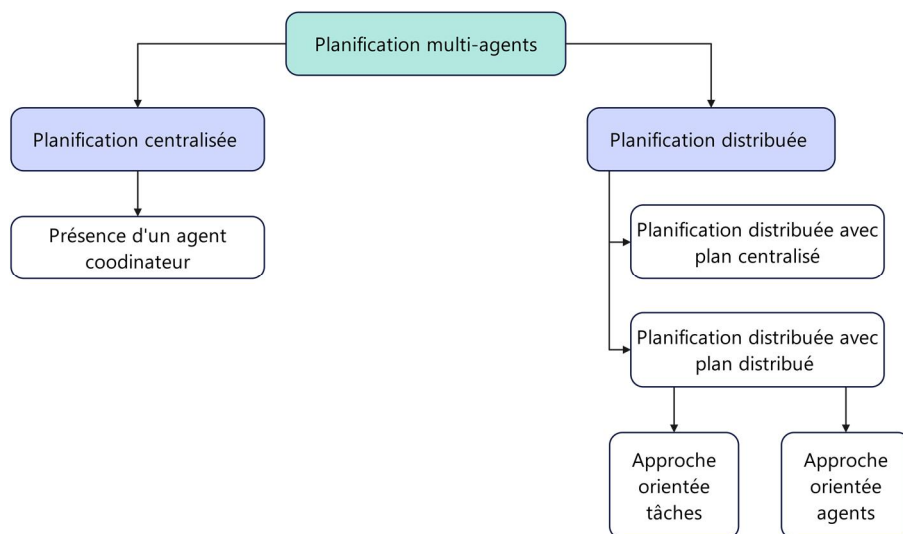


Figure 4.8 : Modèles de la planification multi-agents

4.7.2 Planificateur multi-agents

Un SMA est un système distribué dans lequel un groupe d'entités autonomes appelées agents intelligents, qu'ils soient humains ou logiciels, poursuivent leurs objectifs de manière réactive, proactive et sociale (Jennings et al., 2001). Le SMA a été proposé comme une approche de modélisation appropriée pour des domaines tels que le commerce électronique, les systèmes multi-robots, les applications de sécurité, la fabrication industrielle, etc.

La technique de planification avec le **planificateur multi-agents** (PMA) fait son apparition. Cette nouvelle méthodologie poursuit l'intégration des capacités de planification dans les agents intelligents. Ainsi, un groupe d'agents peut élaborer un plan d'action permettant d'atteindre un ensemble d'objectifs communs (Saleh, 2019). PMA se distingue comme une méthode de planification simple et puissante de l'intelligence artificielle distribuée (IAD) pour les applications gérées par un SMA où plusieurs entités ou agents intelligents planifient en communiquant ensemble et en combinant leurs connaissances, leurs informations et leurs capacités (Nguyen, et al., 2009).

4.7.3 Planification multi-agents pour la gestion des blocs opératoires

Dans les écrits contemporains, une attention considérable a été accordée à l'élaboration d'applications de gestion pour les systèmes distribués, ainsi qu'à une compréhension plus approfondie des défis et des besoins qui leur sont liés. Ces systèmes se distinguent par la maîtrise de caractéristiques techniques particulières, comme la régulation décentralisée, l'auto-organisation, l'adaptabilité et la capacité à évoluer.

Les blocs opératoires sont des systèmes dynamiques d'une complexité considérable. Les PMA offrent un moyen approprié et efficace de modéliser, de contrôler et de diriger leurs processus. L'efficacité des PMA dans ce contexte découle du fait que les salles d'opération sont intrinsèquement distribuées dans le bloc, chaque salle possédant ses propres ressources et sa propre planification proactive. De plus, les équipes chirurgicales ont des compétences sociales et les ressources humaines et matérielles sont limitées.

À l'instar du bloc opératoire avec ses salles distribuées, interdépendantes par le biais de ressources humaines et matérielles communes et par le partage des tâches (telles que les interventions chirurgicales), le PMA utilisé pour modéliser le processus réel peut également être distribué par conception. Les agents peuvent modéliser des entités physiques, des connaissances ou des interactions au sein du système réel. Jusqu'à une période récente, l'utilisation des PMA dans les applications des systèmes de santé était relativement limitée (Saleh, 2019).

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré le concept d'agent et les systèmes multi-agents, en examinant certaines caractéristiques des agents et leurs divers types, ainsi que les mécanismes d'interaction, les modes de communication entre eux. Par la suite, nous avons abordé les architectures des systèmes multi-agents et certains de leurs domaines d'application. Enfin, nous avons introduit plusieurs plateformes de systèmes multi-agents, y compris la plateforme JADE qui a été employée dans le cadre de notre étude. De plus, nous avons introduit le planificateur multi-agents qui sera employé pour modéliser notre processus réel.

Chapitre 5

Planification journalière et hebdomadaire du bloc opératoire par le modèle PMA :

Validation expérimentale

Chapitre 5

Planification journalière et hebdomadaire du bloc opératoire par le modèle PMA : Validation expérimentale

5.1 Introduction

Nous sommes témoins d'une accélération sans précédent de l'évolution technologique, propulsée par des avancées innovantes et une vision holistique. Cette transformation rapide est particulièrement évidente dans le secteur de la santé, où une optimisation efficace des ressources humaines et matérielles conduit à une amélioration significative de la qualité des soins. La gestion efficace des établissements de santé découle de l'optimisation des processus et de l'amélioration de la performance globale, nécessitant une réponse locale rapide en cas de perturbations. La réactivité est l'une des principales caractéristiques de performance du domaine médical.

Le bloc opératoire, qui peut représenter jusqu'à 40% des coûts des ressources d'un hôpital, est l'un des aspects les plus onéreux et complexes de la gestion hospitalière (Barbagallo .S., et al., 2015). L'organisation du bloc opératoire nécessite une attention minutieuse, car de nombreux facteurs doivent être soigneusement équilibrés. Les procédures chirurgicales sont planifiées selon un calendrier opératoire défini sur une période de temps spécifique. La création de ce calendrier est une tâche complexe et cruciale, qui a fait l'objet de nombreuses études. L'utilisation de planificateur multi-agents est l'une des stratégies potentielles pour optimiser la planification des interventions chirurgicales afin d'atteindre les objectifs établis.

Peu de travaux ont traité ce sujet au Maroc, et peu d'auteurs ont proposé le SMA ou le PMA comme solution au problème de la planification opératoire. La contribution de cette partie de notre étude est d'améliorer la qualité de la programmation chirurgicale après avoir élucidé sa conception classique actuelle, afin de maximiser l'occupation des salles opératoire et par conséquent satisfaire à la fois les chirurgiens et les patients. L'objectif de ce chapitre est d'élaborer un programme opératoire journalier puis hebdomadaire utilisant un PMA basé sur une approche d'IAD. Ce programme de caractère réactif et flexible, répond aux différentes perturbations pouvant empêcher le déroulement normal des activités chirurgicales du bloc opératoire.

En effet, nous allons présenter un outil d'aide à la planification et à l'ordonnancement du bloc opératoire, dont l'aboutissement final de sa procédure est de maximiser l'occupation des salles opératoires en tenant compte de la satisfaction des équipes chirurgicales. Pour cela, nous décrivons un planificateur multi-agents permettant d'allouer des interventions chirurgicales aux équipes chirurgicales appropriées dans les salles opératoires à qui elles sont dédiées sur une période d'une journée puis sur une période d'une semaine, tout en comparant le programme hebdomadaire obtenu par le PMA avec les résultats ; de la même simulation ; obtenus par un modèle mathématique MILP que nous avons formulé.

5.2 Problématique du service étudié

L'objectif principal du processus du bloc opératoire est de respecter la planification et l'ordonnancement des interventions chirurgicales tout en faisant face aux différents aléas pouvant entraver cette procédure. La question primordiale qui se pose autour de ce point est : comment peut-

on optimiser le processus du bloc opératoire tout en tenant compte du caractère incertain lié à l'activité chirurgicale ?

Pour clarifier le problème que nous proposons de résoudre, nous avons réalisé une étude au service de chirurgie orthopédique B4 du CHU Hassan II de Fès - Maroc.

En mode manuel, le responsable du bloc définit un planning qui est un moyen d'une grande aide quand le déroulement normal du programme opératoire est respecté. Vue les perturbations, très fréquentes, le manager du bloc fait une pause dans la planification afin de rectifier le planning déjà établi. Ceci aura des répercussions négatives sur la fluidité du bloc opératoire, le rendement des équipes chirurgicales ainsi que sur les listes d'attente des patients à opérer et sur les questionnaires du bloc qui auront face à des éventuelles complications organisationnelles accrues (SOUALFI.O. H. et al., 2023).

Le problème des approches de gestion déjà proposées, réside dans l'incompatibilité des modèles théoriques avec les nombreuses réalités fonctionnelles du processus. De nombreuses hypothèses simplificatrices sont faites pour rendre le modèle mathématiquement traitable. Même les modèles stochastiques, souvent complexes, censés prendre en compte des événements incertains, ne considèrent qu'un sous-ensemble réduit de ces événements. En effet, les approches incomplètes et rigides avec des hypothèses irréalistes ont conduit à une gestion inefficace sur le terrain (Saleh, B. B. et al., Avril 2018).

Notre motivation est fondée sur la valeur ajoutée que peut rapporter un intelligent outil d'aide à la planification opératoire dans notre contexte marocain, en particulier dans certains hôpitaux publics, qui assurent des soins pour un nombre important des patients, malgré les contraintes de ressources humaines et parfois matérielles, ce qui va optimiser d'avantage la gestion des blocs opératoires marocains.

5.3 Modèle PMA proposé pour une planification journalière du bloc opératoire

5.3.1 Rôle des différents agents

La planification multi-agent étend la planification automatisée classique centrée en répartissant plus ou moins la tâche de planification entre plusieurs agents qui travaillent ensemble pour concevoir un planning commun performant.

Nous partons du principe que tous les agents sont entièrement coopératifs et engagés dans l'élaboration conjointe d'un plan distribué pour atteindre notre objectif commun. Dans cette optique, nous sélectionnons une stratégie de planification parmi trois couches de coordination distincts, en définissant les degrés d'autonomie ou de coopération nécessaires.

La première couche physique contient les ressources humaines et les salles opératoires. Les deux autres couches comprennent : la couche d'IAD impliquant un PMA et la couche médiatrice fournissant des interfaces entre le PMA et la couche physique (Figure 5.1) (Soualfi.O. H. et al., 2023).

Notre solution, la couche intermédiaire, crée une table de correspondance entre la couche physique et la couche du système multi-agents. Elle héberge les données spécifiques de la couche physique nécessaires à leur représentation précise par le planificateur multi-agents.

En outre, elle comprend les interfaces logiques qui relient ces deux couches. Le planificateur multi-agents est construit sur la plateforme JADE, les modules d'interface pour la couche physique étant

développés en Java.

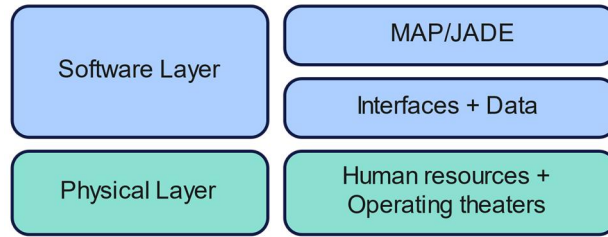


Figure 5.1 : Abstraction de la structure de la solution PMA

Le PMA est composé de quatre types d'agents (Figure 5.2), à savoir: Surgeon-Team- Agent (équipe A, équipe B, équipe C et équipe D), Manager Agent, DataBase Agent et Room Agent (Main Room, Ambulatory Room et Emergency Room) (Soualfi.O. H. et al., Janvier 2023).

- ✚ **Manager Agent** est l'agent maître qui coopère avec tous les autres agents afin d'assurer la planification du bloc opératoire, tenant compte des critères prédéfinis. Après une analyse de toutes les propositions des agents salles opératoires (Room AGENT), Manager AGENT affecte pour l'équipe de chirurgien demandeur (Team A par exemple), le créneau le plus adéquat possible depuis Room AGENT, en tenant compte des détails et des contraintes (obtenu depuis DataBase AGENT) de chaque intervention.
- ✚ **Surgeon Agent** représente une équipe de chirurgien d'une spécialité déterminée. Cet agent demande au Manager AGENT de faire la planification hebdomadaire de son équipe ou de refaire cette planification s'il y aura un incident avant, au cours ou après une intervention. Il récupère son calendrier d'intervention avec tous les détails et les contraintes (s'il en existe) concernant chaque intervention.
- ✚ **Room Agent** représente une salle de chirurgie physique un jour donné. Chaque Room AGENT est responsable de l'établissement de son plan individuel en collaborant avec le Manager AGENT. Chaque salle opératoire calcule le coût virtuel de chacun de ces créneaux horaires encore disponibles et pouvant convenir à la requête du Manager AGENT. Il communique cette valeur au Manager AGENT dans le but de prendre la bonne décision.
- ✚ **DataBase Agent** est une base de données dont laquelle on trouve toutes les informations (date, durée, type, équipement, ressources humaines et contraintes de l'intervention) nécessaires de chacun des interventions prévues. Ces données peuvent être extraites dans un format prédéfini.

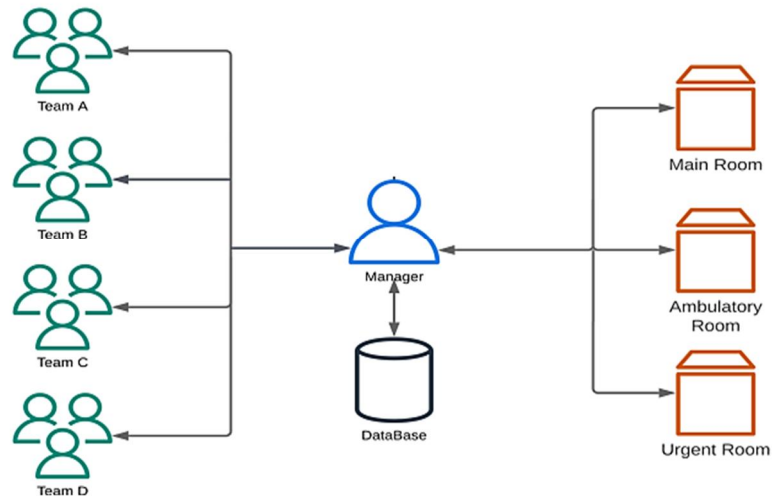


Figure 5.2 : Architecture PMA pour la planification journalière du bloc opératoire

En plus des agents de la solution PMA, JADE possède trois agents principaux (nécessaire aux normes FIPA):

- ♦ **DF** (Directory Facilitator) fournit un service de pages jaunes à la plate-forme;
- ♦ **ACC** (Agent Communication Channel) gère la communication entre les agents ;
- ♦ **AMS** (Agent Management System) supervise l'enregistrement des agents, leur authentification, leur accès et l'utilisation du système.

Ces trois modules sont activés à chaque démarrage de la plate-forme JADE.

5.3.2 Contraintes de la planification journalière

L'agent Manager AGENT doit prendre en considération certaines contraintes ; pour atteindre l'objectif principal de notre travail ; à savoir :

- ♦ Minimiser le temps d'attente entre deux interventions chirurgicales réalisées dans la même salle.
- ♦ Chaque équipe chirurgicale doit opérer un seul patient dans la même plage horaire.
- ♦ Maximiser l'occupation des blocs opératoires afin d'alléger les longues listes d'attente des patients.

5.3.3 Algorithme PMA journalier

Lorsque l'agent Manager reçoit une demande de réservation de la part d'un agent Surgeon (l'équipe A par exemple), il enrichit la demande avec des informations obtenues de l'agent DataBase concernant les préférences, les contraintes et le type de salle. Il lance un appel d'offres (Call For Proposal) aux agents Room (Main Room, Ambulatory Room and Emergency Room). Chaque Room calcule le coût virtuel de chacun de ces créneaux horaires encore disponibles et qui peuvent convenir pour répondre à l'agent Manager en indiquant le coût virtuel correspondant. L'agent Manager analyse les réponses reçues et décide de choisir celle qui propose le coût virtuel le plus faible et qui respecte les contraintes liées à notre objectif. Il informe les agents Room de sa décision et demande au gagnant d'inclure cette réservation, puis confirme la réservation de l'agent Surgeon Team. En cas d'incident entraînant un

retard ou même une annulation de l'intervention, l'agent DataBase informe l'agent Room de sa décision. L'agent DataBase en informe l'agent Manager afin qu'il puisse reprogrammer les interventions ou même les salles opératoires (si une salle est devenue indisponible par exemple). L'agent Manager va relancer un nouvel appel d'offres aux agents Room et puis il va envoyer une notification à l'agent Surgeon pour lui indiquer la nouvelle planification (Figure 5.3).

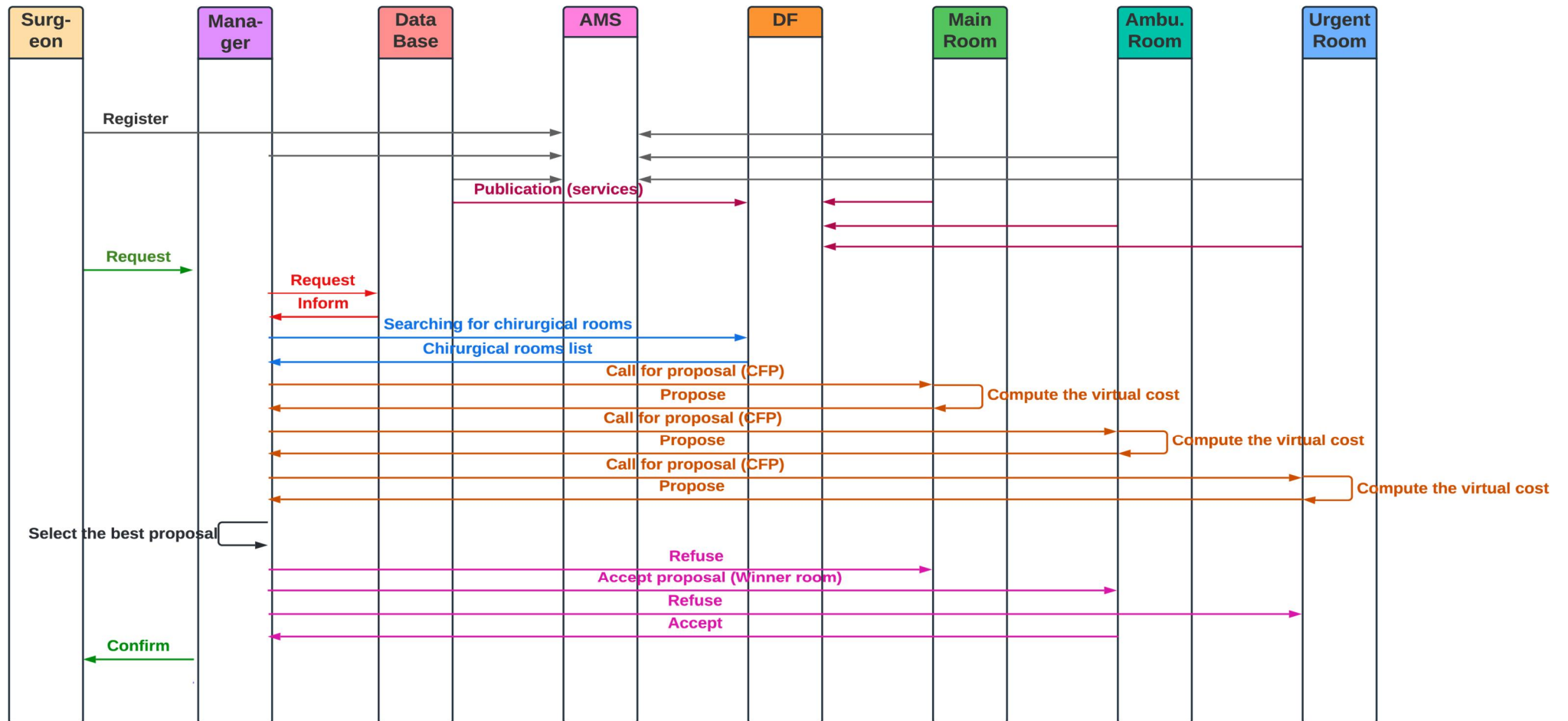


Figure 5.3 : Interactions des agents du PMA journalier

5.3.4 Résultats de la simulation journalière

Pour tester l'efficacité de notre algorithme, nous avons pris le cas du service de chirurgie orthopédique B4 du CHU Hassan II de Fès (Maroc). Ce service contient quatre équipes de chirurgiens utilisant trois salles : Main Room, Ambulatory Room and Emergency Room. Nous allons réaliser le planning opératoire journalier ; d'une seule équipe chirurgicale ; répondant aux incidents éventuels.

La plateforme utilisée (JADE) est composée de conteneurs d'agents qui peuvent être distribués sur un réseau. Les agents vivent dans les conteneurs qui sont des processus java qui fournissent tous les services nécessaires pour l'hébergement et l'exécution des agents. La plateforme doit disposer d'un conteneur principal qui représente le point de démarrage (Figure 5.4).

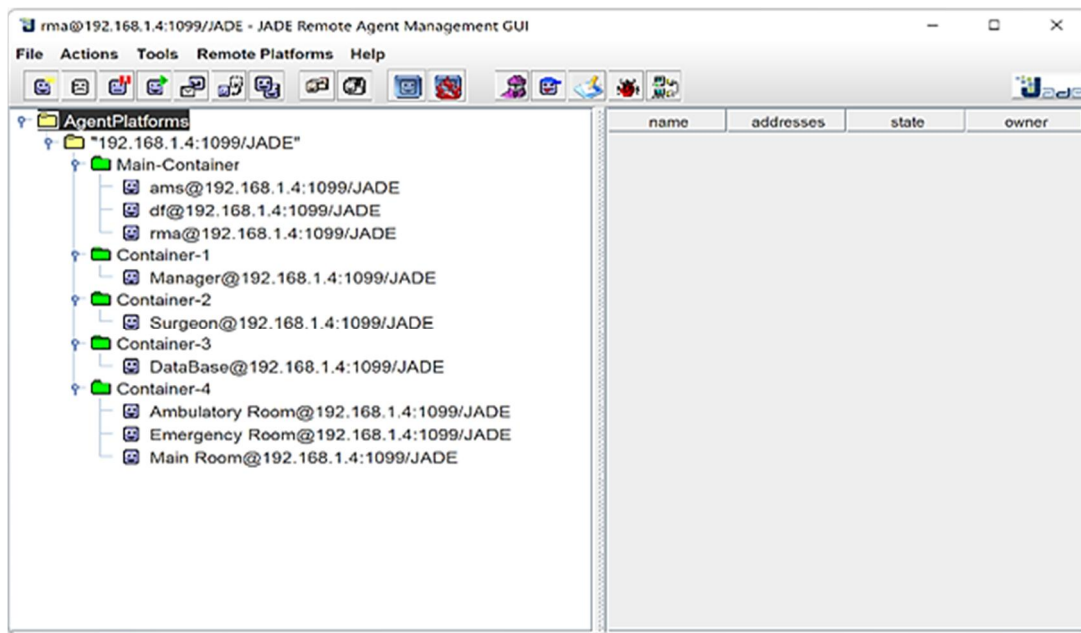


Figure 5.4 : Agents du planificateur multi-agents JADE

Nous pouvons remarquer l'apparition d'un nouvel agent dans le Main-Container : il s'agit de l'agent "RMA". L'agent de surveillance à distance (RMA) fournit une console graphique permettant de surveiller et de contrôler la plateforme et, en particulier, le cycle de vie de ses agents. Nous avons regroupé les trois agents des blocs opératoires dans un seul conteneur : "Container-4" (Figure 5.4).

Chaque équipe peut demander une planification grâce à l'agent « Surgeon-Team », en indiquant juste le nom de son équipe (Figure 5.5).

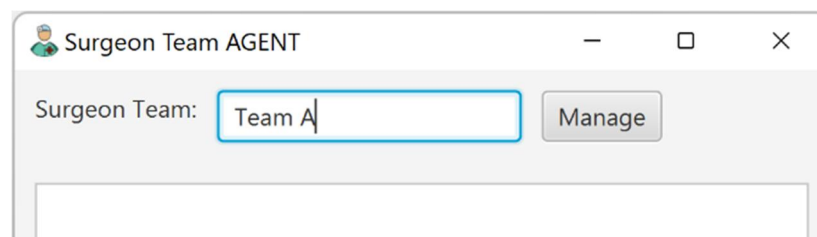


Figure 5.5 : L'agent Surgeon-Team du PMA

Nous avons pris comme exemple deux jours de la semaine (Lundi et Mardi) afin de réaliser le planning opératoire du Team A. Lorsque l'agent Manager reçoit la requête depuis l'agent Surgeon (bouton « Manage » de la figure 5.5), il cherchera le meilleur créneau possible dans l'agent Room pour satisfaire cette demande et donner le planning opératoire (P1) du jour demandé (Figure 5.6).

The screenshot shows a window titled "Surgeon Team AGENT" with a "Surgeon Team:" dropdown set to "Team A" and a "Manage" button. The main content area displays a list of interventions under the heading "*** Surgeon Team AGENT scheduling ***".

Intervention	Date	Duration	Room	Type	Equipment	Resources	Constraints
First Intervention	Monday(AM), August 01th 2022	2h30min	Main Room	Scheduled	Standard	1su, 1an, 3nu, 1tr	none
Second Intervention	Monday(AM), August 01th 2022	2h	Main Room	Scheduled	Standard	1su, 1an, 3nu	1 missing 'medical transport agent'
Third Intervention	Monday(PM), August 01th 2022	1h30min	Ambulatory Room	Ambulatory	Standard	1su, 1an, 3nu, 1tr	none
Fourth Intervention	Monday(PM), August 01th 2022	45min	Ambulatory Room	Ambulatory	Standard	1su, 1an, 3nu, 1tr	1 missing 'nurse'

Figure 5.6 : Planning opératoire (P1) du Lundi concernant l'équipe A

Notez (partie « Intervention Humain Ressources » dans les détails de l'intervention) que:

- ✓ « su » : surgeon ;
- ✓ « an » : anesthésiste ;
- ✓ « nu » : nurse ;
- ✓ « tr » : agent de transport médical. En réponse à des incidents éventuels tels que : cas urgent, manque de personnel, manque du matériel adapté à la chirurgie, absence du patient, etc., survenant durant la même journée opératoire, le chirurgien reçoit une notification qui l'informe du changement imposé sur le planning opératoire (P1) (Figure 5.7).



Figure 5.7 : Notification du changement du planning opératoire

Le chirurgien doit consulter le nouveau planning opératoire (P2) pour l'exécuter (Figure 5.8). Ce changement est fait dans le but d'optimiser la planification opératoire et de garder son caractère dynamique et réactif en temps réel tout en évitant les différents types de pertes (de temps, de ressources humaines et matérielles ...).

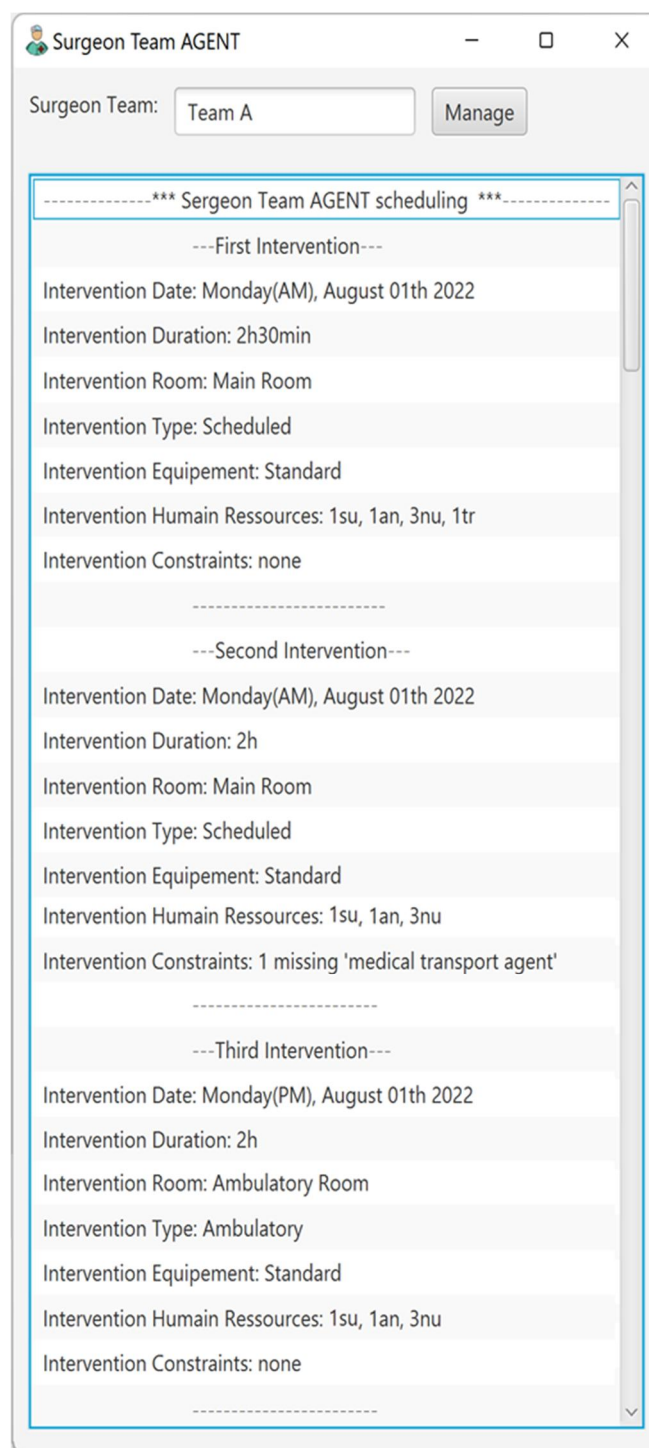


Figure 5.8 : Planning opératoire (P2) du Lundi concernant le Team A

On peut noter que la troisième intervention (d'une durée d'une heure et demie) et la quatrième intervention (d'une durée de 45 minutes) ont été remplacées par une seule intervention (d'une durée de deux heures). La cause était la déclaration d'absence du patient prévue pour la troisième intervention. Le PMA a donc reprogrammé cette procédure à mardi matin et la quatrième procédure à mercredi soir. Le PMA a donc profité de l'après-midi pour programmer une seule intervention de deux heures. A noter également que l'équipe chirurgicale a réalisé sa deuxième intervention malgré l'absence du médecin transporteur. On peut donc tolérer l'absence de ce personnel.

Concernant le planning du mardi (Figure 5.9), la première intervention s'est déroulée comme prévu par le PMA, tandis que la seconde a été réalisée dans la salle principale puisque la salle ambulatoire n'était plus disponible.

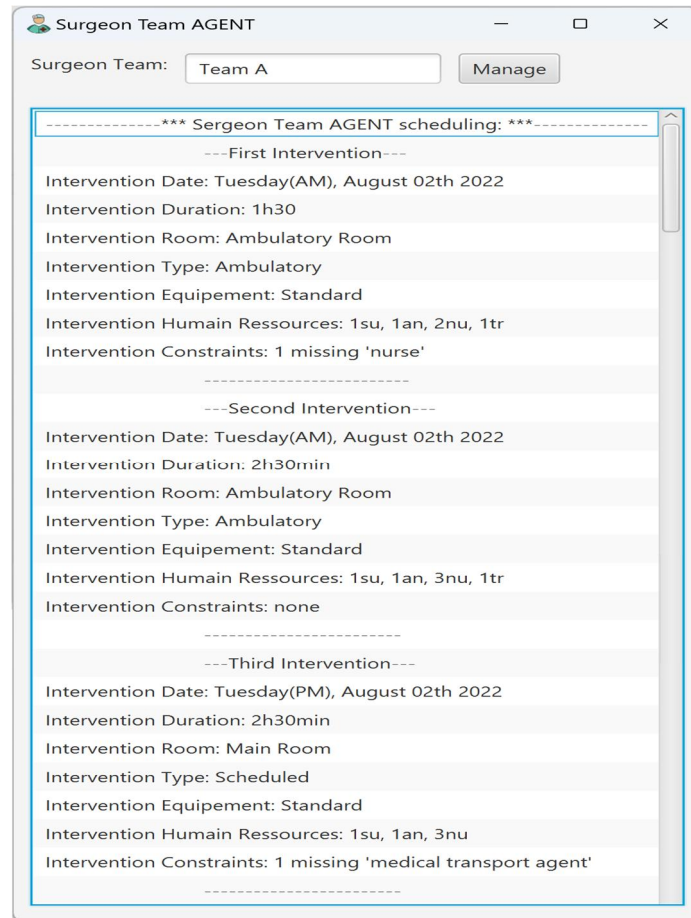


Figure 5.9 : Planning opératoire (P1) du Mardi concernant le Team A

Une troisième intervention d'une durée de deux heures et demie était prévue pour le lendemain, mais comme cette intervention nécessite la présence de tous les membres de l'équipe, alors que l'incident de deux infirmières seront absentes, le PMA a pris la décision de substituer cette intervention par deux interventions où l'absence de ces infirmières n'aura pas beaucoup d'impact comme dans le premier cas (Figure 5.10).

On peut remarquer que le planning d'exploitation (P2) obtenu répond aux imprévus, respecte les contraintes définies et garde son critère dynamique et réactif face aux différentes perturbations arrivant en temps réel, ce qui est en accord avec l'objectif visé.



Figure 5.10 : Planning opératoire (P2) du Mardi concernant le Team A

5.4 Modèle PMA proposé pour une planification hebdomadaire du bloc opératoire

5.4.1 Rôle des différents agents

Le PMA est composé de cinq types d'agents (Figure 5.11), à savoir : Surgeon-Team- Agent, Manager Agent, DataBase Agent et Room Agent qui sont déjà définis dans la section 5.3 (Soualfi.O. H. et al., 2023), et le Rooms Planning Agent qu'on peut décrire comme un agent qui établit le calendrier global de planification de toutes les salles du bloc opératoire. Il contient toutes les plages horaires pendant lesquelles les équipes chirurgicales utilisent ces salles sur une période d'une semaine. Cet horaire peut être ajusté en cas d'incident.

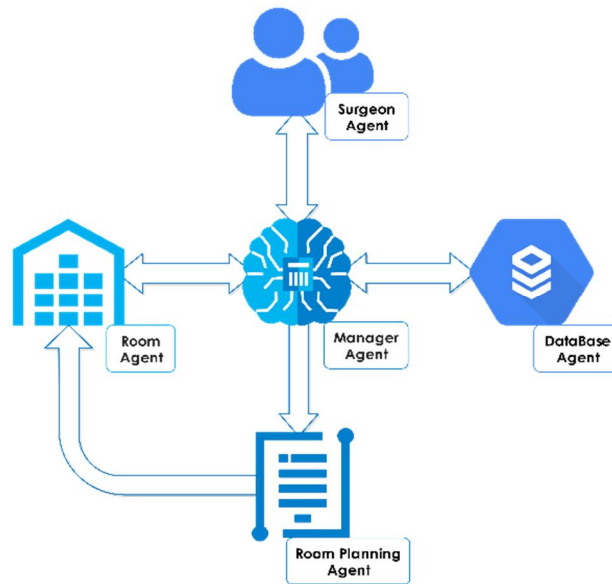


Figure 5.11 : Structure PMA pour la planification hebdomadaire du bloc opératoire

5.4.2 Contraintes de la planification hebdomadaire

L'Agent Manager est tenu de prendre en compte certains critères dans le but d'atteindre les objectifs fixés (maximiser l'occupation des salles opératoires en tenant compte de la satisfaction des équipes chirurgicales). Ces deux objectifs majeurs sont regroupés dans les points suivants :

Pour maximiser l'occupation des salles opératoires, Manager Agent doit chercher à :

- ◆ Minimiser le temps d'attente entre deux interventions dans la même salle.
- ◆ Réduire le délai entre le jour de la consultation et le jour de l'intervention.
- ◆ Minimiser la différence entre le nombre des interventions chirurgicales à réaliser et l'offre hebdomadaire du bloc opératoire.
- ◆ Pour assurer la satisfaction des équipes chirurgicales, Manager Agent doit s'assurer que :
- ◆ Chaque équipe chirurgicale doit faire la garde du Week-end une fois par mois.
- ◆ L'équipe chirurgicale qui fait la garde doit effectuer la consultation le lendemain (autrement dit : ne fera pas le bloc)
- ◆ L'équipe chirurgicale qui fait la garde deux fois durant la semaine ne doit pas prendre la garde du Week-end chaque semaine.

5.4.3 Algorithme PMA amélioré hebdomadaire

La figure 5.12 résume le processus de communication et de négociation entre les différents agents au sein du planificateur multi-agents proposé. Ces agents communiquent en suivant les étapes séquentielles suivantes :

- ✚ **Étape 0 :** Dans un premier temps, tous les agents doivent s'inscrire auprès de l'agent AMS (le système de gestion des agents est l'autorité qui gère l'accès et l'utilisation de la plateforme) et publier leurs services auprès de l'agent DF (le facilitateur d'annuaire

est l'agent qui fournit un service de pages jaunes, grâce auquel un agent peut trouver d'autres agents fournissant les services dont il a besoin pour atteindre ses objectifs).

- ✚ **Étapes 1, 2 et 3 :** L'agent Manager reçoit une demande de réservation de la part d'un agent Surgeon-Team et la traite à l'aide des informations fournies par l'agent DataBase et l'agent DF ;
- ✚ **Étapes 4 , 5 et 6 :** L'agent Manager envoie un appel d'offres à l'agent Room (salle principale, salle ambulatoire et salle d'urgence). Chaque salle calcule le coût virtuel de chaque créneau horaire susceptible de répondre à la demande de l'agent Manager et renvoie cette information à l'agent Manager.
- ✚ **Étape 7 :** L'agent Manager analyse les réponses, sélectionne celle qui offre le coût le plus bas et respecte les contraintes prédéfinies. Ensuite, l'agent Manager notifie sa décision à l'agent Room et demande à la salle gagnante d'inclure cette réservation.
- ✚ **Étapes 8 et 9 :** L'agent Manager confirme la réservation initiale à l'agent Surgeon-Team. En outre, il communique les détails des interventions à l'agent Rooms Planning, qui inclut la réservation dans le programme global. Ce programme peut être modifié en fonction de circonstances imprévues.
- ✚ **Étape 10 :** Une fois le programme finalisé (après n itérations), l'agent Rooms Planning envoie la planification hebdomadaire à chaque salle opératoire (Agent Room) pour qu'elle soit mise en œuvre.

La figure 5.12 montre une demande d'itération et sa réponse. Les itérations de remplissage des réservations se poursuivent jusqu'à ce que toutes les demandes de programmation aient été satisfaites. En cas d'incident imprévu entraînant un retard ou une annulation de la procédure, l'agent DataBase informe l'agent Manager afin qu'il puisse reprogrammer l'intervention.

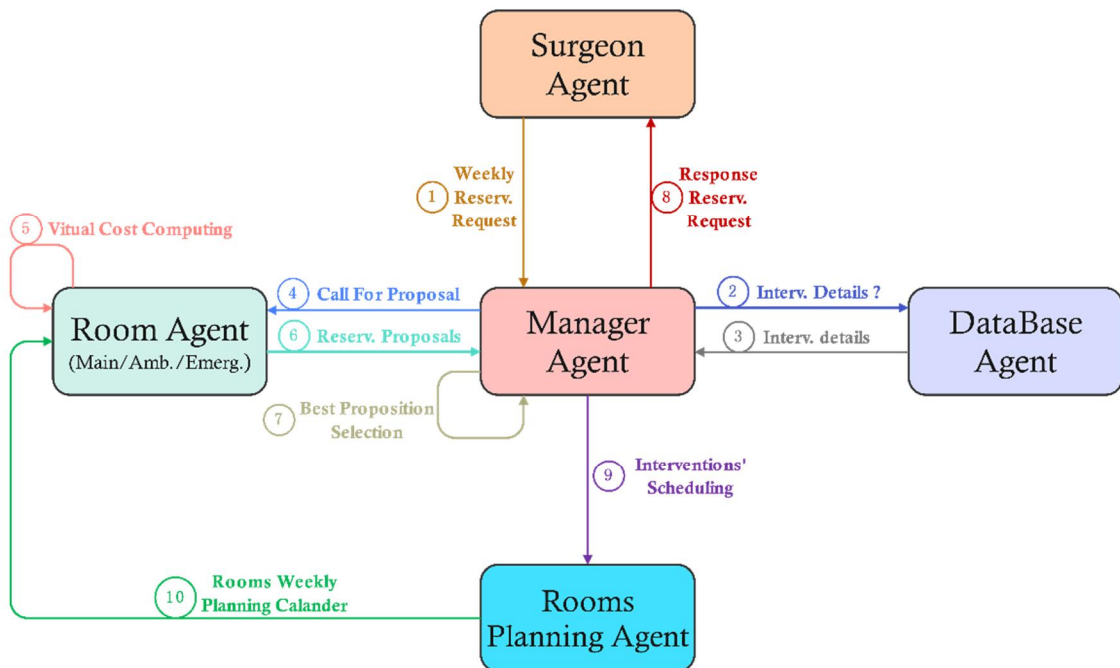


Figure 5.12 : Interactions des agents du PMA hebdomadaire

5.4.4 Résultats de la simulation hebdomadaire

Pour évaluer l'efficacité de l'algorithme suggéré, nous avons mené une étude de cas sur le même service de chirurgie orthopédique B4 du CHU Hassan II à Fès, au Maroc.

Quand l'agent Surgeon-Team émet une requête, l'agent Manager initie une procédure pour déterminer un créneau optimal dans l'agent Room pour répondre à cette requête. L'interface de l'agent Manager est dotée d'une fonctionnalité qui permet d'enregistrer toutes les interactions avec les autres agents (Figure 5.13).

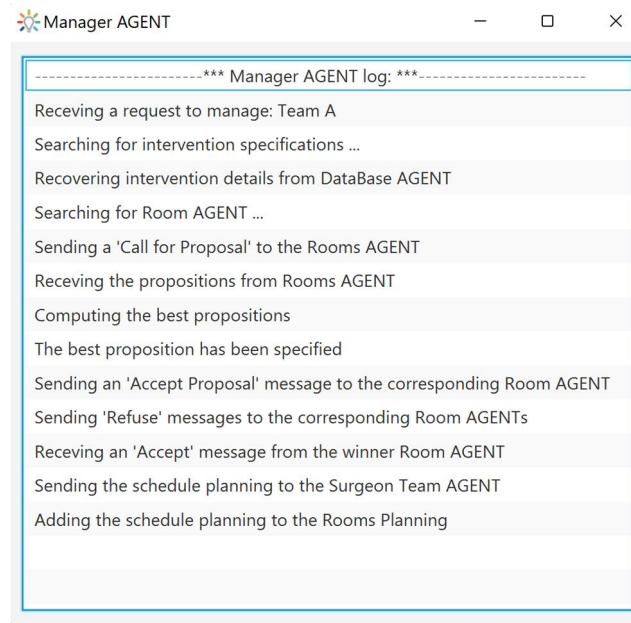


Figure 5.13 : Le journal de bord de l'agent Manager

L'interface de l'agent Room permet aussi de loguer les interactions des trois salles avec l'agent Manager (Figure 5.14) :

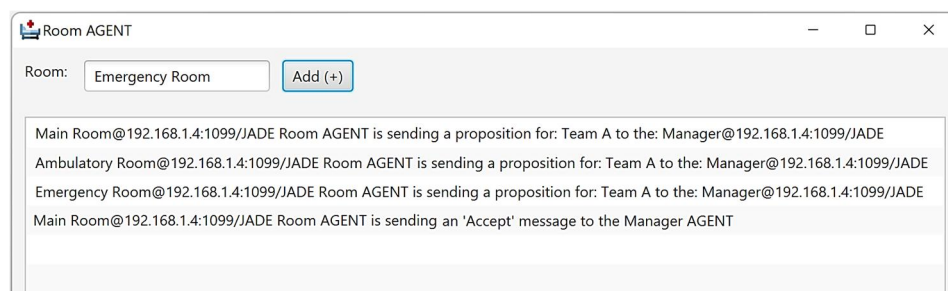


Figure 5.14 : Interactions de l'agent Room avec l'agent Manager

L'agent Sniffer nous permet d'observer la majorité des interactions (messages) entre les différents agents de la plateforme JADE. Lorsque l'utilisateur décide de renifler un agent ou un groupe d'agents, chaque message dirigé vers ou depuis cet agent ou groupe d'agents est suivi et affiché dans l'interface graphique du renifleur (Figure 5.15).

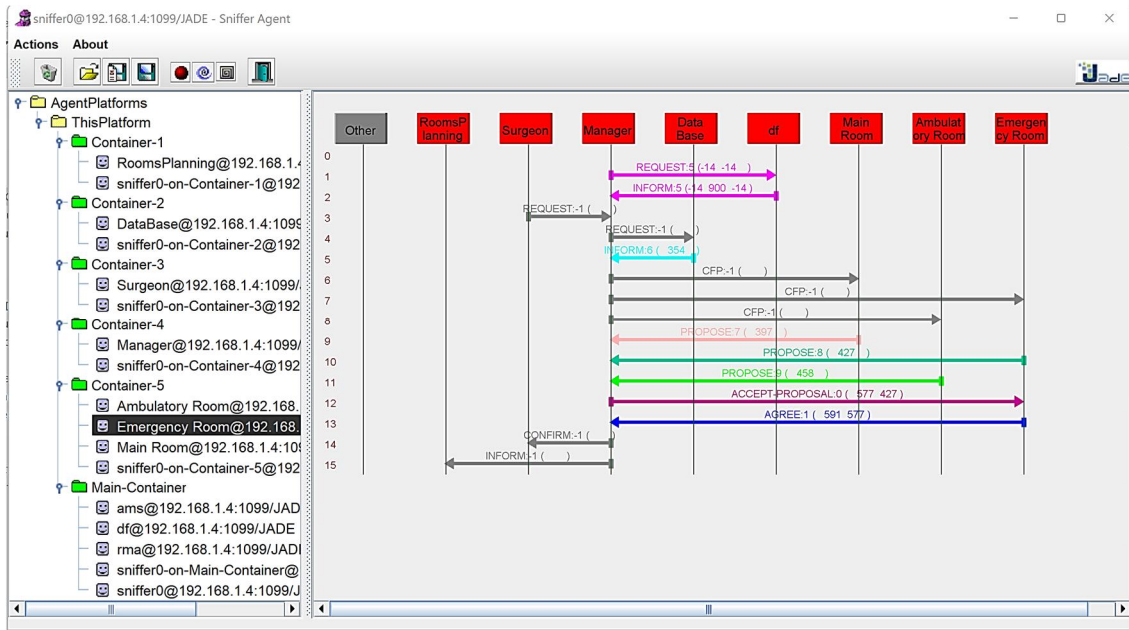


Figure 5.15 : L'agent Sniffer de JADE

Une fois le programme finalisé, chaque équipe chirurgicale reçoit son plan hebdomadaire individuel. Le jour de l'intervention, divers événements imprévus peuvent survenir, tels que des dysfonctionnements de l'équipement ou l'indisponibilité du chirurgien, qui peuvent perturber les opérations chirurgicales et nécessiter des modifications du programme. Nous avons pris en compte certaines de ces perturbations potentielles afin de maintenir autant que possible le plan initial ou d'apporter des modifications partielles qui n'ont pas d'incidence sur les horaires des autres chirurgiens. Ce processus facilite la communication entre les chirurgiens, leur permettant de déclarer des périodes d'indisponibilité. Le planificateur multi-agents recherche un remplaçant pour l'équipe de chirurgiens disponible pendant cette période et envoie un message de confirmation. Si l'équipe chirurgicale remplaçante accepte, le programme reste inchangé. Si l'équipe chirurgicale refuse, le PMA tente d'identifier le créneau horaire disponible le plus proche.

L'agent Surgeon-Team est chargée de créer l'agenda hebdomadaire complet, en tenant compte de diverses spécificités pour chaque procédure, telles que : la date de rendez-vous, la durée, la nature de la procédure, les ressources humaines et matérielles nécessaires, et toutes les contraintes potentielles (figure 5.16).

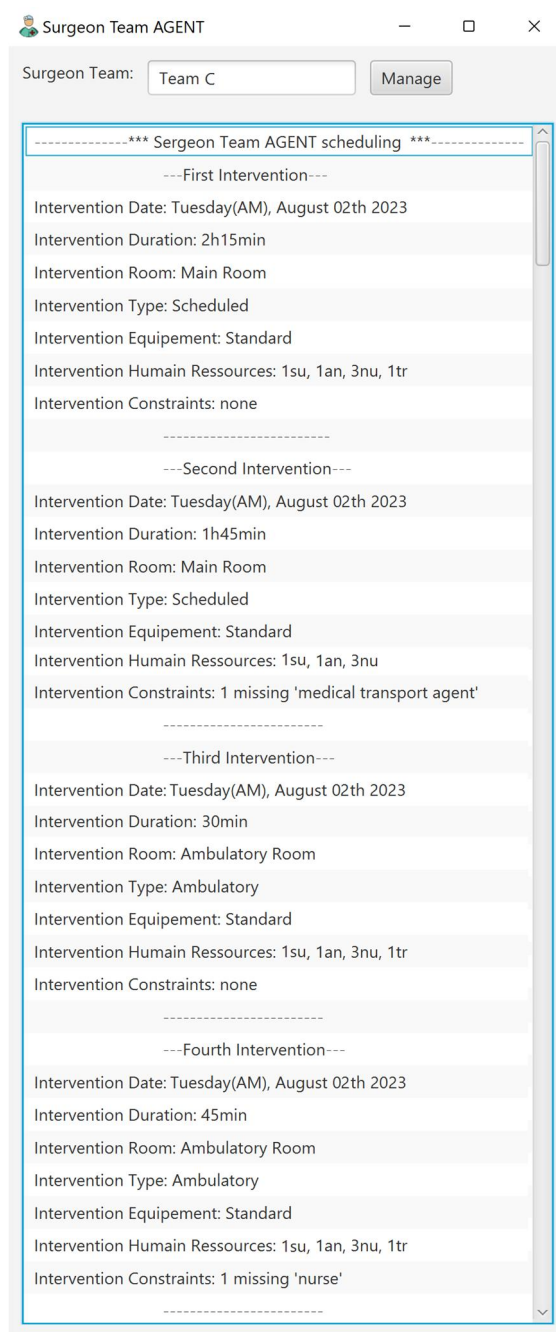


Figure 5.16 : Illustration pratique de la programmation journalière d'une équipe

Une fois que toutes les demandes de chaque équipe chirurgicale ont été satisfaites, l'agent Rooms Planning procède à l'intégration des programmes de toutes les salles d'opération dans le plan global.

La figure 5.17 présente le programme hebdomadaire complet des équipes chirurgicales opérant dans toutes les unités du bloc opératoire. Les cellules marquées d'un "I" indiquent les identifiants des différentes interventions attribuées aux équipes respectives (par exemple, "I6" correspond à la sixième intervention). Les durées de ces interventions sont indiquées sous ces cellules.

Il est évident que le calendrier complet respecte toutes les stipulations définies par le planificateur multi-agents, ce qui permet d'atteindre l'objectif fixé.

MAP Rooms Planning												
Room	Inter. details	Monday		Tuesday		Wednesday		Thursday		Friday		Week-End
		AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	
Main	Team ID	Team C	Team B	Team D	Team C	Team D	Team A	Team A	Team B	Team B	Team C	Not
ROOM	Inter. ID	I5-I6	I1-I2	I10	I13	I22-I19	I17	I25	I23	I29-I30	I28	Available
=====	Inter. dur.	2h15'+1h45'	1h+1h05'	3h30'	2h	3h+1h	2h10m	3h45'	2h10'	2h45'+1h10'	1h50'	=====
Ambulatory	Team ID	Team B	Team C	Team C	Team D	Team A	Team D	Team B	Team A	Team C	Team B	NoT
ROOM	Inter. ID	I9-I7-I8	I3+I4	I14-I15	I11-I12	I20-I22	I16-I18	I24-I27	I26	I32-I35-I33-I34	I31-I36	Available
=====	Inter. dur.	1h15'+1h+1h	30'+45'	2h15'+1h45'	1h+45'	2h10'+2h	45'+50'	2h15'+1h50'	2h	1h+45'+45'+45'	1h+30'	=====
Emergency	Team ID	Team A	Team A	Team B	Team B	Team C	Team C	Team D	Team D	Team A	Team A	Team B
ROOM	Inter. ID	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.
=====	Inter. dur.	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable

Figure 5.17 : Programme opératoire hebdomadaire global obtenu par la solution PMA

5.5 Discussion

Peu d'études traitent de la planification des blocs opératoires au Maroc, tant dans le secteur public que privé. Cette étude souligne l'importance de la planification chirurgicale stratégique pour maximiser l'utilisation des ressources humaines et la qualité des soins prodigués aux patients.

Le planning opératoire établi par les méthodes conventionnelles avec des données non réelles ne prend pas en compte la variabilité hebdomadaire, pourtant fréquente, des préférences des chirurgiens quant à leur disponibilité pour une période donnée de la semaine, le nombre d'heures accordées à une équipe donnée de chirurgiens ou à une spécialité donnée, la durée des vacances et la disponibilité d'une salle d'opération spécifique pour une équipe spécifique. En effet, certains auteurs (Saleh. B. B. et al., 2021) discutent des caractéristiques de la procédure de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) pour établir un planning des blocs opératoires. Ils proposent ensuite une approche alternative basée sur l'IAD pour établir un programme chirurgical optimal. Les tests de simulation sur un scénario de test utilisant des données réelles sont effectués par les deux méthodes. Les résultats ont démontré la supériorité du modèle IAD (Saleh. B. B. et al., 2021).

Les travaux de (Bou Saleh, B. et al., 2019) se concentrent sur un système multi-agent pour la planification dynamique intégrée d'un bloc opératoire. Les agents coopèrent et coordonnent leurs actions pour trouver une planification quasi-optimale globalement efficace, capable de maintenir l'optimisation de la planification initiale tout en prenant en compte les perturbations provoquées par la survenance, en temps réel, d'urgences inattendues. Le modèle de contrôle proposé est conçu pour améliorer simultanément l'efficacité et la réactivité du bloc opératoire dans la pratique de la chirurgie d'urgence.

D'autres chercheurs (Chraïbi. A. et al., 2015) ont proposé une nouvelle approche utilisant un système décisionnel multi-agents (DMS) basé sur un problème d'affectation quadratique (QAP) et une programmation linéaire en nombres entiers (MILP) pour un grand problème d'aménagement dynamique du bloc opératoire. L'objectif était de minimiser les coûts totaux de déplacement et les coûts de réorganisation en étudiant une disposition individuelle pour chaque période de temps distincte en fonction de la demande des patients. Le DMS génère des solutions efficaces dans un délai raisonnable et présente l'agencement final des salles d'opération via une interface graphique.

D'autres auteurs (Chaabane .S. et al., 2008) présentent et comparent deux méthodes de planification du bloc opératoire. Les deux méthodes considèrent différents types de contraintes mais l'objectif est de proposer une planification du bloc opératoire aux responsables du bloc opératoire. Pour éliminer les frais supplémentaires, une date d'hospitalisation flexible peut être proposée. Une méthode mixte de la Méthode1 et de la Méthode2 peut être suggérée. Les résultats obtenus dépendent de la qualité de l'ensemble de données utilisées. Une mauvaise information sur la planification du bloc opératoire ne peut pas permettre une bonne planification.

La planification multi-agents est utilisée soit pour produire un programme distribué, soit pour produire un programme commun à plusieurs agents.

La planification multi-agents a un double avantage dans notre contexte applicatif. Au niveau macro, ils permettent de construire des systèmes distribués et coopératifs. Leur coopération permet la réalisation d'une tâche ou la poursuite d'un objectif commun. Au niveau micro, la technologie agent permet d'envisager chaque dispositif comme une entité autonome dotée d'une mission et capable de la réaliser en coordination avec d'autres.

Notre travail est reposé au début sur la construction d'une planification quotidienne, automatique, dynamique et en temps réel du bloc opératoire, qui prend en compte les différents incidents et perturbations possibles et fréquents affectant le déroulement ordinaire du processus opératoire.

Notre recherche est orientée par la suite vers le développement d'un planning hebdomadaire, automatisé et adaptable pour le bloc opératoire. Ce planning présente certaines limites : il ne couvre pas les phases peropératoire et postopératoire du processus du bloc opératoire. En revanche, il se concentre sur la phase préopératoire, en tenant compte des changements potentiels et des perturbations fréquentes qui peuvent avoir un impact sur le déroulement normal des procédures chirurgicales. Elle prend également en compte l'utilisation des salles opératoires et la satisfaction des équipes chirurgicales.

Nos résultats ont permis d'améliorer les performances des équipes chirurgicales, de sorte que l'activité globale du service étudié s'est améliorée et que les listes d'attente des patients ont également été allégées. A la lumière de ces résultats satisfaisants obtenus dans un seul service de chirurgie, nous recommandons l'utilisation et la généralisation de cette planification opératoire basée sur la DAI dans d'autres services de chirurgie ou d'autres structures hospitalières. Notre planification réalisée à l'aide d'un PMA basée sur la IAD optimise les performances du bloc opératoire et contribuant ainsi à l'amélioration de la prise en charge des patients.

5.6 Evaluation des performances de la solution PMA via la modélisation

MILP

5.6.1 Travaux connexes

La plupart des recherches sur la gestion du bloc opératoire se concentrent uniquement sur la phase pré-opératoire (Behmanesh, R. et al, 2019). Selon (Behmanesh, R. et al, 2019) , il existe peu de littérature sur la gestion stochastique d'un bloc opératoire multi-étapes et multi-ressources. Cette lacune devient plus évidente lorsque l'on considère la modélisation mathématique.

Selon les étapes considérées dans une salle d'opération, différents approches ont été proposés (Behmanesh, R. et al, 2019). Par exemple, Augusto et al. (Augusto, V. et al, 2010) ont modélisé le problème de l'ordonnancement des cas chirurgicaux (OCC) comme un atelier de production sous une politique d'ordonnancement ouverte. D'autres recherches (Pham, D. N. et al., 2008) ont mis en évidence les similitudes entre l'environnement d'ordonnancement d'une salle d'opération et l'ordonnancement d'un atelier. De même, le problème OCC dans le cadre d'une stratégie d'ordonnancement ouverte a été modélisé sous la forme d'un ordonnancement en atelier flexible (Lee, S., & Yih, Y., 2014) et (Xiang, W. et al., 2015).

Les durées dans les salles d'opération ne sont pas précises et, en raison des conditions incertaines du temps de service pour les opérations dans le problème OCC, il est conseillé d'inclure des données probabilistes dans ce problème (Behmanesh, R. et al, 2019) . Lamiri et al (Lamiri, M. et al., 2008) ont proposé une nouvelle programmation mathématique stochastique. Wang et al (Wang, S. et al, 2016) ont étudié le problème de la programmation de salles d'opération optimisée de manière déterministe dans un cadre spatialement distribué, avec des durées chirurgicales incertaines, des arrivées d'urgence et des ressources en aval limitées. Les auteurs ont développé une approche d'optimisation et de simulation et ont montré que le modèle déterministe de Roshanaei et al (Roshanaei, V. et al, 2017) peut conduire à 23% d'annulations chirurgicales.

L'incorporation directe de la stochasticité dans les modèles mathématiques rend le problème extrêmement difficile à résoudre (Behmanesh, R. et al, 2019). L'utilisation d'ensembles flous dans les

problèmes d'ordonnancement ne concerne pas seulement l'ordonnancement sous des contraintes flexibles, mais aussi l'ordonnancement sous des informations incomplètes ou imprécises. Gonzalez-Rodriguez et al (Gonzalez-Rodriguez, I. et al, 2009) et (Gonzalez-Rodriguez, I. et al, 2008) affirment qu'il est possible de modéliser les durées mal connues dans les problèmes d'ordonnancement d'atelier à l'aide d'ensembles flous, car la logique floue exige moins de données ; elle réduit donc les difficultés de calcul. En outre, l'estimation de la distribution de probabilité des variables est très difficile en raison du manque de données historiques et, par conséquent, Wang et al (Wang, L. et al, 2013) préfèrent utiliser l'expérience et le jugement subjectif de la direction ainsi que la théorie des ensembles flous plutôt que la théorie traditionnelle des probabilités.

La plupart des études portant sur la gestion des blocs opératoires se concentrent sur l'optimisation à objectif unique (Marques, I. et al, 2012) ou sur l'optimisation multi objectif pondérée (Roshanaei, V. et al, 2017). Il existe cependant peu d'études qui prennent en compte des fonctions objectives conflictuelles (Behmanesh, R. et al, 2019). Vlah Jerić et Rui Figueira (Vlah Jerić, S. et al, 2010) ont proposé un système d'aide à la décision pour un ordonnancement bi-objective des cas chirurgicaux (OBOCC). Marques et Captivo (Marques, I., & Captivo, M. E., 2015) ont considéré l'optimisation simultanée des deux fonctions objectives conflictuelles : Maximisation de la salle d'opération et Maximisation du débit de la salle d'opération. Les auteurs ont montré comment il est possible de trouver un compromis entre ces deux fonctions objectives. Xiang (Xiang, W., 2017) a construit un modèle MILP pour minimiser trois objectifs.

La programmation en nombres entiers mixtes (MIP) et la programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) ont été largement utilisées comme technique d'optimisation pour améliorer l'efficacité des blocs opératoires. (Luo, L. et al, 2016) a utilisé cette approche pour comparer deux types de modèles d'ordonnancement, à savoir le modèle d'ordonnancement glissant et le modèle d'ordonnancement non glissant, ce qui a permis de réduire le temps d'inactivité généré par les processus d'ordonnancement actuels (Mc Mahon, D. et al, 2019).

Les SMA ont été développés dans le contexte de l'intelligence artificielle distribuée et consistent en un ensemble d'agents coopératifs distribués, chacun d'entre eux agissant de manière autonome (Chraïbi, A. et al, 2014). Ils proposent une méthode alternative pour aborder plusieurs défis complexes de manière distribuée, où les décisions sont prises en fonction de l'analyse d'informations provenant de différentes origines et de types variables. (Wooldridge, M., & Jennings, N. R., 1995).

Les SMA sont utilisés dans différents domaines (Chraïbi, A. et al, 2014). Dans le domaine de la santé, Isern et al. (Isern, D. et al, 2010) ont présenté une revue de la littérature sur les applications des agents, regroupant plus de 15 travaux et classant chacun d'entre eux en fonction de l'objectif principal des systèmes. González-Vélez et al (González-Vélez et al., 2009) ont présenté un système distribué d'aide à la décision basé sur des agents pour le diagnostic et le pronostic de tumeurs cérébrales développé par le projet HEALTH AGENTS. Koutkias et al (Koutkias, V. G. et al, 2005) ont présenté un SMA interactif pour la gestion des maladies chroniques des patients avec l'objectif de détecter les cas anormaux et d'informer le personnel pour améliorer les services de contrôle, de surveillance et d'éducation d'un centre de contact médical générique. Les avancées technologiques actuelles incitent donc les hôpitaux à investir dans ces solutions intelligentes afin d'optimiser leurs processus et d'accroître leur efficacité (Chraïbi, A. et al, 2014).

Certains auteurs (Chraïbi, A. et al, 2014) proposent une architecture SMA offrant une solution pour un problème complexe et de grande taille d'aménagement de salle d'opération. Chraïbi et al (Chraïbi, A. et al, 2015) présentent un SMA intelligent utilisant une architecture multi-agents pour résoudre le problème d'aménagement dynamique des blocs opératoires tout en respectant les contraintes imposées par les hôpitaux, qui disposeront ainsi d'un outil interactif fournissant une solution efficace à la planification de l'aménagement des installations pour concevoir leur salle d'opération en un temps

réduit tout en optimisant leurs dépenses.

Les travaux utilisant les SMA sont de plus en plus nombreux, et visent à découvrir de nouveaux domaines d'application et à proposer des méthodes intelligentes pour résoudre des problèmes complexes dans le cadre d'une architecture distribuée.

Dans les sous sections suivantes, nous formulons notre problème à l'aide d'un MILP et nous comparons les résultats trouvés par ceux du PMA. Ces deux outils apportent une solution au problème de la planification et d'ordonnancement des blocs opératoires.

5.6.2 Modèle MILP pour la planification des blocs opératoires

Nous rappelons que l'objectif principal de notre travail est de maximiser l'occupation des salles opératoires en tenant compte de la satisfaction des équipes chirurgicales. Cette section détaille la formulation mathématique suggérée pour le problème de planification du bloc opératoire, présentée sous la forme d'un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP).

5.6.2.1 Notation

Les notations des paramètres d'entrée et des variables employées dans ce document sont définies comme suit :

- N_i : Le nombre d'interventions chirurgicales à réaliser dans une semaine par toutes les équipes.
- S : L'ensemble des d'interventions chirurgicales en attente pour toutes les équipes.
- WO : L'offre hebdomadaire du bloc opératoire.
- DC : Le jour « d_0 » de la consultation où la date de l'opération a été définie.
- DI : Le jour de l'intervention où l'intervention chirurgicale sera effectuée.
- WT : Le temps d'attente entre deux interventions chirurgicales réalisées dans la même salle.
- T_d : L'équipe chirurgicale qui fait la garde le jour d.
- T_w : L'équipe chirurgicale qui fait la garde du Week-end.
- T' : L'équipe chirurgicale qui fait la garde deux fois durant la semaine.
- TI_d : L'équipe chirurgicale qui fait l'intervention programmée le jour d.
- $\tilde{T}$: $\tilde{T} = T_d \cup T_w \cup T' \cup TI_d$: l'ensemble des équipes chirurgicales.
- WE_i : Les quatre week-end de garde de chaque mois : $\{WE1; WE2; WE3, W4\}$
- P : La période de planification (exprimée en nombre de jours = 7 jours)
- D_r^d : La durée d'occupation d'une salle opératoire r le jour d.
- R : Nombre maximale des salles opératoires.
- W : Nombre maximale des semaines opératoires planifiées (exprimé en semaine)

5.6.2.2 Variable de décision

La variable de décision du modèle proposé est :

$$x_{r,d}^{t,w} = 1 \quad \text{si l'intervention du team } t \text{ est planifiée dans la salle } r \text{ le jour } d \text{ de la semaine } w ;$$

$$0 \text{ sinon.}$$

5.6.2.3 Fonction objective

La fonction objective vise la maximisation de l'occupation des salles opératoires en minimisant la différence entre le nombre des interventions chirurgicales à réaliser dans une semaine et l'offre hebdomadaire du bloc opératoire, en réduisant le délai entre le jour de la consultation et le jour de l'intervention, et en minimisant le temps d'attente entre deux interventions chirurgicales réalisées dans la même salle en tenant compte que le temps d'attente minimale est $W_{t0} = 20\text{min}$.

$$\text{Max} \sum_{d=1}^P \sum_{r=1}^R D_r^d = \sum_{d \in P} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \sum_{w \in W} \text{Min} \left\{ (WO - \sum_{i \in S} x_{r,d}^{t,w} N_i), WT - W_{t0}, (\sum_{i \in S} x_{r,d}^{t,w} DI - DC) \right\}$$

5.6.2.4 Contraintes

Les contraintes du modèle MILP sont présentées avec une description de chacune d'entre elle.

$$\sum_{r \in R} \sum_{d \in P} \sum_{w \in W} x_{r,d}^{t,w} \leq 1 \quad ; \quad t \in \tilde{T} \quad 5.6.2.4.1$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} x_{r,d+1}^{t,w} = 0 \quad ; \quad w \in W, d \in P \quad 5.6.2.4.2$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{w \in W} x_{r,d}^{t,w} = 1 \quad ; \quad t \in Tw, d \in WEi \quad 5.6.2.4.3$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{d \in WEi} x_{r,d}^{t,w} = 0 \quad ; \quad t \in T', w \in W \quad 5.6.2.4.4$$

La contrainte (5.6.2.4.1) impose que chaque équipe chirurgicale (soit qui fait la garde ou qui fait l'intervention chirurgicale) ne peut être prise en considération qu'au plus une seule fois.

La contrainte (5.6.2.4.2) impose que l'équipe chirurgicale qui fait la garde doit faire la consultation le lendemain, autrement dit, ne fera pas d'interventions chirurgicales.

La contrainte (5.6.2.4.3) impose que chaque équipe chirurgicale doit faire la garde du Week-end une fois par mois.

La contrainte (5.6.2.4.4) impose que l'équipe chirurgicale qui fait la garde deux fois durant la semaine, ne doit pas prendre la garde du Week-end de la même semaine.

5.6.3 Comparaison des résultats : PMA Vs MILP

5.6.3.1 Scénario hebdomadaire de simulation

Afin d'apprécier l'efficacité de notre algorithme, nous avons conduit une étude au sein du même service étudié (service de chirurgie orthopédique B4 de l'Hôpital Universitaire Hassan II à Fès, au Maroc). Nous avons examiné des cas concrets d'interventions chirurgicales au sein de ce service. Nous rappelons que ce dernier est composé de quatre équipes chirurgicales (Équipe A, Équipe B,

Équipe C et Équipe D) qui exploitent trois salles distinctes (salle principale, salle ambulatoire et salle d'urgence). Les algorithmes MILP et PMA ont été mis en œuvre en utilisant le langage de programmation JAVA. Notre but est d'établir un plan opérationnel hebdomadaire pour chaque équipe chirurgicale, en prenant en compte les incidents potentiels. Dans le cadre du Planificateur Multi Agents, la plateforme que nous avons employée, JADE, se compose de conteneurs d'agents qui peuvent être distribués sur un réseau via différents dispositifs (ordinateurs, portables et smartphones). Ces agents résident dans les conteneurs, qui sont des processus Java fournissant tous les services nécessaires pour héberger et faire fonctionner les agents.

Pour garantir une planification efficace du bloc opératoire, il est nécessaire de déterminer le nombre d'heures effectives dans chaque demi-journée opératoire. Il faut donc prendre en compte les temps d'interruption possibles entre les différentes interventions, comme le temps pour le nettoyage de la salle (10min) et le temps pour la préparation de la salle opératoire (10min). En supposant qu'en moyenne une salle opératoire accueille deux opérations, alors la demi-journée opératoire matinale (AM) sera fixée à $4h30min - 20min = 4h10min$ et la demi-journée opératoire de l'après-midi (PM) sera de $2h30min - 20min = 2h10min$ et ce pour chaque jour ouvrable du lundi au vendredi (à l'exception de la salle d'urgence qui est toujours disponible). Ainsi, avec une capacité de 2 salles d'opération pour le département B4, on totalise alors $(4h10min + 2h10min) \times 5 \times 2 = 6h20min \times 5 \times 2 = 3800min = 63heures \text{ et } 20minutes$ d'ouverture disponibles, soit **760minutes** par jour en moyenne. La durée de la salle d'urgence ne sera pas comptée puisqu'elle est toujours ouverte.

Pour évaluer la performance de notre solution, nous avons mis en parallèle les résultats obtenus par le PMA (décrite dans la sous-section 5.4.4), avec ceux de la formulation MILP (décrite dans la section 5.6.2). Les deux solutions ont été alimentées par le même nombre (36 interventions) et type d'interventions chirurgicales, réparties sur une période d'une semaine.

5.6.3.2 Résultats du modèle MILP

La méthode PMA a été utilisée pour réaliser la programmation hebdomadaire du bloc opératoire. Afin de comparer les résultats trouvés par le PMA et ceux du MILP. Nous rappelons les résultats obtenus à l'aide de la solution PMA, déjà présenté dans la sous-section 5.4.4 et qui sont illustrés dans la figure 5.17. Alors que le résultat de la planification pour la même semaine, obtenue à l'aide de la solution MILP, est illustré dans la figure 5.18.

MILP Rooms Planning												
Room	Inter. details	Monday		Tuesday		Wednesday		Thursday		Friday		Week-End
		AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	
Main	Team ID	Team C	Team B	Team D	Team C	Team D	Team A	Team A	Team B	Team B	Team C	Not
ROOM	Inter. ID	I1-I2-I3	I5	I10	I8-I11	I15-I16-I18	I17	I21-I23	I24	I26-I27	I28	Available
=====	Inter. dur.	1h+1h05'+30'	2h15'	3h30'	1h+1h	1h45'+45'+50'	2h10'	2h+2h10'	2h15'	2h+1h50'	1h50'	=====
Ambulatory	Team ID	Team B	Team C	Team C	Team D	Team A	Team D	Team B	Team A	Team C	Team B	NoT
ROOM	Inter. ID	I4-I6-I7	I9	I12-I13	I14	I22	I20	I25	I19	I29-I30	I31-I32	Available
=====	Inter. dur.	45'+1h45'+1h	1h15'	45'+2h	2h15'	3h	2h10'	3h45'	1h	2h45'+1h10'	1h+1h	=====
Emergency	Team ID	Team A	Team A	Team B	Team B	Team C	Team C	Team D	Team D	Team A	Team A	Team B
ROOM	Inter. ID	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.	Urg. Interv.
=====	Inter. dur.	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable

Figure 5.18 : Programme opératoire hebdomadaire global du bloc opératoire obtenu par la solution MILP

Inter. ID (Ix, avec : x un nombre entier positif) représente les identifiants des diverses interventions chirurgicales. $x_{\max}$ présente le nombre d'interventions maximales au cours de la semaine ($x_{\max}=36$ pour notre simulation). L'intervention Ix est plus prioritaire que l'intervention Ix' si et seulement si : $x > x'$.

Inter. dur. présente la durée correspondante d'une intervention Ix décrite dans la case de haut. Exemple : la durée de l'intervention I5 (Lundi matin de la solution PMA) est 2 heures et quart.

Une fois le programme défini, chaque chirurgien reçoit son propre planning hebdomadaire. Néanmoins, des circonstances imprévues le jour des interventions, comme des pannes de matériel ou l'indisponibilité d'un chirurgien, peuvent perturber les opérations chirurgicales et nécessiter des ajustements du programme. Nous avons pris en compte certaines de ces interruptions potentielles afin de respecter autant que possible le programme initial ou d'apporter des modifications mineures qui n'affecteront pas l'emploi du temps des autres chirurgiens. Cette approche améliore la communication entre les chirurgiens, en leur permettant de préciser les moments où ils ne sont pas disponibles.

5.6.3.3 Comparaison des résultats PMA et MILP

En se référant aux figures 5.17 et 5.18, on peut observer que l'attribution des différentes équipes chirurgicales sur les créneaux disponibles de la semaine est identique pour les deux implémentations, tandis que l'ordonnancement des interventions chirurgicales diffère. Ainsi, on peut constater un nombre d'interventions planifiées par la solution PMA plus élevé, soit 36 interventions, par rapport au nombre d'interventions planifiées par MILP, soit 32 interventions. Notre implémentation PMA a permis la planification de toutes les interventions en attente. Les interventions non planifiées (I33, I34, I35 et I36) par MILP au cours de cette semaine seront reprogrammées pour la semaine suivante. On observe une perte de : 11,11% pour le nombre d'interventions chirurgicales. Notons que la salle d'urgence est toujours disponible pour accueillir les cas urgents.

En ce qui concerne la masse horaire quotidienne de chaque implémentation, le tableau suivant illustre la déviation des deux solutions pour cette simulation (pour les deux salles : salle principale et salle ambulatoire) :

Tableau 5.1 : Durée des interventions PMA vs MILP

Jour	Durée PMA (min)	Durée MILP (min)	Déviation (%)
Lundi	635	575	10,43
Mardi	675	630	7,14
Mercredi	715	640	11,71
Jeudi	720	670	7,46
Vendredi	630	695	-9,35
Total	3375	3210	5,14

La déviation est calculée comme suit :

$$\text{Déviation (\%)} = \frac{\text{Durée PMA} - \text{Durée MILP}}{\text{Durée MILP}} \times 100$$

Il est à noter que la solution PMA a réussi non seulement à planifier, mais aussi à optimiser l'ordonnancement de toutes les interventions chargées en entrée. Cette solution a surpassé l'implémentation existante MILP tout au long de la semaine, à l'exception du vendredi.

Le graphique suivant illustre la supériorité de la solution PMA par rapport à l'implémentation MILP en termes du taux d'occupation des salles opératoires (salle principale et salle ambulatoire) pendant les jours de la semaine, avec :

$$\text{Taux d'occupation}(\%) = \frac{\text{Durée des interventions}}{\text{Durée maximale d'occupation de la salle}} \times 100$$

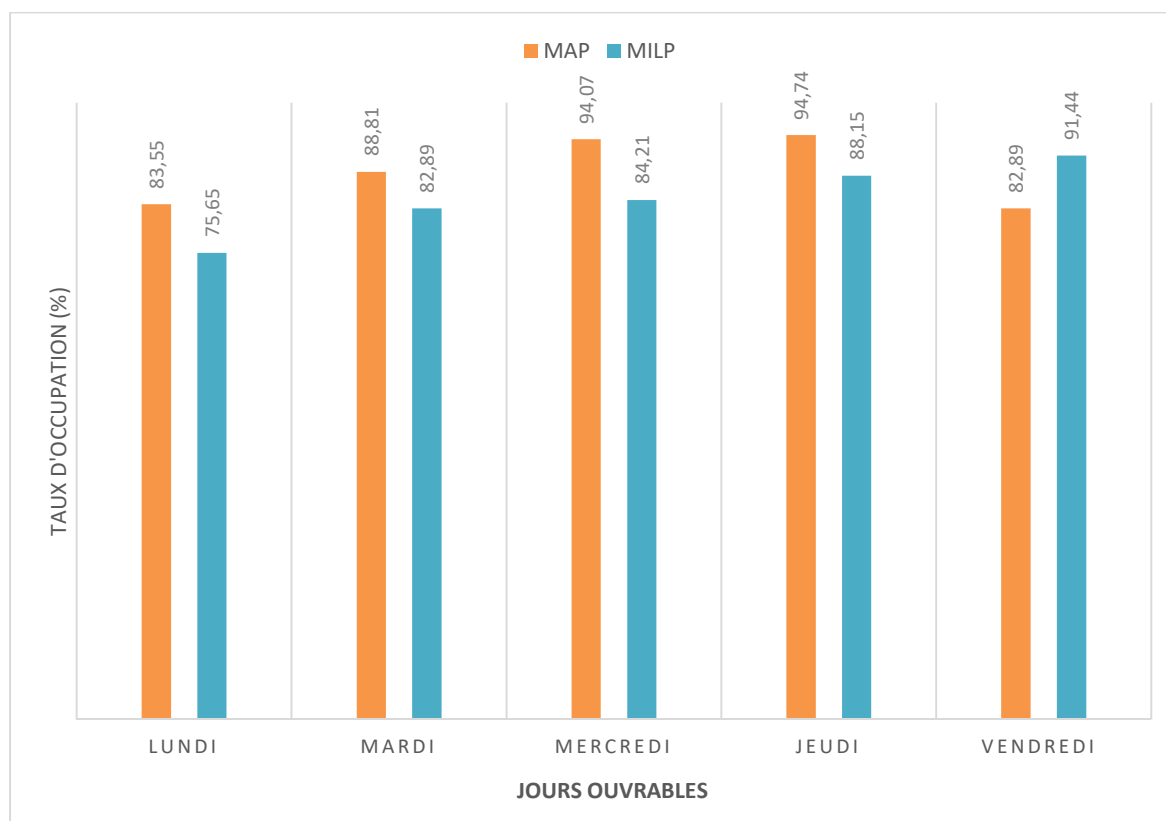


Figure 5.19 : Taux d'occupation PMA vs MILP

Le scénario envisagé dans cette expérimentation confirme le choix de la solution PMA optimisée par rapport à l'implémentation existante MILP. Le taux d'occupation total obtenu par PMA est de : 88,81%, tandis que ce taux est réduit à 84,47% dans le cas du MILP. Globalement, la solution PMA nous a permis un gain de 4,34% sur une période d'une semaine. Il convient de rappeler que le taux d'occupation maximal dans les deux salles a été déclaré précédemment et qui est de 760min par jour.

L'accroissement du taux d'occupation des salles opératoires est le reflet de l'augmentation du nombre de patients traités, ce qui entraîne par conséquent une réduction du nombre de patients sur les listes d'attente. Cela illustre l'amélioration du processus opératoire du service examiné ainsi que la productivité des équipes chirurgicales, et par conséquent leur satisfaction. Nous tenons également à souligner l'apport positif de la solution que nous proposons face à divers problèmes organisationnels tels que : les retards et les annulations des patients, la reprogrammation massive en cas d'incidents majeurs et graves (crise sanitaire, catastrophe naturelle, etc.) ainsi que l'absence et/ou l'indisponibilité des ressources humaines et/ou matérielles. Notre approche vise à garantir un déroulement fluide et optimisé de l'activité chirurgicale globale. Tous ces éléments constituent un titre d'excellence de la gestion du bloc opératoire.

5.7 Conclusion

Les méthodes conventionnelles d'optimisation de la planification et de l'ordonnancement des interventions chirurgicales en salle opératoire, qui relèvent principalement de la recherche opérationnelle, sont souvent incapables de prendre en compte simultanément toutes les contraintes liées aux ressources humaines et matérielles. Par conséquent, ces méthodes aboutissent fréquemment à des solutions qui ne sont pas optimales.

Dans ce chapitre, notre travail s'est concentré initialement sur la gestion du planning opératoire journalier de chaque équipe chirurgicale séparément, facilitant ainsi la prise en compte des perturbations dans le cours normal du planning opératoire et donnant des solutions pour maintenir un planning en temps réel, dynamique et réactif. La principale limite de notre travail est son caractère fastidieux lié à la gestion quotidienne du planning opératoire. Pour résoudre ce problème, nous avons construit un planning opératoire hebdomadaire prenant en compte l'activité chirurgicale de toutes les équipes du service étudié.

En effet, l'approche suggérée qui fait appel à l'intelligence artificielle distribuée au sein d'un système de planification multi-agents, offre une solution adaptée au défi de la révision en temps réel des programmes des salles opératoires et un contexte où les perturbations et les incertitudes sont monnaie courante.

L'approche de planification est mise en œuvre grâce à une interaction dynamique et flexible entre l'agent Manager et les agents Surgeon-Team d'une part, et les agents Room d'autre part. Cette négociation permet de coordonner l'ensemble des interventions à planifier. Dans un souci de durabilité, l'objectif du modèle a été structuré de manière à optimiser une somme pondérée de deux objectifs distincts : optimiser l'utilisation des salles d'opération tout en garantissant la satisfaction des équipes chirurgicales. La performance du PMA proposé est évaluée et comparée à celle de la formulation de la programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP). Les résultats confirment la performance du PMA qui a su trouver l'ordonnancement optimal des procédures chirurgicales pour les salles opératoires.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Ce manuscrit s'intéresse au problème de la planification et de l'ordonnancement des blocs opératoires hospitaliers sous contraintes de ressources durant la phase préopératoire.

Dans la première partie de cette thèse, nous avons mis le point sur la structuration générale des systèmes hospitaliers, tout en montrant le caractère complexe et hétérogène de ses composants, dont les objectifs sont parfois antagonistes. Nous avons présenté également les arguments expliquant l'intérêt alloué au blocs opératoires dans la gestion des structures hospitalières, et leurs attribuant une place prépondérante dans l'ensemble de ce paradigme sanitaire. Ensuite nous avons cerné plusieurs difficultés organisationnelles des blocs opératoires expliquant la complexité de sa gestion et de son processus en particulier la programmation opératoire. Celle-ci a fait l'objet de plusieurs travaux et de recherches dans la littérature, nous avons élaboré un état de l'art contenant un récapitulatif des diverses modèles et stratégies utilisées pour la construction du programme opératoire et pour la résolution de la problématique définie. Cette dernière a été fondée sur le besoin d'une solution résolvant les différents soucis rencontrés lors d'une programmation opératoire manuelle liées à des lacunes sévères dans les pratiques actuelles surtout devant des incidents graves et imprévisibles. Nous avons proposé de traiter ce sujet sur le cas réel du service de chirurgie traumatologique et orthopédique B4 du CHU Hassan II de Fès.

Dans la deuxième partie de cette mémoire, on s'est retrouvé devant une crise sanitaire mondiale (liée au virus SARS-CoV-2) sans précédents, caractérisée par la rapidité de sa propagation, la gravité et l'ampleur de ses répercussions et le manque initial d'informations sur son profil évolutif, ainsi nous avons réalisé une étude de cas réel objectivant l'impact direct de la pandémie COVID-19 sur l'activité chirurgicale du service étudié.

Vue le nombre élevé de patients et de journées opératoires reportés suite à cette situation critique, une reprogrammation massive s'est avérée nécessaire. Face aux difficultés rencontrées devant la programmation opératoire traditionnelle dans de telles circonstances, nous avons souligné l'intérêt d'une nouvelle approche basé sur l'IAD pour atteindre les objectifs ciblés.

Dans ce sens s'inscrit la notion des SMA et de la planification intelligente multi-agents, dont nous avons abordé les différents aspects architecturaux ainsi que les plateformes de développement et les domaines d'application.

La troisième partie de ce travail a été dédiée à la réalisation d'une expérimentation suivie d'une simulation visant l'élaboration d'un outil d'aide aux décisions concernant la planification et l'ordonnancement des interventions chirurgicales au sein du service étudié. Le résultat obtenu était un programme opératoire journalier dans un premier temps, et hebdomadaire dans un second temps. Ce programme que nous avons réalisé s'intitule par ses caractères : robuste, dynamique, flexible, réactif et répondant en temps réel aux différentes perturbations imprévisibles pouvant altérer la fluidité et le déroulement normal du processus du bloc opératoire. Ceci a été élaboré à l'aide d'un PMA en utilisant la plateforme JADE.

Afin d'évaluer le planning opératoire généré par le PMA, nous l'avons comparé avec les résultats obtenus par un modèle mathématique MILP. L'analyse comparative des deux simulations a révélé comme indicateur de performance un taux d'occupation des salles opératoires en faveur de la supériorité et de la robustesse de la solution fournie par le PMA.

Enfin, il est primordial de souligner que l'amélioration de la planification et l'ordonnancement des interventions chirurgicales nécessitent que les gestionnaires de blocs opératoires et des hôpitaux tiennent compte de divers indicateurs de performance, tant matériels qu'humains. C'est un aspect essentiel pour améliorer la qualité des soins prodigués aux patients et pour minimiser les lacunes du processus du bloc opératoire qui ont été jusqu'à présent insuffisamment ou mal gérées.

Perspectives

Suite aux travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, nous envisageons diverses perspectives à court, à moyen et à long terme :

- ✚ Le développement du système du bloc opératoire et l'amélioration de la programmation des procédures chirurgicales impliquant les phases peropératoire et postopératoire.
- ✚ La proposition d'autres indicateurs de performance visant l'identification des points de faiblesse de notre solution dans le but d'optimiser le processus du bloc opératoire.
- ✚ La réalisation d'un modèle de planification et d'ordonnancement du bloc opératoire multi-objectif prenant en considération de nouvelles contraintes influençant les procédures opératoires.
- ✚ Elaboration d'un planning opératoire mensuel du service étudié intéressant les patients programmés.
- ✚ Une généralisation de notre solution à l'ensemble des services de chirurgie de l'hôpital étudié.
- ✚ La création de connexions informatiques intra-hospitalière et inter services facilitant l'accès aux bases de données médicales des patients, et renforçant ainsi les compétences du PMA.

Production scientifique

Publications scientifiques

1. O. H. Soualfi, A. Elbarkany, B. Harras, K. Chmali and A. Elmrini, **"Impact of the COVID-19 pandemic on the planning of operating theatres: Case of the Department of Orthopedic Surgery B4 Of Hassan II University Hospital In Fez, Morocco"**, 2022 14th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), EL JADIDA, Morocco, 2022, pp. 1-6, [doi: 10.1109/LOGISTIQUA55056.2022.9938088](https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA55056.2022.9938088) (Indexé Scopus).
2. Oumaima Hajji Soualfi, Khalid Chmali, Omari Mohammed, Karima Elrhazi, Abdelmajid Elmrini, "Abdellah Elbarkany and Bilal Harras,"**ANALYSIS OF SURGICAL ACTIVITY DURING THE COVID 19 PANDEMIC AND LESSONS LEARNED FOR COPING: A RETROSPECTIVE STUDY**", Central European Management Journal Vol. 30 Iss. 3 (2022). https://journals.kozminski.cems-j.com/index.php/pl_cemj/article/view/1680.html.
3. Soualfi, O. H., Soualfi, A. H., Chmali, K., Elmrini, A., Elbarkany, A., & Harras, B. (2023, January), **"A Dynamic MAS to Manage a Daily Planning for a Team Operating Theater"**, In International Conference on Digital Technologies and Applications (pp. 905-915). Cham: Springer Nature Switzerland. [DOI: 10.1007/978-3-031-29857-8_90](https://doi.org/10.1007/978-3-031-29857-8_90) (Indexé Scopus, Q4).
4. Soualfi, O. H., El Barkan, A., & Harras, B. (2023), **"Planning and scheduling of operating theater under resources constraints: State of the art and future trends and impact on energy consumption"**, In E3S Web of Conferences (Vol. 412, p. 01074). EDP Sciences. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341201074> (Indexé Scopus).
5. SOUALFI, O. H., SOUALFI, A. H., EL, A., & BARKANY, B. H. (2023), **"AN EFFICIENT PROGRAMMING SYSTEM FOR OPERATING THEATERS BASED ON DISTRIBUTED ARTIFICIAL INTELLIGENCE"**, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 101(20). DOI: <https://www.jatit.org/volumes/hundredone20.php> (Indexé Scopus, Q4).
6. Soualfi, O. H., Soualfi, A. H., Chmali, K., Elmrini, A., Elbarkany, A., & Harras, B. (2023, January), **"A Weekly scheduling of operating theaters using Multi Agent Planner"**, In 2nd International Conference on Advances in Data-driven Computing and Intelligent Systems (ADCIS 2023), ([Accépté, en cours de publication](#), Indexé Scopus, Q4).

Communications orales

1. HAJJI SOUALFI Oumaima, El BARKANY Abdellah et HARRAS Bilal, **Modèles de la planification et d’ordonnancement des blocs opératoires sous contraintes de ressources: Etat de l’art**, 6ème Congrès National du Laboratoire Modélisation et Calcul Scientifique (RLMCS'2019), 28-29 Juin, 2019, FST de Fès, Maroc.
2. Oumaima HAJJI SOUALFI, Abdellah EL BARKANY, Bilal HARRAS, Khalid CHMALI and Abdelmajid ELMRINI. **Impact of the COVID-19 pandemic on the planning of operating theatres: Case of the Department of Orthopedic Surgery B4 Of Hassan II University Hospital In Fez, Morocco**, 14th IEEE International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management - LOGISTIQUA 2022 –25 - 27 may 2022. National School of Commerce and Management - Chouaib Doukkali University. El Jadida, Morocco.
3. Oumaima HAJJI SOUALFI, Abdellah EL BARKANY, Bilal HARRAS, **Optimisation de la planification des blocs opératoires à l’aide d’un planificateur multi-agents basé sur l’intelligence artificielle distribuée : Étude de cas**, Journée Doctorale du Laboratoire de Génie Mécanique (JDLGM’2022) ,08 Décembre 2022, FST-USMBA-Fès.
4. HAJJI SOUALFI Oumaima, El BARKANY Abdellah, HARRAS Bilal, HAJJI Abderrahim , CHMALI Khalid, ELMRINI Abdelmajid, **A Dynamic MAS to Manage a Daily Planning for a Team Operating Theater**, 2nd International Conference on Digital Technologies and Applications (ICDTA’ 2023), 27-28 Janvier 2023, ENSA FES.
5. HAJJI SOUALFI Oumaima, El BARKANY Abdellah et HARRAS Bilal, **Planning and scheduling of operating theater under resources constraints: State of the art and future trends and impact on energy consumption**, International Conference in Innovation Statistic Models Applied On Management, Humanity and Social Sciences (FSJESTé). Science and Innovation Festival of Tetouan (S&IF’23), 10-12 Mars 2023, FSJES Tetouan.
6. HAJJI SOUALFI Oumaima, El BARKANY Abdellah et HARRAS Bilal, **MAP based on Distributed Artificial Intelligence for Operating Theater Management: Case Study**, International Conference in Innovation Statistic Models Applied On Management, Humanity and Social Sciences (FSJESTé). Science and Innovation Festival of Tetouan (S&IF’23), 10-12 Mars 2023.
7. HAJJI SOUALFI Oumaima, El BARKANY Abdellah et HARRAS Bilal, **A weekly scheduling of operating theaters using Multi Agent Planner**, 2nd International Conference on Advances in Data-driven Computing and Intelligent Systems (ADCIS 2023), 21-23 Septembre 2023, National Forensic Sciences University, India.

Bibliographie

- Abdelaaziz Ait Ali et al. Morocco's strategy in the face of covid-19. Policy Center for the New South. PP April 20-07, 2020.
- Addis, B., Carello, G., Grosso, A., & Tànfani, E. (2016). Operating room scheduling and rescheduling: a rolling horizon approach. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 28(1-2), 206-232.
- Agnetis, A., Coppi, A., Corsini, M., Dellino, G., Meloni, C., & Pranzo, M. (2012). Long term evaluation of operating theater planning policies. *Operations Research for Health Care*, 1(4), 95-104.
- Ahmed Boudak, Abdelmajid Elouadi. L'HOPITAL PUBLIC MAROCAIN : QUEL MODELE MANAGERIAL ET ORGANISATIONNEL POUR L'AVENIR ?. 10ème conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers, GISEH2020, Oct 2020, Valenciennes (Virtuel), France. fihal-03198906ff
- Aïda Jebali. Vers un outil d'aide à la planification et à l'ordonnancement des ressources dans les services de soins. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004. Français. ffnnt : ff. fftel-00169958
- Al-Jabir, A., Kerwan, A., Nicola, M., Alsafi, Z., Khan, M., Sohrabi, C., ... & Agha, R. (2020). Impact of the Coronavirus (COVID-19) pandemic on surgical practice-Part 1. *International journal of surgery (London, England)*, 79, 168-179.
- Al-Jabir, A., Kerwan, A., Nicola, M., Alsafi, Z., Khan, M., Sohrabi, C., ... & Agha, R. (2020). Impact of the Coronavirus (COVID-19) pandemic on surgical practice-Part 2 (surgical prioritisation). *International journal of surgery*, 79, 233-248.
- ALLIA, Jeremy, SAADA, Gaya Ait, BRONSARD, Nicolas, et al. The impact of confinement on orthopaedic and trauma surgical activity. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 2021, p. 103113.
- Amamou, B., Bannour, A. S., Yahia, M. B. H., Nasr, S. B., & Ali, B. B. H. (2014). Haute prévalence du Burnout dans les unités Tunisiennes prenant en charge des patients en fin de vie. *Pan African Medical Journal*, 19(1).
- Angelliaume, A., Legallois, Y., Harly, E., Dartus, J., Lavignac, P., Chammas, P. E., ... & le Collège des Jeunes Orthopédistes, C. J. O. (2023). Impact de la COVID-19 sur la chirurgie orthopédique et traumatologique en France: une enquête épidémiologique nationale. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 109(1), 6-13.
- Aniba, S. A. N. A., & Jebali, A. I. D. A. (2011). Approches stochastiques pour la planification des interventions au bloc opératoire. 9è Congrès International de Génie Industriel (CIGI'2011).

- Antonelli, G. A. (2000). Handbook of logic in artificial intelligence and logic programming, Volume 3, Nonmonotonic reasoning and uncertain reasoning, edited by Dov M. Gabbay, CJ Hogger, and JA Robinson, with D. Nute, Handbooks of logic in computer science and artificial intelligence and logic programming, Clarendon Press, Oxford University Press, Oxford, New York, etc., 1994, xix+ 529 pp.–. Bulletin of Symbolic Logic, 6(4), 480-484.
- Arezki, C., Boufflet, J. P., Mezouari, L., & Moukrim, A. (2020, February). Planification d'interventions chirurgicales: heuristiques de construction et d'amélioration. In 21e congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF 2020).
- Askari A, Arasteh P, Jabalameli M, Bagherifard A, Razi M. COVID-19 and ortho-paedic surgery: experiences from Iran. J Bone Joint Surg Am 2020.
- Athey AG, Cao L, Okazaki K, Zagra L, Castelli CC, Kendoff DO, et al. Survey ofAAHKS International Members on the Impact of COVID-19 on Hip and KneeArthroplasty Practices. J Arthroplasty 2020;35:S89–94.
- Augustin, A. (2017). Ordonnancement de bloc opératoire avec intégration des soins intensifs. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Augusto, V., Xie, X., & Perdomo, V. (2010). Operating theatre scheduling with patient recovery in both operating rooms and recovery beds. Computers & Industrial Engineering, 58(2), 231-238.
- Augusto, V., Xie, X., & Perdomo, V. (2010). Operating theatre scheduling with patient recovery in both operating rooms and recovery beds. Computers & Industrial Engineering, 58(2), 231-238.
- Azoulay, E., De Waele, J., Ferrer, R., Staudinger, T., Borkowska, M., Pova, P., ... & Esicm. (2020). Symptoms of burnout in intensive care unit specialists facing the COVID-19 outbreak. Annals of intensive care, 10, 1-8.
- Babin, G., Maamar, Z., & Chaib-draa, B. (1997, February). Metadatabase meets distributed AI. In International Workshop on Cooperative Information Agents (pp. 138-147). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Barbagallo, S., Corradi, L., De Ville de Goyet, J., Iannucci, M., Porro, I., Rosso, N., ... & Testi, A. (2015). Optimization and planning of operating theatre activities: an original definition of pathways and process modeling. BMC medical informatics and decision making, 15, 1-16.
- Barro, K., Malone, A., Mokede, A., & Chevance, C. (2020). Management of the COVID-19 epidemic by public health establishments—Analysis by the Fédération Hospitalière de France. Journal of visceral surgery, 157(3), S19-S23.
- Begun, J. W., & Jiang, H. J. (2020). Health care management during Covid-19: Insights from complexity science. NEJM Catalyst Innovations in Care Delivery, 1(5).
- Behmanesh, R., & Zandieh, M. (2019). Surgical case scheduling problem with fuzzy surgery time: An advanced bi-objective ant system approach. Knowledge-Based Systems, 186, 104913.

- Blake, J. T., & Carter, M. W. (1997). Surgical process scheduling: a structured review. *Journal of the society for health systems*, 5(3), 17-30.
- Boissier, O., Vue d'ensemble, I., Caractéristiques, I. I., & JADE, I. P. (2010). *Systèmes multi-agents* (Doctoral dissertation, Thèse de doct. Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Étienne).
- Bonvoisin, F. (2011). *Evaluation de la performance des blocs opératoires: du modèle aux indicateurs* (Doctoral dissertation, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis).
- Bou Saleh, B., El Moudni, A., Hajjar, M., & Barakat, O. (2019). A multi-agent architecture for dynamic scheduling of emergencies in operating theater. In *Intelligent Systems and Applications: Proceedings of the 2018 Intelligent Systems Conference (IntelliSys) Volume 2* (pp. 1256-1272). Springer International Publishing.
- Bouchikh, M., Achir, A., Arsalane, A., Boubia, S., Laqsiouar, K., Msougar, Y., ... & Smahi, M. (2020). Recommandations de la Société Marocaine de Chirurgie Thoracique «SMCT» pour la Prise en Charge des Patients Pendant la Pandémie COVID-19. *Advances in Thoracic Diseases*, 2020.
- Bouguerra, A., Sauvey, C., & Sauer, N. (2015). Mathematical model for maximizing operating rooms utilization. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 118-123.
- Bracey, T., Arif, S., Ralte, A. M., Shaaban, A. M., & Ganesan, R. (2021). Histopathology during the COVID-19 pandemic: resilience through adaptation and innovation. *Diagnostic Histopathology*, 27(3), 108-115.
- Brindle, M. E., & Gawande, A. (2020). Managing COVID-19 in surgical systems. *Annals of surgery*.
- Bruni, M. E., Beraldi, P., & Conforti, D. (2015). A stochastic programming approach for operating theatre scheduling under uncertainty. *IMA Journal of Management Mathematics*, 26(1), 99-119.
- Buffet A, Bouteille C, Obert L, Loisel F, Pluvy I. The incidence of hand trauma the COVID- 19 epidemic setting. *Ann Chir Plast Esthet*. 2022; 67(2): 86-92. doi:10.1016/j.anplas.2022.01.002
- Cammarata, S., McArthur, D., & Steeb, R. (1988). Strategies of cooperation in distributed problem solving. In *Readings in Distributed Artificial Intelligence* (pp. 102-105). Morgan Kaufmann.
- Cappanera, P., Visintin, F., & Banditori, C. (2018). Addressing conflicting stakeholders' priorities in surgical scheduling by goal programming. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30, 252-271.
- Cardoen, B., Demeulemeester, E., & Beliën, J. (2009). Optimizing a multiple objective surgical case sequencing problem. *International Journal of Production Economics*, 119(2), 354-366.
- Carinci, F. (2020). Covid-19: preparedness, decentralisation, and the hunt for patient zero. *Bmj*, 368.

- Cayiril, T. and Veral, E. (2003). Outpatient scheduling in health care: A review of literature. *Production and Operations Management*, 12(4), 519-549.
- Chaabane, S. (2004). *Gestion prédictive des blocs opératoires* (Doctoral dissertation, INSA de Lyon).
- Chaabane, S., Meskens, N., Guinet, A., & Laurent, M. (2007). Comparaison des performances des politiques de programmation opératoire. *Logistique & Management*, 15(1), 17-26.
- Chaabane, S., Meskens, N., Guinet, A., & Laurent, M. (2008). Comparison of two methods of operating theatre planning: application in Belgian hospital. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 17, 171-186.
- Chaabane, S., Meskens, N., Guinet, A., & Laurent, M. (2008). Comparison of two methods of operating theatre planning: application in Belgian hospital. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 17, 171-186.
- Chabrol, F., Albert, L., & Ridde, V. (2019). 40 years after Alma-Ata, is building new hospitals in low-income and lower-middle-income countries beneficial?. *BMJ Global Health*, 3(Suppl 3), e001293.
- Chaib-Draa, B., Jarras, I., & Moulin, B. (2001). *Systèmes multi-agents: principes généraux et applications*. Edition Hermès, 242, 1030-1044.
- Chraibi, A. (2015). *Outils d'aide à la décision pour la conception des blocs opératoires* (Doctoral dissertation, Université Jean Monnet-Saint-Etienne).
- Chraibi, A., Kharraja, S., Osman, I. H., & Elbeqqali, O. (2014, November). Solving operating theater facility layout problem using a Multi-Agent system. In *2014 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)* (pp. 207-212). IEEE.
- Chraibi, A., Kharraja, S., Osman, I. H., & Elbeqqali, O. (2015). Multi-agent system for solving dynamic operating theater facility layout problem. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1146-1151.
- Chraibi, A., Kharraja, S., Osman, I. H., & Elbeqqali, O. (2015). Multi-agent system for solving dynamic operating theater facility layout problem. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1146-1151.
- Cohen, J., & Normile, D. (2020). New SARS-like virus in China triggers alarm.
- Cohen, P. R., & Levesque, H. J. (1990). Intention is choice with commitment. *Artificial intelligence*, 42(2-3), 213-261.
- Conforti, D., Guerriero, F., & Guido, R. (2010, February). A multi-objective block scheduling model for the management of surgical operating rooms: New solution approaches via genetic algorithms. In *2010 IEEE workshop on health care management (WHCM)* (pp. 1-5). IEEE.
- Cornez, M., Meskens, N., & Telemsani, M. (2015). *Planification et ordonnancement d'un bloc opératoire: cas de l'hôpital de Mont-Godinne*. Language.
- Corral-Broto, P., & Andriamparany, R. (2020). Histoire des maladies dans le Sud Global: leçons apprises pour la Covid-19. *REVUT Scientific Journal*, 1(2), 7-17.

- D. K. Adina Florea, Stefan Pentiu, (2002). Architectures des agents et langages. Available: http://turing.cs.pub.ro/auf2/html/chapters/chapter2/chapter_2_2_2.html
- D'Apolito R, Faraldi M, Ottaiano I, Zagra L. Disruption of arthroplasty practice in an orthopaedic center in northern Italy during the coronavirus disease 2019 pandemic. *J Arthroplasty* 2020;35:S6–9.
- Daniels, C. E., Brown, M. J., Berbari, E. F., O'Horo, J. J. C., Ackerman, F. K., Kendrick, M. L., & Cima, R. R. (2020, September). Revamping inpatient care for patients without COVID-19. In *Mayo Clinic Proceedings* (Vol. 95, No. 9, pp. S41-S43). Elsevier.
- De Filippis, G., Cavazzana, L., Gimigliano, A., Piacenza, M., & Vimercati, S. (2020). Covid-19 pandemic: A frontline hospital reorganization to cope with therapeutic and diagnostic emergency. *Pharmacological research*, 161, 105160.
- De Winne, M. Rudy. Vers un outil d'aide à la planification et à l'ordonnancement des blocs opératoires. Diss. Doctoral dissertation, Université de Technologie de Troyes, 2006.
- Degoulet, P., & Fieschi, M. (1994). *Informatique médicale*. Paris: Masson.
- Dekhici, L., & Khaled, B. (2010). Operating theatre scheduling under constraints. *Journal of Applied Sciences*, 14(10), 1380-1388.
- Denton, B., Gupta, D. (2003) A sequential bounding approach for optimal appointment scheduling. *IIE Transactions*, 35, 1003-1016.
- Denton, B., Rahman, A., Nelson, H. and Bailey, A. (2006). Simulation of a Multiple Operating Room Surgical Suite. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*.
- Denton, B., Viapiano, J. and Vogl, A. (2007). Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty, *Health Care Management Science*, 10, 13-24.
- Denton, B., Viapiano, J., & Vogl, A. (2007). Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty. *Health care management science*, 10, 13-24.
- DENTON, Brian T., MILLER, Andrew J., BALASUBRAMANIAN, Hari J., et al. Optimal allocation of surgery blocks to operating rooms under uncertainty. *Operations research*, 2010, vol. 58, no 4-part-1, p. 802-816.
- Devi, S. P., Rao, K. S., & Sangeetha, S. S. (2012). Prediction of surgery times and scheduling of operation theaters in ophthalmology department. *Journal of medical systems*, 36, 415-430.
- Dexter, F. and Traub, R.D. (2000). Sequencing cases in the operating room: predicting whether one surgical case will last longer than another. *Anesthesia & Analgesia* 90:975-979.
- Dorval, V. (2020). *Planification des opérations chirurgicales sous contrainte de capacité* (Doctoral dissertation, Université Laval).

- Duenas, A., Di Martinelly, C., Yazgı Tütüncü, G., & Aguado, J. (2017). A multi-objective hospital operating room planning and scheduling problem using compromise programming. In *Advances in Computational Intelligence: 15th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICA I 2016, Cancún, Mexico, October 23–28, 2016, Proceedings, Part I 15* (pp. 379-390). Springer International Publishing.
- Dumez, H., & Minvielle, É. (2020). Le système hospitalier français dans la crise Covid-19 (Doctoral dissertation, i3-CRG; Ecole polytechnique X; CNRS).
- Dye, C., Reeder, J. C., & Terry, R. F. (2013). Research for universal health coverage. *Science translational medicine*, 5(199), 199ed13-199ed13.
- El Fallah-Seghrouchni, A., & Briot, J. P. (2009). Technologies des systemes multi-agents et applications industrielles.
- El Khider, Abdelkader, and Hanaa Imichoui. "La régionalisation, nouveau mode de gouvernance du système de santé: état des lieux pour le cas du Maroc." *Eur Sci J* 16 (2020): 154-171.
- El-Hage, W., Hingray, C., Lemogne, C., Yrondi, A., Brunault, P., Bienvenu, T., ... & Aouizerate, B. (2020). Les professionnels de santé face à la pandémie de la maladie à coronavirus (COVID-19): quels risques pour leur santé mentale?. *L'encephale*, 46(3), S73-S80.
- El-Hage, W., Hingray, C., Lemogne, C., Yrondi, A., Brunault, P., Bienvenu, T., ... & Aouizerate, B. (2020). Les professionnels de santé face à la pandémie de la maladie à coronavirus (COVID-19): quels risques pour leur santé mentale?. *L'encephale*, 46(3), S73-S80.
- F. des maisons médicales, « Perspectives pour une loi-santé en Belgique », Fédération des maisons médicales. Disponible sur: <https://www.maisonmedicale.org/-Perspectives-pour-une-loi-santeen-.html>.
- « FIPA Agent Management Specification, Foundation For Intelligent Physical Agents Std. SC00 023K », 2004.
- «The Foundation for Intelligent Physical Agents ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fipa.org/>.
- Fallah-Aliabadi, S., Ostadtaghizadeh, A., Ardalan, A., Fatemi, F., Khazai, B., & Mirjalili, M. R. (2020). Towards developing a model for the evaluation of hospital disaster resilience: a systematic review. *BMC health services research*, 20(1), 1-11.
- Fei, H. (2006). Vers un outil d'aide à la planification et à l'ordonnancement des blocs opératoires. Thèse de Doctorat en sciences de gestion des Facultés Universitaires Catholiques de Mons, Mons et en optimisation et sûreté des systèmes de l'Université de Technologie de Troyes, Troyes
- Fei, H., Artiba, A., Meskens, N., & Chu, C. (2005). Planification des interventions sur une semaine dans un bloc opératoire.
- Fei, H., Chu, C., Meskens, N., & Artiba, A. (2008). Solving surgical cases assignment problem by a branch-and-price approach. *International journal of production economics*, 112(1), 96-108.

- Fei, H., Meskens, N., & Chu, C. (2010). A planning and scheduling problem for an operating theatre using an open scheduling strategy. *Computers & Industrial Engineering*, 58(2), 221-230.
- Ferber, J. (1997). Les systèmes multi-agents: un aperçu général. *Techniques et sciences informatiques*, 16(8).
- Ferber, J. (2009). MadKit pas à pas. Support technique de la plateforme MaDKit LIRMM-Université de Montpellier II.
- Ferber, J., & Weiss, G. (1999). Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence (Vol. 1). Reading: Addison-wesley.
- Ferguson, I. A. (1992). TouringMachines: An architecture for dynamic, rational, mobile agents (No. UCAM-CL-TR-273). University of Cambridge, Computer Laboratory.
- Finin, T., Fritzson, R., McKay, D., & McEntire, R. (1994, November). KQML as an agent communication language. In *Proceedings of the third international conference on Information and knowledge management* (pp. 456-463).
- Fischer, K., Chaib-Draa, B., Muller, J. P., Pischel, M., & Gerber, C. (1999). A simulation approach based on negotiation and cooperation between agents: a case study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 29(4), 531-545.
- Fleischmann, B. (1990). The discrete lot-sizing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 44(3), 337-348.
- Frédéric Bonvoisin. Evaluation de la performance des blocs opératoires : du modèle aux indicateurs. *Automatique / Robotique*. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2011. Français. [fftel-00626150ff](#)
- Garneau, T. (2003). La programmation orientée-agent: DMAS builder: un environnement de développement de systèmes multi-agents totalement distribués (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- Gasser, L., Braganza, C., & Herman, N. (1988). Implementing distributed AI systems using MACE. In *Readings in Distributed Artificial Intelligence* (pp. 445-450). Morgan Kaufmann.
- Gauthier, P. H., Grenon, A., Pinson, G. et Rameau, E. (1979). *Le contrôle de gestion à l'hôpital*, Edition Dunod
- Gilson, L., Barasa, E., Nxumalo, N., Cleary, S., Goudge, J., Molyneux, S., ... & Lehmann, U. (2017). Everyday resilience in district health systems: emerging insights from the front lines in Kenya and South Africa. *BMJ global health*, 2(2), e000224.
- Gómez Urrutia, E. D., Aggoune, R., & Dauzère-Pérès, S. (2012). New integrated method to solve the problem of planning and scheduling. In *13th Congress of the French Society for Operational Research and Decision Support-ROADEF*, Apr, Angers, France (pp. 239-240).
- Gonzalez-Rodriguez, I., Puente, J., Vela, C. R., & Varela, R. (2008). Semantics of schedules for the fuzzy job-shop problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 38(3), 655-666.

- Gonzalez-Rodriguez, I., Vela, C., Puente, J., & Hernández-Arauzo, A. (2009, October). Improved local search for job shop scheduling with uncertain durations. In *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling* (Vol. 19, pp. 154-161).
- González-Vélez, H., Mier, M., Julià-Sapé, M., Arvanitis, T. N., García-Gómez, J. M., Robles, M., ... & Lluch-Ariet, M. (2009). HealthAgents: distributed multi-agent brain tumor diagnosis and prognosis. *Applied intelligence*, 30, 191-202.
- Grouls, A. (2013). Agents et systèmes multi-agents: vers une synthèse de ces concepts/mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en informatique par Alexandre Grouls;[directeur de recherche, Roger Nkambou].
- Guan, W. J., Ni, Z. Y., Hu, Y., Liang, W. H., Ou, C. Q., He, J. X., ... & Zhong, N. S. (2020). Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China. *New England journal of medicine*, 382(18), 1708-1720.
- GUERCI, Claudio, MAFFIOLI, Anna, BONDURRI, Andrea A., et al. COVID-19: How can a department of general surgery survive in a pandemic?, *Surgery*, 2020, vol. 167, no 6, p. 909-911.
- Guerriero, F., & Guido, R. (2011). Operational research in the management of the operating theatre: a survey. *Health care management science*, 14, 89-114.
- Guinet, A., & Chaabane, S. (2003). Operating theatre planning. *International Journal of Production Economics*, 85(1), 69-81.
- Gupta, J. N. (1988). Two-stage, hybrid flowshop scheduling problem. *Journal of the operational Research Society*, 39(4), 359-364.
- Gür, Ş., Eren, T., & Alakaş, H. M. (2019). Surgical operation scheduling with goal programming and constraint programming: A case study. *Mathematics*, 7(3), 251.
- Hammami, S., Ladet, P., Atidel, B. H. A., & Ruiz, A. (2007). Une programmation opératoire robuste. *Logistique & Management*, 15(1), 95-111.
- Hans, E. W., Van Houdenhoven, M., & Hulshof, P. J. (2011). A framework for healthcare planning and control. In *Handbook of healthcare system scheduling* (pp. 303-320). Boston, MA: Springer US.
- Hans, E., Wullink, G., Van Houdenhoven, M., & Kazemier, G. (2008). Robust surgery loading. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1038-1050.
- Hans, E., Wullink, G., Van Houdenhoven, M., & Kazemier, G. (2008). Robust surgery loading. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1038-1050.
- Hashemi Doulabi, S. H., Rousseau, L. M., & Pesant, G. (2014). A constraint programming-based column generation approach for operating room planning and scheduling. In *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming: 11th International Conference, CPAIOR 2014, Cork, Ireland, May 19-23, 2014. Proceedings 11* (pp. 455-463). Springer International Publishing.

- Heymann DL, Shindo N. COVID-19: what is next for public health? *Lancet* 2020 ; 395 : 542—5, [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30374-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30374-3).
- Hsu, V. N., De Matta, R., & Lee, C. Y. (2003). Scheduling patients in an ambulatory surgical center. *Naval Research Logistics (NRL)*, 50(3), 218-238.
- <http://www.chu-fes.ma/organigramme/>
- Huang, G. X., Xiang, W., Li, C., Zheng, Q., Zhou, S., Shen, B. Q., & Chen, S. F. (2012). Surgical scheduling based on hybrid flow-shop scheduling. *Applied Mechanics and Materials*, 201, 1004-1007.
- Huang, Y. S., Wang, J. T., Hung, L. C., Huang, Y. H., Sheng, W. H., Chen, Y. C., & Chang, S. C. (2020). Infection prevention and control for coronavirus disease 2019 (COVID-19) in hospital settings. *Journal of Internal Medicine of Taiwan*, 247-253.
- Ilhem, B. (2014). Planification multi-agents pour la composition dynamique, Projet de Fin d'Etude, Université de Tébessa-Algerie-, 2010. Disponible sur le site: http://www.memoireonline.com/08/11/4782/m_Planification-multi-agents-pour-lacomposition-dynamique40.html, consulté le, 28.
- Iser, J. H., Denton, B. T., & King, R. E. (2008, December). Heuristics for balancing operating room and post-anesthesia resources under uncertainty. In *2008 Winter Simulation Conference* (pp. 1601-1608). IEEE.
- Isern, D., Sánchez, D., & Moreno, A. (2010). Agents applied in health care: A review. *International journal of medical informatics*, 79(3), 145-166.
- Iyengar, K., Mabrouk, A., Jain, V. K., Venkatesan, A., & Vaishya, R. (2020). Learning opportunities from COVID-19 and future effects on health care system. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 14(5), 943-946.
- Jebali, A., Alouane, A. B. H., & Ladet, P. (2006). Operating rooms scheduling. *International Journal of Production Economics*, 99(1-2), 52-62.
- Jennings, N. R. (2000). On agent-based software engineering. *Artificial intelligence*, 117(2), 277-296.
- Jennings, N. R., & Wooldridge, M. (1998). Applications of intelligent agents. *Agent technology: foundations, applications, and markets*, 3-28.
- Jennings, N. R., Faratin, P., Lomuscio, A. R., Parsons, S., Sierra, C., & Wooldridge, M. (2001). Automated negotiation: prospects, methods and challenges. *International Journal of Group Decision and Negotiation*, 10(2), 199-215.
- Jennings, N., & Wooldridge, M. J. (Eds.). (1998). *Agent technology: foundations, applications, and markets*. Springer Science & Business Media.
- Kapasa, R. L., Hannoun, A., Rachidi, S., Ilunga, M. K., Toirambe, S. E., Tady, C., ... & Khalis, M. (2021). Évaluation du burn-out chez les professionnels de santé des unités de veille sanitaire COVID-19 au Maroc. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 82(5), 524-534.

- Kapasa, R. L., Hannoun, A., Rachidi, S., Ilunga, M. K., Toirambe, S. E., Tady, C., ... & Khalis, M. (2021). Évaluation du burn-out chez les professionnels de santé des unités de veille sanitaire COVID-19 au Maroc. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 82(5), 524-534.
- Kennedy, M. H. (1992). Bin-packing, knapsack and Chance-Constrained Application to operating room scheduling. Doctoral dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY.
- Kharraja, S. (2003). Outils d'aide à la planification et l'ordonnancement des plateaux médico-techniques (Doctoral dissertation, Saint-Etienne).
- Kharraja, S., & Marcon, E. (2003). Vers une construction automatique du plan directeur d'allocation des plages horaires. *GISEH*, 3, 56.
- Kharraja, S., Albert, F., & Chaabane, S. (2006). Blocs opératoires publics: application de la stratégie block scheduling. *Modélisation et Simulation (MOSIM)*. Rabat, Maroc, 3-5.
- Kharraja, S., Albert, P., & Chaabane, S. (2006, October). Block scheduling: Toward a master surgical schedule. In *2006 International conference on service systems and service management (Vol. 1, pp. 429-435)*. IEEE.
- Kharraja, S., Hammami, S., & Abbou, R. (2004). Plan Directeur d'Allocation des plages horaires: approche globale. *Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers, GISEH'04*.
- Kim, S. C., & Horowitz, I. (2002). Scheduling hospital services: the efficacy of elective-surgery quotas. *Omega*, 30(5), 335-346.
- Kim, S. C., Horowitz, I., Young, K. K., & Buckley, T. A. (1999). Analysis of capacity management of the intensive care unit in a hospital. *European Journal of Operational Research*, 115(1), 36-46.
- Klabi, H., Mellouli, K., Mellouli, S., & Rekik, M. (2012, June). A trust model for a multi-agent negotiation. In *2012 International Conference on Communications and Information Technology (ICCIT)* (pp. 291-296). IEEE.
- Klassen, K.J. and Rohleder, T.R. (1996). Scheduling outpatient appointments in a dynamic environment. *Journal of operations Management*, 14, 83-110.
- Kobsa, A. (1989). A taxonomy of beliefs and goals for user models in dialog systems. In *User models in dialog systems* (pp. 52-68). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kontak-Forsyth, M., & Grant, A. E. (1995). OR booking policy: development and implementation. *Canadian Nursing Journal*, 13(1).
- Koutkias, V. G., Chouvarda, I., & Maglaveras, N. (2005). A multiagent system enhancing home-care health services for chronic disease management. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 9(4), 528-537.
- Kruk, M. E., Myers, M., Varpilah, S. T., & Dahn, B. T. (2015). What is a resilient health system? Lessons from Ebola. *The Lancet*, 385(9980), 1910-1912.

- Kuhn, H. W. (2010). ItHe Hungarian methOd for tHe assignment problem,". Naval Research Logistics (NRL), 52(1), 7Y21.
- Kurihara, H., Bisagni, P., Faccincani, R., & Zago, M. (2020). COVID-19 outbreak in Northern Italy: Viewpoint of the Milan area surgical community. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 88(6), 719-724.
- Labidi, S., & Lejouad, W. (1993). De l'intelligence artificielle distribuée aux systèmes multi-agents (Doctoral dissertation, INRIA).
- Lacaze, C. (2019). Évaluation des gardes par les internes de premier semestre de médecine générale niçois depuis la réforme du troisième cycle.
- Lai, J., Ma, S., Wang, Y., Cai, Z., Hu, J., Wei, N., ... & Hu, S. (2020). Factors associated with mental health outcomes among health care workers exposed to coronavirus disease 2019. *JAMA network open*, 3(3), e203976-e203976.
- Lakemeyer, G., & Levesque, H. J. (1999, July). Query evaluation and progression in AOL knowledge bases. In *IJCAI* (pp. 124-131).
- Lamiri, M. (2007). Planification des blocs opératoires avec prise en compte des aléas (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).
- Lamiri, M., Dreot, J., & Xie, X. (2007, September). Operating room planning with random surgery times. In *2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering* (pp. 521-526). IEEE.
- Lamiri, M., Xie, X., Dolgui, A., & Grimaud, F. (2008). A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1026-1037.
- Landa, P., Aringhieri, R., Soriano, P., Tànfani, E., & Testi, A. (2016). A hybrid optimization algorithm for surgeries scheduling. *Operations Research for Health Care*, 8, 103-114.
- Lapierre, S. D., Goldsman, D., Cochran, R., & DuBow, J. (1999). Bed allocation techniques based on census data. *Socio-Economic Planning Sciences*, 33(1), 25-38. <http://www.chu-fes.ma/management-et-ntic/>
- Lebowitz, P. (2003). Schedule the short procedure first to improve OR efficiency. *AORN journal*, 78(4), 651-659.
- Lee, S., & Yih, Y. (2014). Reducing patient-flow delays in surgical suites through determining start-times of surgical cases. *European Journal of Operational Research*, 238(2), 620-629.
- Lee, S., & Yih, Y. (2014). Reducing patient-flow delays in surgical suites through determining start-times of surgical cases. *European Journal of Operational Research*, 238(2), 620-629.
- Lévy, E., Bungener, M., Dumenil, G. et Lafarge, H. (1977). Introduction à la gestion hospitalière, Edition Dunod.

- Liebensteiner MC, Khosravi I, Hirschmann MT, Heuberer PR, Board of the AGA-Society of Arthroscopy and Joint-Surgery, Thaler M. Massive cutback in orthopaedic healthcare services due to the COVID-19 pandemic. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2020;28:1705–11.
- Lindeman R-J, Sund M, Löfgren J, Basso T, Søreide K. Preventing spread of SARS-CoV-2 and preparing for the COVID-19 outbreak in the surgical department: perspectives from two Scandinavian countries. *J Surg Case Rep* 2020:rjaa131.
- Liu, Y., Chu, C., & Wang, K. (2011). A new heuristic algorithm for the operating room scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 865-871.
- Lodha, R., & Kabra, S. K. (2020). COVID-19: How to Prepare for the Pandemic?. *The Indian Journal of Pediatrics*, 87, 405-408.
- Luo, L., Luo, Y., You, Y., Cheng, Y., Shi, Y., & Gong, R. (2016). A MIP model for rolling horizon surgery scheduling. *Journal of medical systems*, 40, 1-7.
- Macario, A., Dexter, F., & Traub, R. D. (2001). Hospital profitability per hour of operating room time can vary among surgeons. *Anesthesia & Analgesia*, 93(3), 669-675.
- Macario, A., Vitez, T. S., Dunn, B., & McDonald, T. (1995). Where are the costs in perioperative care?: Analysis of hospital costs and charges for inpatient surgical care. *The Journal of the American Society of Anesthesiologists*, 83(6), 1138-1144.
- Magerlein, J. M., & Martin, J. B. (1978). Surgical demand scheduling: a review. *Health services research*, 13(4), 418.
- Marcon, E., Guinet, A., & Tahon, C. (2008). *Gestion et performance des systèmes hospitaliers* (p. 288). Lavoisier, 14 rue de Provigny, F-94236 CACHAN Cedex.
- Marcon, E., Kharraja, S., & Simonnet, G. (2003). The operating theatre planning by the follow-up of the risk of no realization. *International Journal of Production Economics*, 85(1), 83-90.
- Marcon, E., Said, K., & Gerard, S. (2001, October). Minimization of the risk of no realization for the planning of the surgical interventions into the operating theatre. In *ETFA 2001. 8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings* (Cat. No. 01TH8597) (pp. 675-680). IEEE.
- Marir, T., Mokhati, F., Bouchlaghem-Seridi, H., Acid, Y., & Bouzid, M. (2016). QM4MAS: a quality model for multi-agent systems. *International Journal of Computer Applications in Technology*, Vol. 54, No. 4, p 297-310.
- Marques, I., & Captivo, M. E. (2015). Bicriteria elective surgery scheduling using an evolutionary algorithm. *Operations Research for health care*, 7, 14-26.
- Marques, I., Captivo, M. E., & Pato, M. V. (2011, May). An integer programming approach for elective surgery scheduling in a Lisbon hospital. In *Agra, Agostinho and Doostmohammadi, Mahdi (2011) A Polyhedral Study of Mixed 0-1 Set. In: Proceedings of the 7th ALIO/EURO Workshop. ALIO-EURO 2011, Porto, pp. 57-59. (p. 181).*

- Marques, I., Captivo, M. E., & Pato, M. V. (2014). Scheduling elective surgeries in a Portuguese hospital using a genetic heuristic. *Operations Research for Health Care*, 3(2), 59-72.
- Marques, I., Captivo, M. E., & Vaz Pato, M. (2012). An integer programming approach to elective surgery scheduling: Analysis and comparison based on a real case. *OR spectrum*, 34(2), 407-427.
- Marques, I., Captivo, M. E., & Vaz Pato, M. (2012). An integer programming approach to elective surgery scheduling: Analysis and comparison based on a real case. *OR spectrum*, 34(2), 407-427.
- Mathieu, E., Ritchie, H., Rodés-Guirao, L., Appel, C., Giattino, C., Hasell, J., ... & Roser, M. (2020). Coronavirus pandemic (COVID-19). *Our world in data*.
- Mc Mahon, D., & Walsh, J. (2019, June). Operating Theatre Scheduling Using Optimisation Algorithms and Techniques: A Review. In 2019 30th Irish Signals and Systems Conference (ISSC) (pp. 1-7). IEEE.
- Messekher, M., Didier, A., Janotto, S., & Mazieres, J. (2021). Impact de l'épidémie COVID-19 sur le comportement du personnel soignant d'un service de pneumologie au travail et au domicile. *Revue des Maladies Respiratoires Actualités*, 13(1), 140.
- Min, D., & Yih, Y. (2010). Scheduling elective surgery under uncertainty and downstream capacity constraints. *European Journal of Operational Research*, 206(3), 642-652.
- Minar, N., Burkhart, R., Langton, C., & Askenazi, M. (1996). The swarm simulation system: A toolkit for building multi-agent simulations.
- Ministry of health and social protection, The Official Portal of Coronavirus in Morocco, <http://www.covidmaroc.ma/Pages/SituationCovid.aspx>, November-12-2023, 22h40 AM.
- Moisdon, J.-C. et Tonneau, D. (1999). *La démarche gestionnaire à l'hôpital*, Editions Seli Arslan, Paris
- Molina-Pariente, J. M., Fernandez-Viagas, V., & Framinan, J. M. (2015). Integrated operating room planning and scheduling problem with assistant surgeon dependent surgery durations. *Computers & Industrial Engineering*, 82, 8-20.
- Mondiale de la Santé, O. (2020). Orientations pour la lutte anti-infectieuse dans les établissements de soins de longue durée dans le contexte de la COVID-19: orientations provisoires, 21 mars 2020 (No. WHO/2019-nCoV/IPC_long_term_care/2020.1). Organisation mondiale de la Santé.
- Moroccan Society of Orthopedic and Trauma Surgery (SMACOT), Site officiel : <https://www.smacot.ma>, November-12-2023, 22h30 AM.
- Navarro RA, Reddy NC, Weiss JM, Yates AJ, Fu FH, McKee M, et al. Orthopaedic systems response to and return from the COVID-19 Pandemic: Lessons for future crisis management. *J Bone Joint Surg Am* 2020.
- Neher, R. A., Dyrdak, R., Druelle, V., Hodcroft, E. B., & Albert, J. (2020). Potential impact of seasonal forcing on a SARS-CoV-2 pandemic. *Swiss medical weekly*, 150, w20224.

- Ngalagou, P. M., Ndemba, P. A., Manga, L. O., Ekanga, Y. B., Guessogo, W. R., Ayina, C. A., & Mandengue, S. H. (2018). Syndrome du burnout chez le personnel soignant paramédical au Cameroun: Impact des activités physiques et sportives et des loisirs. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 79(1), 55-63.
- Nguyen, N. T., & Katarzyniak, R. P. (2009). Actions and social interactions in multi-agent systems. *Knowledge and Information Systems*, 18(2), 133.
- Nicola, M., Alsafi, Z., Sohrabi, C., Kerwan, A., Al-Jabir, A., Iosifidis, C., ... & Agha, R. (2020). The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): A review. *International journal of surgery*, 78, 185-193.
- Nicola, M., O'Neill, N., Sohrabi, C., Khan, M., Agha, M., & Agha, R. (2020). Evidence based management guideline for the COVID-19 pandemic-Review article. *International Journal of Surgery*, 77, 206-216.
- Nossi, A. T., Waffo, B. T., Essomba, H. N., & Mvessomba, E. A. (2021). Perception du risque lié au COVID-19, intelligence émotionnelle et santé psychologique des soignants. *European Journal of Trauma & Dissociation*, 5(2), 100212.
- Nouri, H. E., & Belkahla, O. (2015). Résolution multi-agents du problème d'emploi du temps universitaire. Éditions universitaires européennes.
- Nouri, H. E., & Belkahla, O. (2015). Résolution multi-agents du problème d'emploi du temps universitaire. Éditions universitaires européennes.
- Ntumba, J. M., Damasse, J., Jézéquel-Bréard, T., Poder, T. G., & Poder, T. G. (2020). Impact de la COVID-19 sur l'affluence des patients à l'urgence psychiatrique et le taux d'hospitalisation à Montréal [Impact of COVID-19 on the influx of patients at the psychiatric emergency and the hospitalization rate in Montreal]. *Int J Hosp Heal Technol Assess*, 2017, 12-24.
- Nwana, H. S., & Ndumu, D. T. (1999). Agents of change in future communication systems. In *Software Agents for Future Communication Systems* (pp. 58-85). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Ogulata, S. N., & Erol, R. (2003). A hierarchical multiple criteria mathematical programming approach for scheduling general surgery operations in large hospitals. *Journal of Medical Systems*, 27, 259-270.
- Olu, O. (2017). Resilient health system as conceptual framework for strengthening public health disaster risk management: an African viewpoint. *Frontiers in public health*, 5, 263.
- Oumaima Hajji Soualfi, Khalid Chmali, Omari Mohammed, Karima Elrhazi, Abdelmajid Elmrini, Abdellah Elbarkany and Bilal Harras. ANALYSIS OF SURGICAL ACTIVITY DURING THE COVID 19 PANDEMIC AND LESSONS LEARNED FOR COPING: A RETROSPECTIVE STUDY. *Central European Management Journal*. 2022, Vol. 30, Iss. 3. 1680-91.
- Patterson, P. (1997). Is an 80% to 85% utilization a realistic target for ORs?. *OR manager*, 13(5), 1-13.

- Peiffer-Smadja, N., Lucet, J. C., Bendjelloul, G., Bouadma, L., Gerard, S., Choquet, C., ... & Lescure, F. X. (2020). Challenges and issues about organizing a hospital to respond to the COVID-19 outbreak: experience from a French reference centre. *Clinical Microbiology and Infection*, 26(6), 669-672.
- Pensi, J. (2017). Résolution conjointe des problèmes de planification des opérations chirurgicales et des opérations de maintenance: application au cas des hôpitaux camerounais (Doctoral dissertation, Université Clermont Auvergne [2017-2020]).
- Perdomo, V., Augusto, V., & Xie, X. (2006, October). Operating theatre scheduling using lagrangian relaxation. In 2006 International Conference on Service Systems and Service Management (Vol. 2, pp. 1234-1239). IEEE.
- Pham, D. N., & Klinkert, A. (2008). Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1011-1025.
- Przasnyski, Z. H. (1986). Operating room scheduling: A literature review. *AORN journal*, 44(1), 67-82.
- Rachuba, S., & Werners, B. (2014). A robust approach for scheduling in hospitals using multiple objectives. *Journal of the Operational Research Society*, 65(4), 546-556.
- Razmi, J., Yousefi, M. S., & Barati, M. (2015). A stochastic model for operating room unique equipment planning under uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1796-1801.
- Remuzzi, A., & Remuzzi, G. (2020). COVID-19 and Italy: what next?. *The lancet*, 395(10231), 1225-1228.
- Revel, M., Nicolas, G., Bara, C., Moreau, M. O., Nicolle, D., & Duret, M. (2003). Synthèse des travaux du groupe sur l'implantation et l'organisation des plateaux techniques. Ministère de la santé, de la famille, et des personnes handicapées, 35p.
- Ridde, V., Gautier, L., Dagenais, C., Chabrol, F., Hou, R., Bonnet, E., ... & Zinszer, K. (2021). Learning from public health and hospital resilience to the SARS-CoV-2 pandemic: protocol for a multiple case study (Brazil, Canada, China, France, Japan, and Mali). *Health Research Policy and Systems*, 19(1), 76.
- Riou, B. (2020). Retour d'expérience de la crise Covid-19 en médecine d'urgence. *Annales françaises de médecine d'urgence*, 10(4-5), 197-198.
- Rodier, S. (2010). An attempt to unify and solve the questions of modeling and optimization within the hospital systems. Application to the New Estaing Hospital. Computer Science, Blaise Pascal University-Clermont-Ferrand II, France.
- Roland, B., Di Martinelly, C., & Riane, F. (2006, October). Operating theatre optimization: A resource-constrained based solving approach. In 2006 International conference on service systems and service management (Vol. 1, pp. 443-448). IEEE.
- Roland, B., Di Martinelly, C., Riane, F., & Pochet, Y. (2010). Scheduling an operating theatre under human resource constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 58(2), 212-220.

- Romeyer, C., & Bongiovanni, I. (2000). Les systèmes d'information hospitaliers, vecteurs de changement organisationnel: vers l'émergence d'un système d'information traçant l'activité. In *Systèmes d'Information et changement organisationnel*.
- Roosa, K., Lee, Y., Luo, R., Kirpich, A., Rothenberg, R., Hyman, J. M., ... & Chowell, G. (2020). Short-term forecasts of the COVID-19 epidemic in Guangdong and Zhejiang, China: February 13–23, 2020. *Journal of clinical medicine*, 9(2), 596.
- Rossi, R., Socci, V., Pacitti, F., Di Lorenzo, G., Di Marco, A., Siracusano, A., & Rossi, A. (2020). Mental health outcomes among frontline and second-line health care workers during the coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic in Italy. *JAMA network open*, 3(5), e2010185-e2010185.
- Saadani, N. H., Guinet, A., & Chaabane, S. (2006). Ordonnancement des blocs opératoires. In *MOSIM: Conference francophone de MODélisation et SIMulation* (Vol. 6).
- Sabar, M. (2008). Une approche à base d'agents pour la planification et l'ordonnancement en temps réel de personnel dans un contexte de chaîne d'assemblage flexible.
- Sahu D, Agrawal T, Rathod V, Bagaria V. Impact of COVID 19 lockdown on orthopaedic surgeons in India: A survey. *J Clin Orthop Trauma* 2020;11:S283–90.
- Saleh, B. B. S. B. (2019). Approche Intelligence Artificielle Distribuée pour une planification réactive et une aide à la conduite du processus de blocs opératoires hospitaliers (Doctoral dissertation, Université Bourgogne Franche-Comté; Université Libanaise).
- Saleh, B. B., El Moudni, A., Hajjar, M., & Barakat, O. (2018, April). A cooperative control model for operating theaters scheduling. In *2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)* (pp. 302-308). IEEE.
- Saleh, B. B., Saleh, G. B., & Barakat, O. (2021). Operating theater management system: block-scheduling. *Artificial Intelligence and Data Mining in Healthcare*, 83-98.
- Santé en chiffres 2021, Ministère de la Santé et de la Protection Sociale du Maroc, Direction de la planification et des ressources financière.
- Santoso, L. W., Sudiarso, A., Masruroh, N. A., & Herliansyah, M. K. (2018, June). Cluster analysis to determine the priority of operating room scheduling. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1977, No. 1). AIP Publishing.
- Sarac NJ, Sarac BA, Schoenbrunner AR, Janis JE, Harrison RK, Phieffer LS, et al. A review of state guidelines for elective orthopaedic procedures during the COVID-19 outbreak. *J Bone Joint Surg Am* 2020;102:942–5.
- Seung-Chul, K., & Ira, H. (2000). Flexible bed allocation and performance in the intensive care unit. *Journal of Operations Management*, 18(4), 427-443.
- Shanafelt, T., Ripp, J., & Trockel, M. (2020). Understanding and addressing sources of anxiety among health care professionals during the COVID-19 pandemic. *Jama*, 323(21), 2133-2134.
- Shimizu K. 2019-nCoV, fake news, and racism. *Lancet* 2020 ; 395 : 685—6, [http://dx.doi.org/10.1016/S01406736\(20\)30357-3](http://dx.doi.org/10.1016/S01406736(20)30357-3).

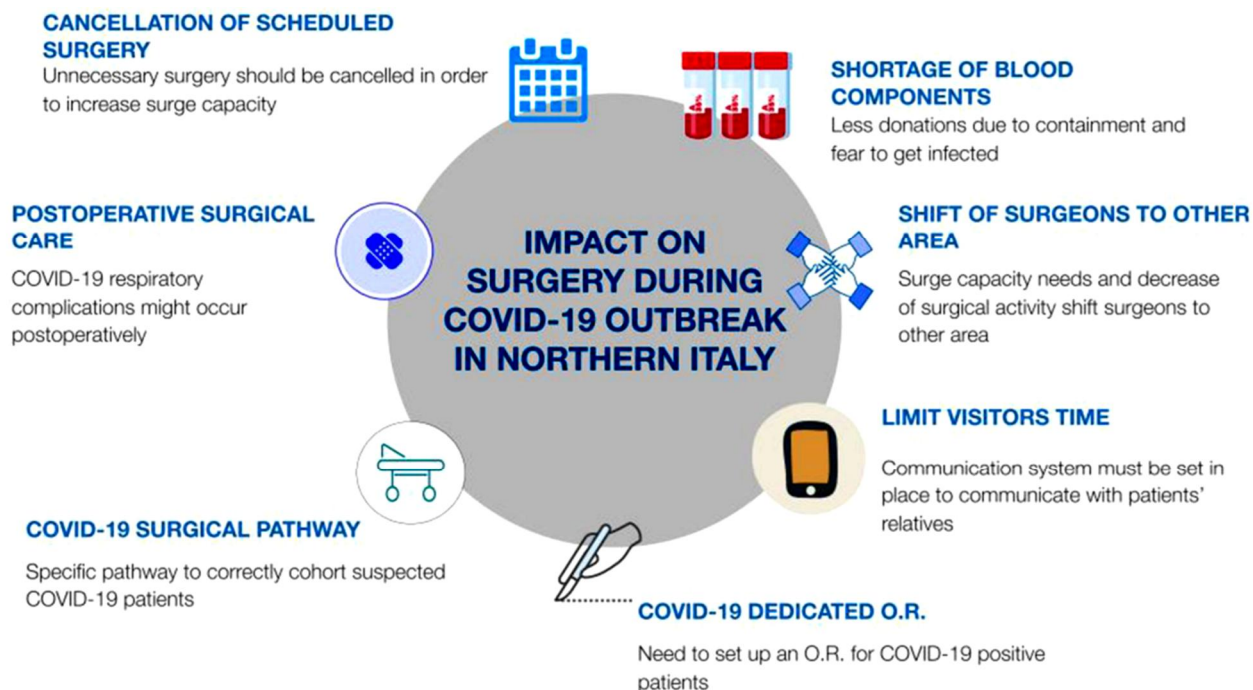
- Sier, D., Tobin, P. and McGurk, C. (1997). Scheduling Surgical Procedures, *Journal of the Operational Research Society*, 48, 884-891.
- Smolski, N., Marcon, E., Chaabane, S., Luquet, B., & Viale, J. (2002). Impact des stratégies de brancardage sur l'occupation de la SSPI: étude par simulation. 44ème Congrès national d'Anesthésie et de Réanimation, 19-22.
- Sohrabi, C., Alsafi, Z., O'Neill, N., Khan, M., Kerwan, A., Al-Jabir, A., ... & Agha, R. (2020). World Health Organization declares global emergency: A review of the 2019 novel coronavirus (COVID-19). *International journal of surgery*, 76, 71-76.
- Soualfi, O. H., El Barkan, A., & Harras, B. (2023). Planning and scheduling of operating theater under resources constraints: State of the art and future trends and impact on energy consumption. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 412, p. 01074). EDP Sciences.
- Soualfi, O. H., Elbarkany, A., Harras, B., Chmali, K., & Elmrini, A. (2022, May). Impact of the COVID-19 pandemic on the planning of operating theatres: Case of the Department of Orthopedic Surgery B4 Of Hassan II University Hospital In Fez, Morocco. In *2022 14th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)* (pp. 1-6). IEEE.
- Soualfi, O. H., Soualfi, A. H., Chmali, K., Elmrini, A., Elbarkany, A., & Harras, B. (2023, January). A Dynamic MAS to Manage a Daily Planning for a Team Operating Theater. In *International Conference on Digital Technologies and Applications* (pp. 905-915). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Soualfi, O. H., Soualfi, A. H., Chmali, K., Elmrini, A., Elbarkany, A., & Harras, B. (2023, January). A Dynamic MAS to Manage a Daily Planning for a Team Operating Theater. In *International Conference on Digital Technologies and Applications* (pp. 905-915). Cham: Springer Nature Switzerland.
- SOUALFI, O. H., SOUALFI, A. H., EL, A., & BARKANY, B. H. (2023). AN EFFICIENT PROGRAMMING SYSTEM FOR OPERATING THEATERS BASED ON DISTRIBUTED ARTIFICIAL INTELLIGENCE. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 101(20).
- Spina, S., Marrazzo, F., Migliari, M., Stucchi, R., Sforza, A., & Fumagalli, R. (2020). The response of Milan's Emergency Medical System to the COVID-19 outbreak in Italy. *The Lancet*, 395(10227), e49-e50.
- Sycara, K., Pannu, A., Williamson, M., Zeng, D., & Decker, K. (1996). Distributed intelligent agents. *IEEE expert*, 11(6), 36-46.
- Tay K, Kamarul T, Lok WY, Mansor M, Li X, Wong J, et al. COVID-19 in Singapore and Malaysia: rising to the challenges of orthopaedic practice in an evolving pandemic. *Malays Orthop J* 2020;14.
- Testi, A., Tanfani, E., & Torre, G. (2007). A three-phase approach for operating theatre schedules. *Health care management science*, 10, 163-172.

- Ti, L. K., Ang, L. S., Foong, T. W., & Ng, B. S. W. (2020). What we do when a COVID-19 patient needs an operation: operating room preparation and guidance. *Canadian Journal of Anesthesia/Journal canadien d'anesthésie*, 67, 756-758.
- Triki, S. (2018). *Système multi-agent ambiant pour faciliter l'autonomie et l'accessibilité aux espaces publics des personnes ayant des déficiences cognitives* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- Van Huele, C., & Vanhoucke, M. (2014). Analysis of the integration of the physician rostering problem and the surgery scheduling problem. *Journal of medical systems*, 38, 1-16.
- Vignaud, P., & Prieto, N. (2020). Impact psychique de la pandémie de Covid-19 sur les professionnels soignants. *Actualités pharmaceutiques*, 59(599), 51-53.
- Vijayakumar, B., Parikh, P. J., Scott, R., Barnes, A., & Gallimore, J. (2013). A dual bin-packing approach to scheduling surgical cases at a publicly-funded hospital. *European Journal of Operational Research*, 224(3), 583-591.
- Vlah Jerić, S., & Rui Figueira, J. (2010). An interactive approach for multiple criteria scheduling in a Croatian hospital. *Croatian Operational Research Review*, 1(1), 93-103.
- Wang, C., Horby, P. W., Hayden, F. G., & Gao, G. F. (2020). A novel coronavirus outbreak of global health concern. *The lancet*, 395(10223), 470-473.
- Wang, C., Pan, R., Wan, X., Tan, Y., Xu, L., Ho, C. S., & Ho, R. C. (2020). Immediate psychological responses and associated factors during the initial stage of the 2019 coronavirus disease (COVID-19) epidemic among the general population in China. *International journal of environmental research and public health*, 17(5), 1729.
- Wang, L., Fu, Q. L., Lee, C. G., & Zeng, Y. R. (2013). Model and algorithm of fuzzy joint replenishment problem under credibility measure on fuzzy goal. *Knowledge-Based Systems*, 39, 57-66.
- Wang, S., Roshanaei, V., Aleman, D., & Urbach, D. (2016). A discrete event simulation evaluation of distributed operating room scheduling. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 6(4), 236-245.
- Wang, Y., Tang, J., & Fung, R. Y. (2014). A column-generation-based heuristic algorithm for solving operating theater planning problem under stochastic demand and surgery cancellation risk. *International Journal of Production Economics*, 158, 28-36.
- Wang, Y., Tang, J., Pan, Z., & Yan, C. (2015). Particle swarm optimization-based planning and scheduling for a laminar-flow operating room with downstream resources. *Soft Computing*, 19, 2913-2926.
- Wei EK, Long T, Katz MH. Nine Lessons Learned From the COVID-19 Pandemic for Improving Hospital Care and Health Care Delivery. *JAMA Intern Med*. 2021;181(9):1161– 1163. doi:10.1001/jamainternmed.2021.4237
- Weiss, E.N. (1990). Models for determining started start times and case orderings in hospital operating rooms. *IIE Transactions*, 22, 143-150.

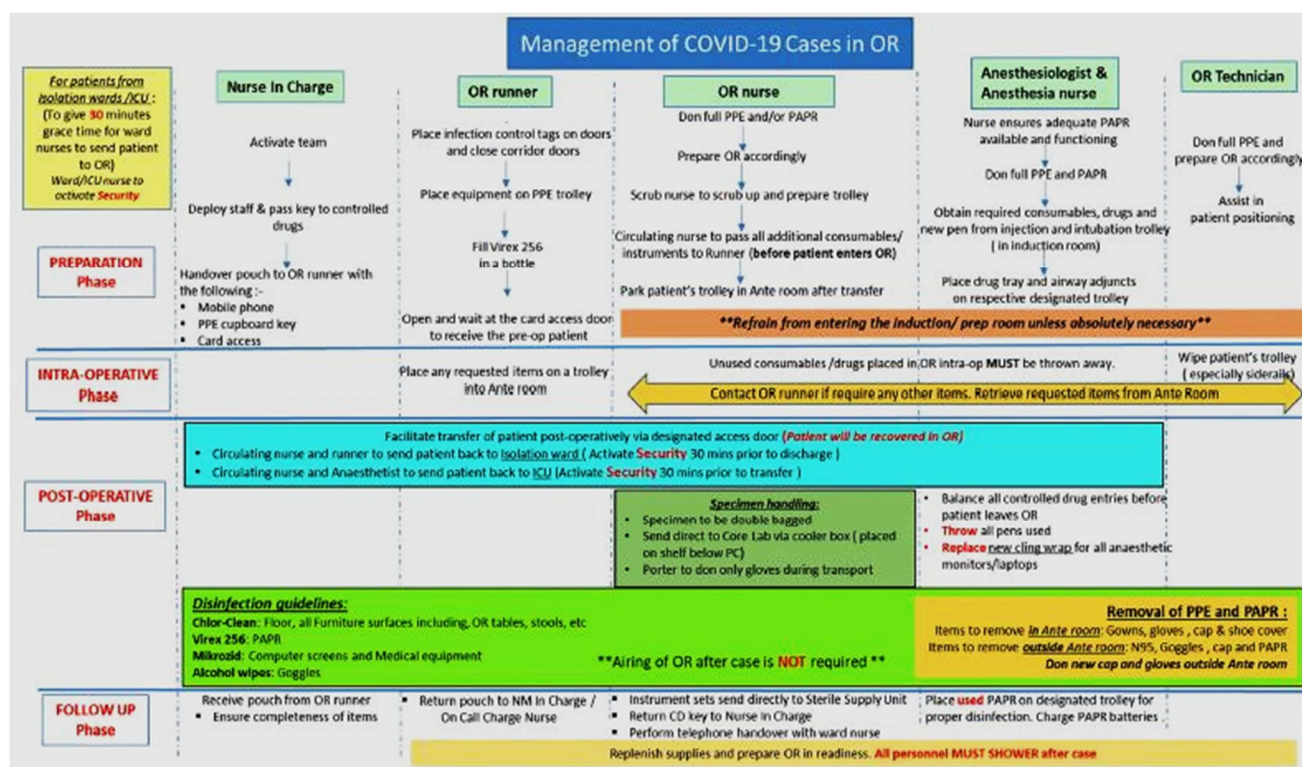
-
- Willan, J., King, A. J., Jeffery, K., & Bienz, N. (2020). Challenges for NHS hospitals during covid-19 epidemic. *BMJ*, 368.
- Wolosewicz, C., Dautère-Pères, S., & Aggoune, R. (2006). A new approach for solving integrated planning and scheduling problem. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(3), 191-196.
- Wooldridge, M. (1996). Reasoning about knowledge by Ronald Fagin, Joseph Y. Halpern, Yoram Moses and Moshe Y. Vardi, MIT Press, Cambridge, MA, 1995, pp 477, \$45.00 cloth, ISBN 0-262-06162-7. *The Knowledge Engineering Review*, 11(4), 374-377.
- Wooldridge, M., & Jennings, N. R. (1995). Intelligent agents: Theory and practice. *The knowledge engineering review*, 10(2), 115-152.
- Xiang, W. (2017). A multi-objective ACO for operating room scheduling optimization. *Natural Computing*, 16, 607-617.
- Xiang, W., Yin, J., & Lim, G. (2015). An ant colony optimization approach for solving an operating room surgery scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 85, 335-345.
- Yu, W., Yunhui, M., Huabo, Z., & Jiafu, T. (2013, May). A particle swarm optimization algorithm on the surgery scheduling problem with downstream process. In 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC) (pp. 850-855). IEEE.
- Zangrillo, A., Beretta, L., Scandroglio, A. M., Monti, G., Fominskiy, E., Colombo, S., ... & COVID-BioB Study Group. (2020). Characteristics, treatment, outcomes and cause of death of invasively ventilated patients with COVID-19 ARDS in Milan, Italy. *Critical Care and Resuscitation*, 22(3), 200-211.
- Zhang, W. R., Wang, K., Yin, L., Zhao, W. F., Xue, Q., Peng, M., ... & Wang, H. X. (2020). Mental health and psychosocial problems of medical health workers during the COVID-19 epidemic in China. *Psychotherapy and psychosomatics*, 89(4), 242-250.
- Zhu, N., Zhang, D., Wang, W., Li, X., Yang, B., Song, J., ... & Tan, W. (2020). A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019. *New England journal of medicine*, 382(8), 727-733.

Annexes

Annexe I : Impact de la pandémie COVID-19 sur la pratique chirurgicale. (Kurihara, H. et al, 2020)



Annexe II : Management des cas COVID-19 dans les blocs opératoires (Ti, L. K. et al, 2020)



Annexe III : le langage JAVA

Le langage Java est un langage généraliste de programmation synthétisant les principaux langages existants lors de sa création en 1995 par *Sun Microsystems*. Il permet une programmation orientée-objet (à l'instar de SmallTalk et, dans une moindre mesure, C++), modulaire (langage ADA) et reprend une syntaxe très proche de celle du langage C. Outre son orientation objet, le langage Java a l'avantage d'être **modulaire** (on peut écrire des portions de code génériques, c-à-d utilisables par plusieurs applications), **rigoureux** (la plupart des erreurs se produisent à la compilation et non à l'exécution) et **portable** (un même programme compilé peut s'exécuter sur différents environnements). En contre-partie, les applications Java ont le défaut d'être plus lentes à l'exécution que des applications programmées en C par exemple.

Java est un langage interprété, ce qui signifie qu'un programme compilé n'est pas directement exécutable par le système d'exploitation mais il doit être interprété par un autre programme, qu'on appelle interpréteur.

Un programmeur Java écrit son code source, sous la forme de classes, dans des fichiers dont l'extension est .java. Ce code source est alors compilé par le compilateur javac en un langage appelé byte code et enregistre le résultat dans un fichier dont l'extension est .class. Le byte code ainsi obtenu n'est pas directement utilisable. Il doit être interprété par la machine virtuelle de Java qui transforme alors le code compilé en code machine compréhensible par le système d'exploitation. C'est la raison pour laquelle Java est un langage portable : le byte code reste le même quelque soit l'environnement d'exécution. En 2009, Sun Microsystems est racheté par Oracle Corporation qui fournit dorénavant les outils de développement Java SE (Standard Edition) contenus dans le Java Development Kit (JDK).

Annexe IV : Programmation orientée agents

La programmation orientée agents a été proposée par Yoav Shoham en 1993 comme un nouveau paradigme de programmation, que l'on peut voir comme une spécialisation de la programmation orientée objets. Dans cette approche, les agents sont les éléments centraux du langage, de la même façon que les objets sont centraux pour les langages orientés objets. La perspective sur les agents est cognitive : les agents sont caractérisés par des notions mentales comme leurs croyances, leurs décisions et leurs obligations. De plus, à chaque agent est associé un ensemble d'habiletés qui représentent ce que l'agent sait faire. En même temps, la programmation orientée agents suppose qu'on va développer des programmes dans lesquels plusieurs agents interagissent, ce qui met l'accent sur la dimension sociale des agents. Le langage de programmation proposé par Shoham comme démonstration de ce nouveau paradigme s'appelle AGENT0.

La différence principale entre un tel langage et un langage de programmation classique que l'on pourrait utiliser pour développer des agents, vient du fait que les notions mentales qui caractérisent les agents apparaissent dans le langage lui-même, et que la sémantique du langage est intimement liée à la sémantique de ces notions mentales. La programmation orientée agents peut être vue comme une spécialisation de celle orientée objets parce que les modules du programme sont maintenant des agents, c'est-à-dire des objets avec un état qui définit les notions mentales associées, et que les messages entre objets sont remplacés par des messages entre agents. En quoi les messages entre agents diffèrent-ils de ceux entre objets ? Premièrement, parce que ces messages sont modélisés en partant de la théorie des actes de parole, qui s'intéresse aux actions de communication comme

informer, demander, offrir, accepter, rejeter et d'autres. Deuxièmement, puisque les agents sont autonomes et dotés de capacités mentales, ils ont la liberté de décider s'ils vont ou non exécuter l'action spécifiée dans le message. Par contraste, un objet recevant un message va toujours exécuter l'action spécifiée dans le message.

Avec l'évolution des théories concernant les agents et des langages de programmation associés, on peut également souligner des différences entre la programmation orientée objet (POO) et la programmation orientée agent (POA) :

- Les agents sont autonomes alors que les objets ne le sont pas ; un agent va décider par son propre processus de décision s'il exécute ou non une action requise ;
- Les agents ont leurs propres buts et ils agissent d'une manière pro-active pour atteindre leurs buts (par exemple, ils saisissent des opportunités) alors que les objets ne le font pas ;
- Les agents sont capables d'un comportement social : ils peuvent s'engager dans des interactions complexes, par exemple coopération, compétition, négociation, avec d'autres agents ; ce n'est pas le cas des objets ;
- Un système multi-agents est, normalement, un système dans lequel les agents correspondent à des chemins d'exécution séparés ; chaque agent a son propre chemin d'exécution alors que les objets, à part les objets concurrents, ne présentent pas cette caractéristique.

Annexe V : la plateforme JADE

JADE (Java Agent Development Framework) est une plate-forme multi-agents développée en Java par CSELT (Groupe de recherche de Gruppo Telecom, Italie) qui a comme but la construction des systèmes multi-agents et la réalisation d'applications conformes à la norme FIPA (FIPA, 1997). JADE comprend deux composantes de base : une plate-forme agents compatible FIPA et un paquet logiciel pour le développement des agents Java.

Les premiers documents de spécification de la norme FIPA (FIPA 1997), appelés spécifications FIPA97, établissent les règles normatives qui permettent à une société d'agents d'inter-opérer. Tout d'abord, les documents FIPA décrivent le modèle de référence d'une plate-forme multi-agents où ils identifient les rôles de quelques agents clés nécessaires pour la gestion de la plate-forme, et spécifient le contenu du langage de gestion des agents et l'ontologie du langage.

JADE contient les bibliothèques de Java (classes) qui sont requises pour le développement des applications d'agents, ainsi que le run-time qui fournit les services de base. Chaque instance de JADE run-time est appelée un container (puisqu'il "contient" des agents). L'ensemble de tous les containers est appelé plateforme et fournit une couche homogène qui cache complètement la complexité et la diversité du réseau des agents.