



Approche Intelligence Artificielle Distribuée pour une planification réactive et une aide à la conduite du processus de blocs opératoires hospitaliers.

Bilal Bou Saleh Bou Saleh

► To cite this version:

Bilal Bou Saleh Bou Saleh. Approche Intelligence Artificielle Distribuée pour une planification réactive et une aide à la conduite du processus de blocs opératoires hospitaliers.. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université Bourgogne Franche-Comté; Université Libanaise, 2019. Français. NNT : 2019UBFCA028 . tel-02799649

HAL Id: tel-02799649

<https://theses.hal.science/tel-02799649>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE LIBANAISE
BEIRUT- LIBAN
PREPAREE EN COTUTELLE A L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-
MONTBELIARD
BELFORT-FRANCE**

Ecole doctorale n°37

École doctorale SPIM (Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques)

Doctorat d'automatique

Par

BOU SALEH Bilal

Approche Intelligence Artificielle Distribuée pour une planification réactive et une aide à la conduite du processus de blocs opératoires hospitaliers.

Thèse présentée et soutenue à « Belfort », le « 19 décembre 2019 »

Composition du Jury :

YOUSSEFI Mohamed	Professeur des Universités, Université Hassan II Casablanca	Président
MASMOUDI Malek	Maître de Conférences HDR, Université Jean-Monnet	Rapporteur
BUC Emmanuel	Professeur des Universités Praticien hospitalier, Université Clermont Auvergne	Examineur
CHAABANE Sondes	Maître de Conférences, Université Polytechnique Hauts-de- France	Examinatrice
CHEBBO Nazir	Professeur des Universités, Université Libanaise Faculté de technologie Saida	Examineur
EL MOUDNI Abdellah	Professeur des Universités, Université de Technologie Belfort-Montbéliard	Directeur de thèse
HAJJAR Mohammed	Professeur des Universités, Université Libanaise Faculté de technologie Saida	Directeur de thèse
BARAKAT Oussama	Maître de Conférences Université de Franche-Comté	Codirecteur de thèse
TAVERNIER Laurent	Chirurgien ambulatoire, Chef de service chez Service ORL CHU Besançon	Invité

Titre : Approche Intelligence Artificielle Distribuée pour une planification réactive et une aide à la conduite du processus de blocs opératoires hospitaliers.

Mots clés : Bloc opératoire, IAD, système multi-agents, planification dynamique, réactivité processus, aide à la décision

Résumé : Le bloc opératoire est l'un des secteurs les plus déterminant d'un hôpital. L'optimisation de son processus est une priorité des gestionnaires de l'hôpital. La littérature abondante sur le sujet est unanime sur le fait que planifier et ordonnancer les interventions, en satisfaisant une grande multitude d'exigences et de contraintes rend la construction du programme opératoire une tâche très complexe. En plus, la construction du programme est loin de suffire, il est impératif de maintenir automatique en « Near Real Time » le planning en fonction des événements apparaissant au cours de la phase aval de réalisation.

L'objectif de cette thèse est d'apporter une méthodologie de gestion du processus du bloc opératoire, intégrant d'une part une aide à la décision pour optimiser la planification prédictive et permettre d'autre part une replanification dynamique pour garantir une réactivité du processus de ce secteur médicale. Notre étude a débuté par un état de l'art sur les problématiques de gestion du bloc opératoire et les solutions proposées, avec un but initial : cibler la démarche d'amélioration à engager. Nous avons constaté que la complexité et la lourdeur des modèles existants souvent basés sur la recherche opérationnelle et surtout l'explosion combinatoire des contraintes rendent impossible de trouver l'optimum pour des tailles d'instances réalistes. Cela nous a décidé pour notre étude à rompre avec la stratégie classique d'amélioration continue. Nous avons privilégié une approche IAD pour rechercher des solutions par une logique programmée plutôt que par les résolutions calculées des approches traditionnelles. Par la suite, nous avons modélisé les acteurs du processus de planification des interventions chirurgicales à l'aide d'un système multi-agents. .

L'approche proposée permet de fournir la plus convenable planification prédictive de l'activité du bloc opératoire. Chaque intervention chirurgicale est planifiée unitairement en tenant compte des règles, de toutes les contraintes mais aussi des préférences des chirurgiens. Le même modèle permet en phase aval avec une aide à la décision, l'affectation d'une intervention chirurgicale face à une situation d'urgence. Pour une meilleure performance couplée à une réactivité accrue, nous avons abordé aussi, avec ce modèle, le problème d'ajustement dynamique des plannings pour équilibrer la charge en heure de chirurgie entre les salles opératoires.

Dans la méthodologie proposée, l'aide à la décision est basée dans l'utilisation des connaissances et des règles du savoir-faire et de leur capitalisation selon les principes d'un système expert. En outre, nous avons proposé un ensemble d'indicateurs de performance et de réactivité calculés automatique qui sont susceptibles d'être mis en place dans un futur outil de validation et qui peuvent être utilisés comme feedback pour optimiser le processus d'aide à la décision.

La collaboration avec un CHU au Liban a permis d'obtenir des données sur des scénarios d'instances de chirurgies hebdomadaires. Les résultats de quelques simulations mettent en évidence la convenance, de l'approche IAD, à résoudre la problématique posée.

Title : Distributed Artificial Intelligence approach for reactive planning and assistance in managing the hospital operating theater process.

Keywords : Operating theater, IAD, multi-agent system, dynamic planning, process reactivity, decision support.

Abstract : The operating theater is one of the most important sector of a hospital. Optimizing its process is a priority for hospital managers. The abundant literature on the subject is unanimous on the fact that planning and sequencing interventions, satisfying a great multitude of requirements and constraints makes the construction of the operational program a very complex task. In addition, the construction of the program is far from enough, it is imperative to maintain automatic in "Near Real Time" the schedule according to the events appearing during the downstream phase of realization.

The objective of this thesis is to provide a methodology for the management of the operating room process, integrating on the one hand a decision supports to optimize the predictive planning and on the other hand to allow a dynamic replanning to guarantee a reactivity of the process of this medical sector.

Our study began with a state of the art on the issues of operating theater management and proposed solutions, with an initial goal: to target the improvement approach to engage. We have noticed that the complexity and the heaviness of the existing models often based on the operational research and especially the combinatorial explosion of the constraints makes it impossible to find the optimum for realistic sizes of instances. This led us to decide that our study would break with the traditional strategy of continuous improvement. We favored an IAD approach aimed at finding solutions according to a programmed logic rather than the calculated resolutions of traditional approaches. Subsequently, we modeled the actors in the surgical intervention planning process using a multi-agent system.

The proposed approach provides the most appropriate predictive planning of the operating theater activity. Each surgical procedure is planned individually considering the rules, all the constraints but also the surgeons' preferences. The same model allows in the downstream phase with a decision aid, the assignment of a surgical intervention facing an emergency situation. For a better performance coupled with an increased reactivity, we have also approached, with this model, the problem of dynamic adjustment of the schedules to balance the load in hours of surgery between the operating rooms.

In the proposed methodology, decision support is based on the use of knowledge and the rules of know-how and their capitalization according to the principles of an expert system. In addition, we have proposed a set of automatic calculated performance and responsiveness indicators that are likely to be implemented in a future validation tool and that can be used as feedback to optimize the decision support process.

Collaboration with a CHU in Lebanon provided data on scenarios of weekly surgeries. The results of some simulations highlight the convenience of the IAD approach in solving the problem.



Université Bourgogne Franche-Comté
32, avenue de l'Observatoire
25000 Besançon

SOMMAIRE

Introduction générale :	
Chapitre 1 : Les Blocs opératoires hospitaliers.	19
1 Blocs opératoires : Contexte et enjeux.....	20
1.1 Introduction	20
1.2 Description des blocs opératoires	22
1.3 Processus opératoire	27
2 Management des blocs opératoires : problématique	30
2.1 Programmation opératoire.	30
2.1.1 Les contraintes de la programmation opératoire :	31
2.1.2 Planification et ordonnancement du bloc opératoire.....	34
2.2 Gestion d'un processus fortement perturbé	40
2.2.1 Le type des demandes	40
2.2.2 Durée d'intervention	41
2.2.3 Disponibilité des ressources.	42
2.3 Problématique	43
2.4 Objectifs.....	45
2.5 Conclusion	45
Chapitre 2 : Etat de l'art en gestion hospitalière	47
3 Management des systèmes hospitaliers.....	48
3.1 Introduction	48
3.2 Systèmes d'information hospitaliers	48
3.3 Systèmes de pilotage	51
3.4 Planification dynamique	56
3.4.1 L'ordonnancement robuste face aux aléas	57
3.4.2 Ordonnancement réactif	58
3.5 Les architectures de pilotage	59
3.5.1 Pourquoi, un processus bloc opératoire réactif ?.....	60
3.5.2 Pourquoi une Architecture Hybride de Pilotage ?.....	61
4 Etat de l'art en planification et ordonnancement du bloc opératoire	63
4.1 Introduction	63
4.2 An Overview :	63
4.3 Le problème de la planification du bloc opératoire.	66
4.4 Méthodologie pour une planification et un ordonnancement intégrés.	69
4.5 Planification et un ordonnancement axés sur les ressources.	72

4.5.1	Programmation prédictive axée uniquement sur les salles opératoires.....	72
4.5.2	La programmation prédictive incluant les salles opératoires et salle de réveil..	73
4.5.3	Programmation prédictive incluant les ressources de transport du patient (brancardiers).....	75
4.5.4	Programmation prédictive incluant l'USI.	76
4.5.5	Programmation prédictive incluant autres ressources.....	77
4.6	Une vue synthétique de la revue de littératures :	78
4.6.1	Décision opérationnel en ligne/hors ligne.	78
4.6.2	Littérature sur la planification et/ou l'ordonnancement.	79
4.6.3	Les objectifs ou critères d'optimisation.	79
4.6.4	Les méthodologies et les outils de résolution.....	81
4.6.5	Les ressources humaines et matérielles.....	82
4.7	Conclusions	83
Chapitre 3 : MAS pour optimiser le processus des blocs opératoires hospitaliers.		92
5	Systèmes Multi-Agents.....	93
5.1	Pertinence de MAS pour la modélisation du bloc opératoire.	93
5.2	Concepts Agents et systèmes multi-agents.....	94
5.3	FIPA Specifications.....	96
5.4	Communication, Langages et Ontologies.....	98
5.5	Management des agents.....	101
5.6	Topologies des structures d'organisation.	103
5.7	Architectures des systèmes de contrôle basés sur agents et multi-agents	105
5.8	Interaction entre agents.....	107
6	Structure-cadre de développement multi-agents.....	109
6.1	JADE	110
6.2	« Behaviours » des agents	112
6.3	Méthodologies / Algorithmes	114
7	Planification coopérative par multi-agents	115
7.1	Caractérisation des tâches MAP coopératives.....	116
7.2	Langages de spécification des tâches MAP coopératif.	117
7.3	Confidentialité dans les coopératives MAP.....	118
7.3.1	Modèle théorique de confidentialité.....	118
7.3.2	Application pratique de la confidentialité	119
7.4	Classification des systèmes MAP coopératifs	119
7.5	MAS Platforms	122
Chapitre 4 : Le modèle MAS du Bloc opératoire		124
8	Domaine et énoncé du problème.....	124

9	Architecture hybride de contrôle.....	125
10	Architecture du système multi-agents	130
11	Stratégie de décision du choix.....	133
11.1	Préférences et priorités	134
11.2	Evaluation des scores de capacité.....	135
11.3	Coût virtuel	136
12	Protocoles de négociation pour la répartition des chirurgies.	137
12.1	Contract NET Protocol	137
12.2	Applications basées sur CNP en relation avec Bloc opératoire.....	139
12.3	« Simulated Trading Protocole »	140
12.3.1	La phase des propositions de vente et d'achat :	142
12.3.2	Phase recherche du « Trading-Matching » marché réalisable et optimal :	144
12.3.3	Phase de replanification : mise à jour effective des plannings.....	145
13	Cas d'étude	146
13.1	Algorithme d'affectation des chirurgies d'urgence par CNP.	146
1)	Présélection des soumissionnaires :.....	146
2)	Annonces :	146
3)	Soumission :	147
4)	Attribution :	148
13.2	Algorithme d'équilibrage dynamique de la charge entre les salles par ST protocole. 149	
13.3	« Block-scheduling »	151
13.3.1	Définition du problème	151
13.3.2	Programmation opératoire	152
13.3.3	Block-Scheduling algorithm	152
13.3.4	Algorithme d'optimisation	153
13.3.5	Performance metrics.....	153
13.3.6	Formulation du problème MILP	154
13.3.7	Test expérimental	157
14	Conclusion.....	160
15	Conclusion générale	161
16	Perspectives	165

Table des Figures

Figure 1:Interaction bloc opératoire et autres services (Fei, 2006).....	22
Figure 2:Processus Conventionnel (UAP) du Bloc opératoire.....	28
Figure 3:Les étapes fonctionnelles d'une intervention en chirurgie.(Chaaban, 2004)	28
Figure 4:opérer le patient (Chaaban, 2004).....	29
Figure 5:planification coopérative pour l'élaboration du programme opératoire (Kharraja, 2003).....	38
Figure 6:Cycle de vie d'un agent, basé sur FIPA [Std. SC00023K].....	102
Figure 7:Modèle de référence de gestion des agents FIPA, basé sur FIPA [Std. SC00023K].	103
Figure 8:Communication entre agents utilisant trois behaviors différents (Broker, Facilitator, and Matchmaker).....	113
Figure 9:Management of the preoperative phase	127
Figure 10 : Modèle de contrôle hybride pour la gestion d'un bloc opératoire de chirurgie ...	128
Figure 11 : Real time local controller work flow	129
Figure 12:Multi-Agent Planner system for an operating theater management	131
Figure 13:The CNP interaction	137
Figure 14:The interaction diagram of FIPA-contract-net	138
Figure 15:Le Trading Graph et le Trading Matching en gras selon Bachem et al (1996).....	141
Figure 16:Message emergency announcement.	147
Figure 17:emergency surgery bid.....	148
Figure 18:Message emergency award.	148
Figure 19:Diagramme de séquence du protocole d'allocation des urgences	149
Figure 20:diagramme de séquence équilibrage de la charge.....	150
Figure 21:diagramme de séquence équilibrage de la charge.....	151

Liste des Tableaux

Tableau 1:Différentes configurations architecturales des plateaux médicotechniques.....	26
Tableau 2:niveau décisionnel versus modèle d'approche (S. Rodier 2010)	33
Tableau 3:Some of the most common standards/applications used in agent-based systems ...	98
Tableau 4:Structure d'un message dans la norme FIPA 00037.	99
Tableau 5:Exemple de message ACL, à l'aide de l'ontologie par défaut.	100
Tableau 6:cahier de charge.....	157
Tableau 7:planning résultat	157
Tableau 8:Block scheduling par MILP	158
Tableau 9:Block scheduling par MAS	159

Publications :

1. B. Saleh, E. Abdellah, C. Lina, O. Barakat, et B. Ghazi, « Operating Room Management System: Patient Programming. », MATEC Web Conf., vol. 281, p. 05004, janv. 2019.
2. B. B. Saleh, A. E. Moudni, M. Hajjar, et O. Barakat, « An Entire Operating Theater Management System », J. Mech. Civ. Eng. IOSRJMCE, p. 12.
3. B. B. Saleh, A. E. Moudni, M. Hajjar, et O. Barakat, « A Cooperative Control Model Foroperating Theaterscheduling », in 2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2018, p. 302-308.
4. B. Bou Saleh, A. El Moudni, M. Hajjar, et O. Barakat, « A Multi-Agent Architecture for Dynamic Scheduling of Emergencies in Operating Theater », in Intelligent Systems and Applications, 2019, p. 1256-1272.
5. B. B. Saleh, A. E. Moudni, M. Hajjar, et O. Barakat, « Distributed Artificial Intelligence to support the progression of the operating theater process », J. Comput. Eng. IOSRJCE, p. 12.
6. B. B. Saleh, A. E. Moudni, M. Hajjar, O. Barakat, et G. B. Saleh, « Towards an Integral Operating Room Management System », in 2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2018, p. 433-439.
7. B. Bou Saleh, G. Bou Saleh, M. Hajjar, A. El Moudni, et O. Barakat, « Multi-agents Planner for Assistance in Conducting Energy Sharing Processes », in Proceedings of the 8th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT'18), Vol.1, 2020, p. 449-462.

A Mon chère père

A ma chère mère

A ma Fiancée

Et à la mémoire de mes grands parents

Remerciement :

Je tiens à présenter toute ma gratitude aux personnes qui, m'ont accompagné ou soutenu dans ce travail. Mes plus sincères remerciements sont adressés aux directeurs de ma thèse Professeur EL MOUDNI Abdallah et Professeur HAJJAR Mohamad ainsi qu'au codirecteur de thèse docteur BARAKAT Oussama pour l'excellence et la pertinence de leurs soutiens scientifiques et humains. Votre expérience, vos recommandations, vos qualités pédagogiques et humaines m'ont permis de persister et de mener à terme ce travail de recherche.

Aussi, mes remerciements vont à Messieurs les Professeurs YOUSSEFI Mohamed, MASMOUDI Malek, BUC Emmanuel, ainsi qu'à docteur madame CHAABANE Sondes, pour m'avoir honoré de participer au jury de cette thèse en tant que rapporteurs ou examinateurs.

Je tiens à remercier le chef de département génie industriel et maintenance, professeur CHEBO Nazir. C'est parce que vous avez cru en mes capacités que j'ai pu intégrer l'UTBM et j'ai eu l'opportunité d'y préparer le diplôme d'ingénieur en génie industriel. Je vous dois à tout jamais mon respect et ma loyauté, je suis honoré par votre participation au jury de ma thèse.

Je tiens à remercier aussi toute l'équipe du Laboratoire nanomédecine et du Laboratoire des Systèmes Industriels. Vous m'avez assuré un environnement riche en savoir mais aussi agréable dans une ambiance amicale et familiale. C'est grâce à cet environnement que j'ai trouvé la motivation nécessaire pour persévérer et mener à bien ces travaux de recherche.

Merci à tous mes amis en France et au Liban. L'un des facteurs de réussite est d'être bien entouré. De mon côté, je l'étais par votre présence et par vos appels téléphoniques quotidiens. Merci à vous, mes chers amis, mes frères : Toufic, William, Mazen, Kadah, Tawil Chehade, Samer, Jaguwar, Fadi. Vous faites partie de ma vie, merci pour votre soutien, pour votre amitié sincère et pour m'avoir aidé à décompresser pendant quelques moments difficiles.

Merci à vous : mon frère jumeau, docteur Mohamed, et ma sœur docteur chirurgienne Nour, vous m'avez entouré toujours avec une tendresse particulière. Vous vous êtes occupés de mon bien être pendant toute cette période je n'oublierai pas nos coups de fils, nos sorties et nos délires. Merci à vous d'avoir agrandi notre famille en introduisant deux nouveaux membres aussi fous que nous, je parle du docteur Hamieh Ahmed et docteur Harris Fatima. En effet, durant ces trois dernières années, on a eu un été inoubliable celui du mariage de Mohamed et un été exceptionnel celui du mariage de Nour. Que dieu vous protège et qu'un de ces jours nous serons tous réunis à nouveau.

J'ai une pensée à ma famille au Liban, grand-mère Fariha, tantes Nariman, Nahed, Noha, Manal, oncles Nassib, Zaher, Ali et leurs familles, mes cousines et amies Dalia et docteur Rime. Merci à tous de m'avoir imprégné par les valeurs d'une famille soudée et solidaire.

J'ai aussi une pensée pour ma belle Famille, Abed, Jinane, Ghina, oncles Hussein, Ahmed, Ali, tantes Dima et Rahme. Vous faites désormais partie de ma vie et j'en suis heureux. Merci pour les bons moments que vous me faites vivre et de votre grand appui affectif et moral.

A ma princesse : il y a 5 ans tu es entrée dans ma vie, et tu as fait entrer avec toi le bonheur de vivre. Tu es pour moi dans tout ce qui est beau, tu es toujours là pour moi, tu es mon amie, ma confidente, mon amour. Nous avons toute une vie à partager et je ferais de mon mieux pour que tu sois heureuse. Ma chère docteur pharmacienne Rayane Serhane bientôt Bousaleh je t'aimerai pour toujours.

A vous ma mère et mon père : toutes les pages du monde ne pourront pas suffire pour montrer ma gratitude envers vous. Depuis notre plus jeune âge, vous étiez là vous souciez de notre bien-être et de nos études. Maman ; pendant toute la période scolaire, tu nous as consacré tout ton temps, tu étais une tendre mère et une enseignante d'une efficacité inégalée. Tu nous as voulu heureux épanouis et toujours parmi les meilleurs.

A toi mon père ; que dire ? Merci pour tout, mon père et mon professeur et mon guide. Quand tout va mal, il suffit de t'appeler et tout rentre dans l'ordre, toi qui a le talent de rendre tout ce qui nous paraissait impossible, possible. Tu as su depuis toujours ma détermination à faire ce parcours de formation, je voulais être comme toi, un professeur aimé par ses étudiants, brillant dans son travail, clair dans ses cours, respecté par ses collègues, toujours prêt à aider, expliquer, intervenir. Tu es mon idole, mon modèle et l'exemple à suivre, Je tiens à te dédier à toi ce travail, au matador (math adore), jadis appelé ainsi par ses élèves en France, au professeur BOU SALEH Ghazi, ma fierté, mon ami, mon père.

Papa et maman : vous pouvez être fiers de ce que nous sommes devenus, moi, mon frère et ma sœur, vous avez réussi, mais le chemin continu : nous aurons toujours besoin de vous, dans votre nouvelle mission de grands- parents.

Introduction générale :

Le bloc opératoire est financièrement l'un des domaines les plus lourds d'un hôpital. L'optimisation de son fonctionnement est donc l'une des premières préoccupations des gestionnaires de l'hôpital. Compte tenu du grand nombre des ressources humaines très hautement qualifiées, des ressources matérielles très coûteuses, de la grande difficulté à coordonner les procédures chirurgicales avec la disponibilité des ressources et des nombreuses perturbations intrinsèques à son processus, ce secteur est également de loin le plus complexe à manager en terme de planification mais aussi en terme de conduite en temps réel.

En outre, dans un contexte caractérisé par une compétitivité rude et une recherche constante de performances améliorées, les hôpitaux sont confrontés au défi majeur d'adapter leur système de gestion pour assurer leur survie. La production de soins de santé ne se concentre plus exclusivement sur l'objectif de l'excellence médicale, mais doit 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 s'assurer 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 problème de la planification du bloc opératoire a été fréquemment étudié par le passé et a donné lieu à une littérature abondante. Cette littérature montre une utilisation exclusive d'approches déterministes ou stochastiques de la planification avec des **données statiques**. Ces approches prennent mal en compte ou pire ignorent l'ensemble au complet des perturbations. Cependant, le processus de la salle d'opération est souvent soumis à de nombreuses formes de perturbation, principalement liées aux chirurgies d'urgence, aux annulations et à la durée aléatoire des interventions. Ces événements imprévus mais très fréquents pourraient rendre complètement inutile la planification faite à l'avance pendant la phase aval de mise en œuvre. Les objectifs économiques et les objectifs de performance ciblés lors de la planification seront donc loin d'être atteints. Quelles que soient la finesse, la précision et la complexité des méthodes utilisées pour établir la planification, le résultat est décevant car le planning, élément central de la gestion, peut souvent devenir obsolète à des moments cruciaux du déroulement du processus des interventions. Ainsi, avec le contexte changeant des blocs opératoires modernes menant à une plus grande compétitivité et une forte diversité et une densité élevée de chirurgies

effectuées dans les salles d'opération, leur exploitation est devenue extrêmement compliquée. En conséquence, de nouveaux paradigmes et techniques de contrôle et de gestion, différents de ceux utilisés dans le passé, sont devenus essentiels au fonctionnement de ces systèmes.

Nos travaux de recherche visent à mettre au point une méthode de planification des interventions chirurgicales tenant compte de la nature extrêmement perturbée du processus de réalisation des chirurgies dans le bloc opératoire. L'innovation à souligner de l'approche à proposer est qu'elle doit permettre d'établir un calendrier initial optimisé à l'aide de données statiques, mais aussi doit permettre le maintien automatique en temps réel proche (Near real time) du planning en fonction des données dynamiques apparaissant au cours de la phase aval de mise en œuvre.

Un système multi-agents (MAS) est un système distribué dans lequel un groupe d'entités autonomes, appelés agents intelligents, qu'ils soient humains ou logiciels, poursuivent leurs propres objectifs de manière réactive, proactive et sociale. MAS a été proposé comme approche de modélisation appropriée pour des domaines tels que le fret, le commerce électronique, les systèmes multi-robots, les applications de sécurité, etc. Après l'extension du domaine d'applications des MAS, l'approche de planification MAP fait son apparition.

Récemment, la planification multi-agents (MAP) s'est distinguée. Une nouvelle méthodologie qui poursuit l'intégration des capacités de planification dans des agents intelligents afin qu'un groupe d'agents puisse développer un plan d'action atteignant un ensemble des objectifs communs. En conséquence, le MAP élargit grandement le champ des méthodes de la planification automatisée tout en étant intrinsèquement différent des méthodes classiques relevant en majorité de la recherche opérationnelle. MAP se distingue comme une méthode de planification logique et puissante pour les applications gérées par un système multi-agents (MAS) où plusieurs entités ou agents planifient et agissent ensemble en combinant leurs connaissances, leurs informations et leurs capacités.

MAP est utilisé soit pour produire une planification basée sur les agents, c'est-à-dire une planification distribuée (un planning individuel par Agent), ou soit pour produire une planification commune pour plusieurs agents, c'est-à-dire une planification pour une exécution multi-agents. Ici, nous soulignons que notre travail correspond au premier cas car notre but est

de produire un horaire pour **chaque salle d'opération et pour chaque jour**, c'est-à-dire une planification distribuée par (Room-Day-Agent).

L'approche MAP coopérative adoptée suppose que tous les agents soient pleinement collaboratifs et intéressés par la création conjointe d'un plan distribué conduisant aux objectifs communs. Alors, nous avons à sélectionner une stratégie de planification en fonction des différents niveaux de coordination possible, autrement dit, de préciser les niveaux d'autonomie ou de coopération nécessaires. En outre, Les techniques avancées permettant de résoudre le problème de la planification coopérative entre agents utilisent souvent des méthodes heuristiques. La portée de ce que l'on appelle les heuristiques locales est plutôt faible car chaque agent perçoit la qualité du plan global en fonction de son propre planning. Cela a motivé la centralisation de la décision dans l'action du seul Manager-Agent du bloc opératoire via l'utilisation d'une "heuristique à caractère globale" pour piloter le mécanisme de distribution des chirurgies lors de la phase planification.

L'objectif principal de cette thèse est de concevoir et développer un système intelligent multi-agents (MAS) permettant le contrôle et la gestion du processus d'un bloc opératoire de chirurgie. Cela inclut la conception de l'algorithme du système de gestion générale, la planification préopératoire du patient, la planification prédictive des chirurgies électorives, la planification dynamique durant la période considérée, l'optimisation du planning en cours en phase aval et l'affectation des urgences.

Dans cette thèse, Nous détaillons l'architecture du Système Multi Agents intelligents (MAS), destiné à une assistance pour la conduite du processus d'exploitation des salles de chirurgies modernes. MAS est une technique d'intelligence artificielle distribuée qui, à notre connaissance, n'avait encore jamais été utilisée auparavant dans le domaine de la gestion des blocs opératoires, mais elle a été utilisée avec "Grand Succès" pour résoudre divers problèmes dans d'autres domaines d'application tels que les systèmes d'énergie, les transports, etc. Cette technologie présente un potentiel considérable pour la résolution des problèmes de gestion des salles de chirurgies modernes. Afin d'évaluer l'efficacité du système multi-agents proposé, plusieurs simulations et études de cas concernant la planification des salles d'opération ont été réalisées.

Cette thèse porte principalement sur les aspects suivants.

- Une architecture hybride de gestion et de contrôle (globalement centralisé et localement décentralisé) très bien adaptée au processus fortement perturbé du bloc opératoire est proposée avec une approche système multi-agents intelligents.

- La plate-forme JADE basée sur les normes FIPA, préconisée pour le développement de ce système de gestion, est présentée. Tous les modules de planification des chirurgies inclus dans l'architecture de gestion hybride sont abordés. La mise en œuvre est discutée en détaillant la structure générale, en décrivant la tâche de chaque agent et l'algorithme des mécanismes de négociation.
- Des études et quelques simulations sur le contrôle et la gestion du processus du bloc opératoire ont été menées. Des interventions chirurgicales groupées dans une multitude d'instances, ont été réparties dans une douzaine de salles de chirurgie présentant des caractéristiques différentes et fonctionnant pendant une semaine. Plusieurs algorithmes ont été développés et mis en œuvre pour optimiser les fonctions de planification.
- Un modèle de contrôle local en temps réel proche (phase aval d'exécution) a été étudié pour effectuer des vérifications de faisabilité d'équilibrage de la charge en cours de progression dans la journée.
- Une méthodologie de prise de décision pour un placement optimal de chaque intervention est proposée. La prise de décision des agents, dans le système multi-agents, développés à l'aide de techniques mathématique et computationnelle intelligentes intègre simultanément : les préférences des chirurgiens, l'aptitude relative de chaque salle d'opération à effectuer une intervention chirurgicale particulière, la fonction d'évaluation de la priorité de chaque intervention, le degré d'urgence et des critères d'expertise consistant en règles du savoir-faire.
- Plusieurs métriques complémentaires sont proposées. Elles constituent la base du système d'évaluation des performances du système de gestion.

À la fin de nos recherches, nous présentons dans ce rapport de thèse nos résultats à travers de nos communications et nos articles publiés. Le document est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, nous décrivons le processus du bloc opératoire, les différentes ressources disponibles et les méthodes de gestion les plus importantes nécessaires au bon fonctionnement. Nous nous intéressons également aux perturbations fréquentes qui caractérisent le processus du service chirurgical et leur impact critique sur le flux de travail dans chaque salle d'opération. En particulier, nous distinguons deux types de gestion : une planification prédictive qui peut être pré-effectuée avec des données statiques (les chirurgies électives) et un ajustement dynamique du calendrier qui doit être faite lors du déroulement du

processus suite à l'apparition d'une intervention d'urgence, donc imprévue, ou suite à une perturbation induite par une annulation ou un retard significatif. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons un bref aperçu des activités de recherche les plus pertinentes pour notre travail. Cette revue contient les publications, les thèses de recherche scientifique et les projets de recherche sur lesquels repose notre étude.

Le deuxième chapitre présente un inventaire de la gestion hospitalière en termes des connaissances des méthodes de gestion des systèmes hospitaliers. Nous sommes particulièrement intéressés par les approches développées dans le passé pour mettre au point une *planification* automatisée des activités du bloc opératoire. C'est l'occasion de décrire en détail les principaux problèmes liés à chaque sous-fonction de gestion du bloc opératoire à savoir : Dimensionnement des ressources, Mise des patients au programme de chirurgie, Planification des chirurgies, Ordonnancement des interventions, Gestion des ressources humaines et évaluation de la performance. Dans la dernière partie de ce chapitre nous introduisons des connaissances associées à l'approche de Planification par multi-agents coopératifs, une rupture nette avec toutes les approches précédentes et qui forme le noyau de la méthodologie proposée dans notre étude. L'approche de planification par Multi-Agents Planner (MAP) sera détaillée dans le chapitre 3.

Le troisième chapitre propose un examen détaillé de la technologie du système multi-agents et ses informations de base qui forment le cadre global de la méthode proposée. Nous analysons cette technique de point de vue de Gestion et de planification des processus industriels. Il convient de noter que le MAP coopératif est un domaine particulier qui s'inscrit dans la vaste communauté des méthodes MAS fondées sur l'intelligence artificielle. *MAP est la méthode que nous proposons pour résoudre la problématique posée pour la gestion du bloc opératoire sujet de cette thèse.* Pour cette raison, une analyse complète et actualisée des connaissances est nécessaire pour bien comprendre les subtilités de cette catégorie de méthodes. Le chapitre porte sur le MAP coopératif, analysant les aspects qui distinguent une tâche MAP. Nous fournissons une classification détaillée des principaux mécanismes du MAP et présentons les plates-formes MAS les plus pertinentes à notre développement. La fin du chapitre fournit un aperçu des applications industrielles des MAS.

Le quatrième chapitre présente trois communications dans des congrès internationaux deux papiers publiés dans deux livres de l'éditeur Springer et deux articles publiés dans des journaux scientifiques internationaux. Ces publications proposent un système multi-agents pour le contrôle et la gestion d'un ensemble distribué de salles d'opération constituant le bloc opératoire

des chirurgies. Nous commençons par définir les fonctions de gestion nécessitant une "assistance à la conduite" et présentes dans le système hybride de contrôle. Les demandes de chirurgies constituent la porte d'entrée de la passerelle vers le processus. Une architecture de système multi-agents adaptée à l'ensemble du (contrôle hybride) est proposé pour gérer l'ensemble du processus. Nous expliquons ensuite l'exploitation de ce système multi-agents dans la conduite des activités du bloc opératoire allant de la gestion des demandes en amont jusqu'à les fonctions de planification dynamique en aval. Il présente des études de faisabilité de planification sur des instances de chirurgies électives ainsi que des études sur l'optimisation de la gestion par planification dynamique.

Chapitre 1

Chapitre 1 : Les Blocs opératoires hospitaliers.

Ce chapitre sera consacré à l'introduction du domaine de notre recherche le bloc opératoire dans les établissements hospitaliers. L'intérêt sera particulièrement focalisé sur le processus du bloc opératoire ainsi que sur la problématique soulevée par sa gestion.

Nous commencerons par examiner le contexte des blocs opératoires dans les hôpitaux. Ensuite, nous présentons la description des blocs opératoires et nous nous intéressons plus particulièrement au processus opératoire de chirurgie. Nous analyserons les stratégies et les principes de la gestion conventionnelle du processus. Cette présentation nous semble nécessaire pour situer le contexte de l'étude et pour poser et discuter de la problématique de nos travaux de recherche. Enfin, nous proposons quelques réflexions sur les solutions envisagées.

1 Blocs opératoires : Contexte et enjeux

1.1 Introduction

Les soins de santé, fondements des sociétés modernes, constituent l'un des moteurs de l'activité économique du pays. Préserver la santé est une priorité pour tous. En Europe, les pays disposent de plans sociaux et de moyens financiers pour faciliter l'accès aux soins et améliorer leur qualité (AGIM, 2009)[1]. Au cours de cette dernière décennie, dans un triple contexte, les hôpitaux, qui sont la base du système de santé, ont connu une évolution très importante :

- un contexte réglementaire qui impose aux organisations hospitalières une adaptation forte et très coûteuse ;
- un contexte de concurrence et de recherche de l'excellence requis pour l'ensemble de l'activité hospitalière ;
- Un contexte démographique marqué par l'évolution de la population de médecins, anesthésistes et chirurgiens.

Les établissements de santé fonctionnent dans un environnement de plus en plus concurrentiel. Ceux de petite taille s'unissent pour s'affirmer sur un marché de la santé où la concurrence est rude. De manière analogue à une entreprise industrielle du secteur des services (transport, hôtellerie...), les hôpitaux s'efforcent à apporter aux patients qu'ils accueillent le meilleur service possible. Des forts investissements en ressources humaines et matérielles sont mises en œuvre à cette fin mais restent disponibles en capacité limitée. En fait, les hôpitaux sont confrontés à une pénurie de chirurgiens, d'anesthésistes et d'infirmières. Des rapports récents font état d'une tendance négative du nombre de médecins en raison du vieillissement de la profession et de mesures limitant le nombre d'étudiants en médecine (numerus clausus). De plus, une crise des vocations, différenciée selon les spécialités (obstétrique, anesthésie, chirurgie notamment) est apparue. Les étudiants en médecine abandonnent la chirurgie et choisissent des spécialités médicales considérées comme plus gratifiantes et moins exigeantes (Vie Public, 2015)[2].

Par ailleurs, le statut du malade a changé : de malade consommateur soumis, il est devenu malade client averti ayant des exigences à imposer. En cas d'insatisfaction, le malade client change d'établissement de santé. Il est passé du statut de patient objet, à celui de patient sujet qui participe en quelque sorte à la décision et juge la réalisation des soins. Le secteur hospitalier s'est saisi du terme "performance", largement utilisé dans l'industrie, pour qualifier les services fournis par le système de santé, et du terme "optimisation" pour stimuler une amélioration dynamique de l'organisation et de la gestion hospitalière. La performance des blocs opératoires combine une dimension organisationnelle et stratégique. Il s'agit d'un secteur critique où toutes les directions fonctionnelles d'un hôpital se concentrent sur l'analyse de l'activité, les coûts, les processus de prise en charge, la qualité des soins, l'approvisionnement des dispositifs médicaux, la gestion des risques, la traçabilité, l'informatisation des blocs, les projets de travaux et de rénovation, etc. Le bloc opératoire est un lieu où se cristallisent bon nombre des problématiques de l'hôpital (Gilles F. 2008). Afin d'améliorer leur performance, les hôpitaux ont travaillé entre autre à l'optimisation de la logistique et du flux des patients (Hammami et al, 2004)[3]. La gestion du Bloc Opératoire concerne principalement l'organisation et le contrôle des flux des patients dans l'hôpital et tout particulièrement dans le bloc opératoire.

La performance hospitalière passe par l'optimisation du sacré QDC (qualité, délai et coûts) (Minvielle, 1996)[4]. En Europe, Pour les aspects techniques et les aspects compétences des chirurgiens les niveaux atteints sont très élevés néanmoins il reste aujourd'hui un fort potentiel d'amélioration QDC au niveau gestion du processus. Le bloc opératoire est un des lieux hautement stratégiques pour les hôpitaux, car il constitue le noyau dur lieu de concentration de toutes les hautes compétences et spécialités médicales de l'hôpital. Il est donc important que les hôpitaux évaluent la performance des stratégies organisationnelles de ce secteur pour améliorer les services rendus aux patients, augmenter la satisfaction des patients et des chirurgiens, tout en réduisant les coûts d'exploitation.

1.2 Description des blocs opératoires

Le bloc opératoire est un élément essentiel d'un hôpital en raison de sa haute technicité, de l'investissement qu'il représente, de l'importance des ressources humaines mobilisées, des exigences de sécurité des patients et de leur capacité à faire face aux urgences, ce qui détermine le niveau d'importance de l'attractivité de ces institutions. Le bloc opératoire est l'un des établissements les plus coûteux de l'hôpital (Denton et al., 2007)[5]. En effet, dans une étude de Macario et al. (1995)[6], la plupart des coûts (33% du coût total) concernent le seul bloc opératoire.

Le bloc opératoire est la zone de l'hôpital où les soins chirurgicaux sont fournis aux patients. La nature de ces soins nécessite une multitude d'équipements médicaux et de hautes compétences humaines. Aussi, le bloc opératoire est le noyau dense en nombre et en type de ressources d'un hôpital. Il interagit constamment avec différents secteurs, services et activités médicaux. Citons (Revel et al., 2003)[7] : « *Le bloc opératoire est à l'interface de nombreuses activités : chirurgie, obstétrique, anesthésie, explorations fonctionnelles, radiologie et biologie* ». La figure suivante trouvée dans (Fei, 2006)[8] est une illustration de cette interaction.

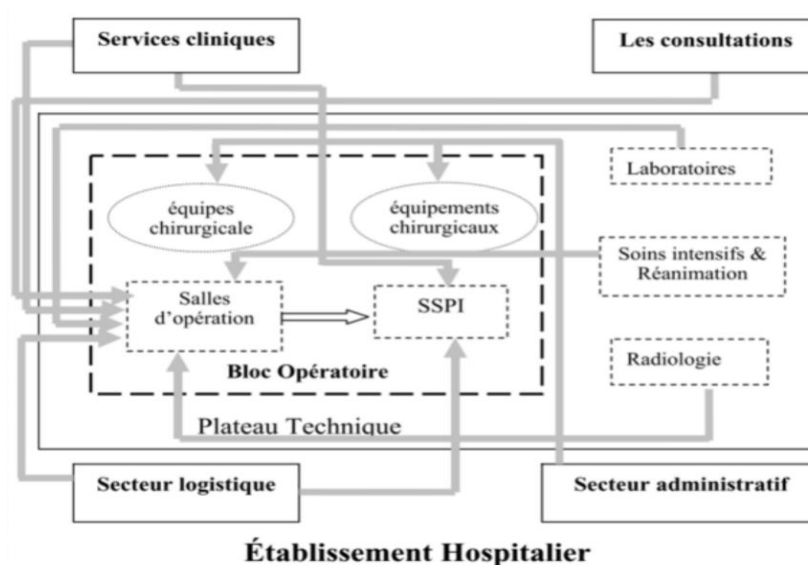


Figure 1: Interaction bloc opératoire et autres services (Fei, 2006)

Au bloc opératoire, on distingue trois catégories de chirurgies : électives, ambulatoires et urgentes.

- Chirurgies électives : concernent les opérations planifiées à la suite d'une consultation chirurgicale. Le patient est généralement hospitalisé dans une unité de soins.
- Chirurgies ambulatoires : concernent des opérations ne nécessitant pas d'hospitalisation.
- Chirurgies urgentes : ces opérations sont imprévues et arrivent au hasard au BO. Ils proviennent soit d'une unité d'hospitalisation, de réanimation ou du service des urgences.

Le "bloc opératoire" dans un hôpital est la réunion de tous les éléments d'une plate-forme technique et des ressources humaines et matériels pour réaliser des soins par interventions chirurgicales. (Baubeau et Thomson 2002)[9] Les auteurs définissent le plateau technique de chirurgie par : « l'ensemble des moyens humains et des équipements mobilisés autour de l'activité chirurgicale ou anesthésique et, par extension, l'établissement géographique au sein duquel cette activité a lieu. ».

En 2004, dans son rapport de thèse (S. Chaabane 2004) [10] classe les ressources en trois types : humaines, matérielles et informationnelles.

- A. Les ressources humaines : Le bloc opératoire est également un lieu de forte concentration de compétences humaines. En effet, une intervention chirurgicale nécessite l'intervention d'un grand nombre d'acteurs de différentes spécialités (les chirurgiens, les médecins anesthésistes et réanimateurs, les infirmiers anesthésistes, les infirmiers de bloc opératoire, les aides-soignants, les brancardiers, les infirmiers, les secrétaires et le responsable du bloc opératoire) qui interviennent au même endroit, séquentiellement ou en parallèle, pour réaliser un ensemble d'activités utilisant du matériel médical adapté, souvent très technique.
- B. Les ressources matérielles constituant le bloc opératoire peuvent être représentées comme un système composé de trois zones :
 - La salle d'induction et d'anesthésie (communes à plusieurs salles d'opération) est destinée à préparer le patient à l'anesthésie avant d'entrer dans la salle d'opération. Elle doit être équipée de matériel d'anesthésie.

- Les salles d'interventions chirurgicales spécialisées ou non (OR) sont les salles où les opérations chirurgicales sont effectuées., Elles doivent être équipées de matériel de chirurgie conventionnelle et de chirurgie de précision de haute technologie, ainsi que de matériel de contrôle essentiel au bon déroulement de toute intervention chirurgicale.
- La salle de surveillance post-interventionnelle (salle de réveil) contient des lits équipés pour réveiller les patients et des dispositifs médicaux pour surveiller l'état du patient.

C. Les ressources informationnelles : Un flux d'informations accompagne chaque patient lors de l'intervention. En effet, beaucoup d'informations sont échangées et diffusées entre les différents acteurs du bloc, soit oralement (indications du médecin ou de l'anesthésiste réanimateur aux infirmières), soit par écrit. Ces informations peuvent être purement médicales, se rapporter à la trajectoire du patient (heures d'entrée et de sortie) ou avoir un aspect organisationnel (préparation de la prochaine intervention).

Le coût d'acquisition de ces ressources physiques, de leur entretien et les investissements annexes parfois imposés par la loi représente la majeure partie du budget de l'hôpital. Par exemple, la ventilation sous pression interdisant la pénétration de poussière ou de microbes est nécessaire pour assurer un environnement sain. De plus en plus, aucun meuble n'est fixé au sol, ce qui accélère le nettoyage et l'entretien. Les équipements médicaux sont fixés au plafond au moyen de bras articulés ou de chariots embarqués. Les nouvelles technologies de chirurgie non invasives nécessitent un équipement vidéo important, dont le coût et la taille sont considérables. De nouvelles normes législatives font leur apparition, telles que la présence de différents circuits de mobilisation des patients pour séparer les flux pré et postopératoires ou pour accompagner les enfants et leurs parents.

Les hôpitaux évoluent continuellement pour faire face aux nouvelles réformes financières et structurelles. Ces réformes sont imposées par la législation ou pulsées par l'émergence de nouvelles technologies avancées telles que les techniques chirurgicales non invasives. Ou imposé par des évolutions contraignantes tels que l'augmentation du nombre de chirurgies quotidiennes requises. Les nouvelles technologies non invasives nécessitent un grand

équipement vidéo. Des normes législatives, telles que la présence de différents canaux de flux de patients pour séparer les flux pré et postopératoires ou pour soutenir les enfants par la présence de leurs parents, imposent aux hôpitaux de rénover leur Bloc opératoire. En effet, ces nouvelles technologies ou normes imposent des salles d'opération plus grandes et entraînent un élargissement de la plate-forme technique du bloc opératoire.

Il existe deux types de salle d'opération: mono et multidisciplinaire (Kharraja, 2003)[11].

- Une salle d'opération mono disciplinaire est dédiée aux activités chirurgicales d'un service donné (ophtalmologie, orthopédie, ORL, etc.). Ce type de bloc se caractérise généralement par un faible niveau de standardisation mais par une très grande technicité.
- Les grands blocs d'opération multidisciplinaires où les services n'auront plus leurs propres salles d'opération et leur propre personnel, mais devront travailler sur un site commun avec des règles de fonctionnement communes et une gestion centralisée.

Cette tendance à la mise en commun des ressources met encore plus l'accent sur la nécessité d'une organisation et d'une gestion efficaces du bloc opératoire afin de garantir une utilisation optimale des ressources humaines et matérielles disponibles.

Tableau 1: Différentes configurations architecturales des plateaux médicotechniques

ORs emergencies	The ORs are dedicated solely to handling urgent operations. Medical and nursing teams are assigned to it full time.	
ORs for elective surgeries (Besombes et al., 2004) [12]	Multidisciplinary plateau (single-site)	It is characterized by the grouping of all surgical specialties, thus sharing all the resources (operating rooms, recovery rooms and staff).
	Multidisciplinary plateau and specialized ORs (multisite)	Some specialties have their independence while others are grouped together and share the resources that are common.
	Specialized ORs (multisite)	Each specialty operates independently and has its own resources and management.
ORs dedicated to ambulatory surgery (Massip, 2001)[13]	Independent centers, detached from primary care facilities	They ensure their functioning in an autonomous way
	Satellite centers	They provide a multi-disciplinary generalist activity, cover all specialties and operate independently.

Dans le bloc opératoire (mono ou multidisciplinaire), on opère des patients dans le cadre d'une chirurgie préprogrammée ou d'urgence. Ainsi, deux catégories de patients se distinguent : les patients électifs et les patients urgents.

Patient électif : "Elective patient" désigne tout patient dont le problème de santé ne correspond pas aux critères d'urgence ; il peut donc être mis en attente sans danger. Les procédures chirurgicales pour les patients électifs peuvent être planifiées à l'avance. C'est une planification prédictive mais statique. La chirurgie élective peut être réalisée dans le cadre d'une hospitalisation complète ou ambulatoire.

Patient urgent : Dans le langage médical, il existe plusieurs degrés d'urgence allant de la simple priorité de l'urgence non vitale au degré d'urgence vitale. Généralement, Un patient urgent est défini comme tout patient nécessitant une intervention chirurgicale le jour de son arrivée. Cette catégorie de patients comprend également le « retour au bloc », ce sont les patients opérés mais présentant des complications nécessitant une reprise de la chirurgie en salle d'opération. Les patients urgents ne peuvent pas être planifiés à l'avance, le système de gestion doit traiter leur cas en temps réel.

1.3 Processus opératoire

Le processus de chirurgie d'un patient se compose de deux étapes. La première étape faisant usage de la salle de chirurgie est divisée en la préparation OR pour la chirurgie, l'acte chirurgical, et le nettoyage de l'OR. La deuxième étape faisant usage de la salle de réveil consiste en la récupération post-anesthésie du patient.

Une chirurgie ne peut être affectée à une salle d'opération que s'il y a les conditions requises pour effectuer l'opération. Des priorités parmi les chirurgies peuvent également exister. Par exemple, il peut être nécessaire de déplacer vers la fin de la journée les chirurgies qui peuvent contaminer la salle à un degré plus élevé.

Chaque chirurgie nécessite un chirurgien (ou une équipe) précédemment affecté. Le chirurgien n'est présent que pendant l'acte chirurgical et bénéficie d'un temps de repos entre les interventions. Pendant une chirurgie des ressources supplémentaires sont nécessaires. Souvent rares, Ces ressources peuvent être des infirmières, des anesthésiologistes et d'autres professionnels, ou des ressources physiques (instruments, matériel d'imagerie, etc.). Une ou plusieurs unités d'un type particulier de ressource (humaine ou physique) doivent être disponibles.

Une fois la chirurgie terminée, le patient doit être transporté vers un lit de salle de réveil post opératoire. Certains patients, après la chirurgie, ont besoin de soins spéciaux et doivent

être transportés à l'unité de soins intensifs (USI). Ainsi, la récupération post-anesthésie peut nécessiter un lit spécial.

Nous pouvons faire un parallélisme avec le secteur industriel en comparant la salle d'opération à une Unité Autonome de Production. À l'hôpital, la salle d'opération est une (UAP) chirurgie.

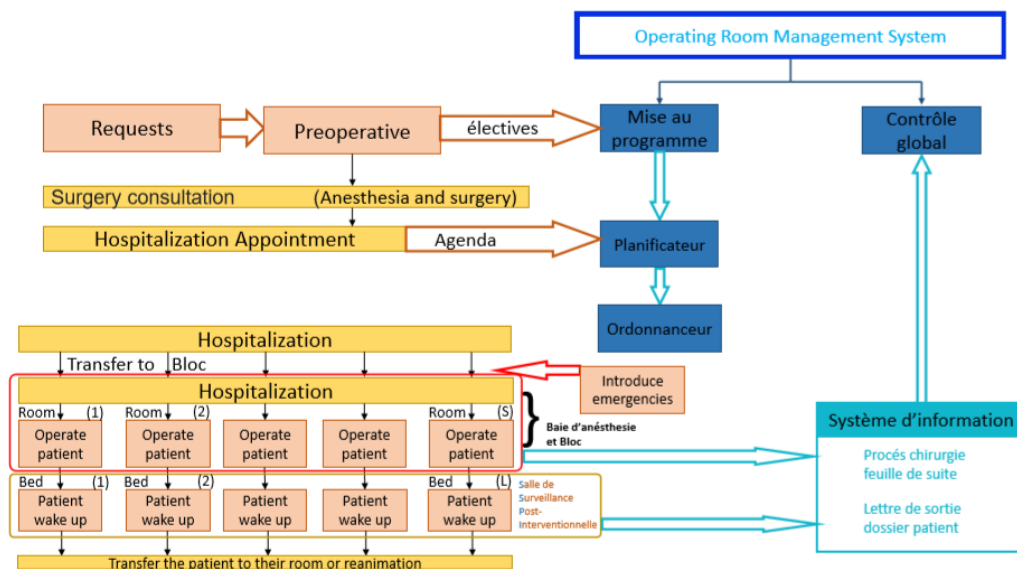


Figure 2: Processus Conventionnel (UAP) du Bloc opératoire

Le processus opératoire peut être divisé en trois phases ordonnées chronologiquement :

- La phase préopératoire s'étend de la prise en charge du patient par le service de chirurgie jusqu'au jour de l'opération. Au cours de cette phase, le patient est reçu en consultations chirurgicales et anesthésiques et reçoit une date d'intervention "provisoire".

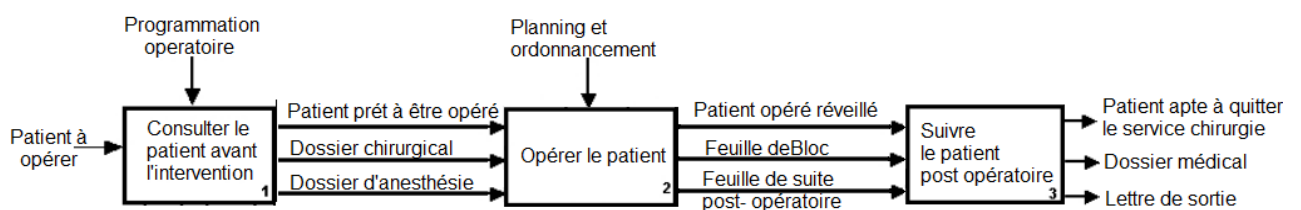


Figure 3: Les étapes fonctionnelles d'une intervention en chirurgie. (Chaaban, 2004)

- La phase peropératoire s'étend de la préparation psychique du patient, avant l'intervention, jusqu'à sa sortie de la salle de réveil. Cette phase a lieu le jour de l'intervention. Le patient est d'abord transporté par des brancardiers de sa chambre à l'hôpital et à la salle d'induction. Il sera ensuite anesthésié et finalement opéré par une équipe chirurgicale. Après son opération, il est transféré en salle de réveil et y reste jusqu'à ce que l'anesthésiologiste autorise son transfert dans sa chambre ou, en cas de complications, il peut être transféré à l'unité de soins intensifs et de réanimation. Cette phase est la partie la plus importante de la procédure chirurgicale. Notez que diverses activités de préparation à la stérilisation et consommables sont effectués juste avant et après la procédure.

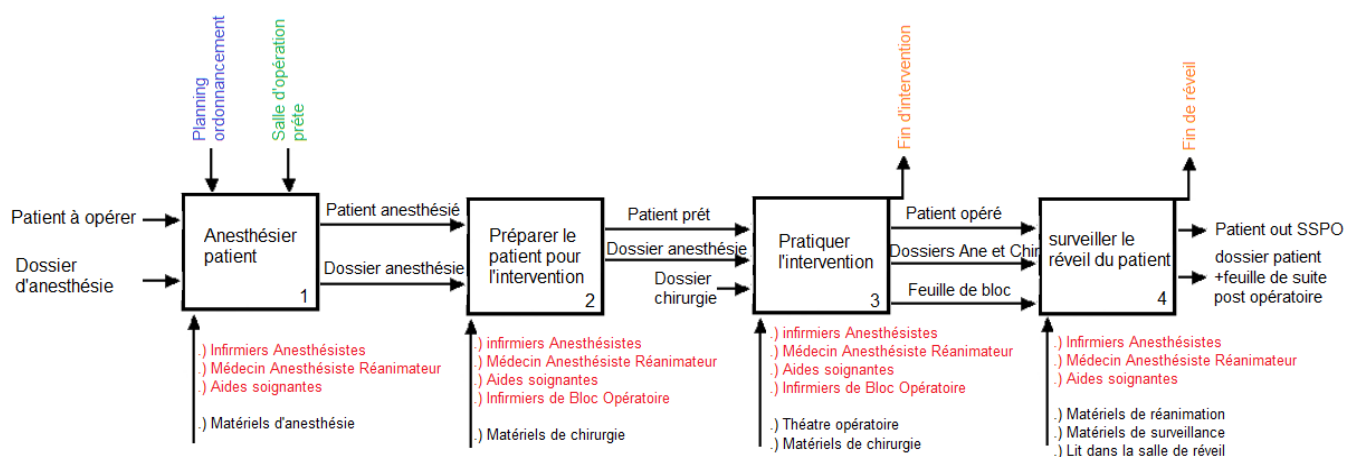


Figure 4:opérer le patient (Chaaban, 2004)

- La phase postopératoire : depuis la salle de réveil, le patient est transféré soit dans sa chambre, soit dans l'unité de soins intensifs et de réanimation si son état présente des complications. Cette phase couvre tous les soins nécessaires après la procédure de chirurgie.

Pour une description plus détaillée des différentes étapes du processus opérationnel ainsi que des différentes ressources (humaines et matérielles) impliquées dans la réalisation de chacune de ces étapes, nous renvoyons au travail de Chaaban (Chaaban, 2004)[10].

2 Management des blocs opératoires : problématique

Le bloc opératoire est l'un des secteurs les plus coûteux de l'hôpital et est au centre de son activité. Son management est une tâche complexe car il est nécessaire de planifier et d'organiser les interventions tout en optimisant les coûts, mais les besoins et les exigences des chirurgiens, des anesthésistes, des infirmières et des patients doivent également être satisfaits. Les ressources humaines et matérielles sont limitées et souvent soumises à des réglementations.

Nous avons présenté une description détaillée de la salle d'opération. C'est une entité en interaction permanente avec les autres services de l'hôpital. Elle opère des patients (électifs et urgents) dans le cadre de différentes catégories de chirurgie (élective, ambulatoire et urgente) en mettant en œuvre des ressources humaines, matérielles et informationnelles. L'optimisation des performances du processus opératoire repose sur un bon séquençage des procédures chirurgicales. La programmation opératoire (planification et ordonnancement) est l'outil d'harmonisation et de synchronisation des différentes étapes du processus opératoire. Pour atteindre cet objectif d'optimisation, les travaux de recherche doivent se concentrer sur la méthodologie de gestion. Dans la section suivante, nous détaillons les différentes stratégies et modules qui constituent ce système de gestion.

2.1 Programmation opératoire.

Le bloc opératoire est une partie essentielle du système technique de l'hôpital en raison de la haute technologie et des investissements lourds, de l'importance de la mobilisation des ressources humaines et du haut niveau de sécurité et de sûreté requis. Tenant compte des investissements réalisés et des ressources humaines et matérielles mobilisées, il est absolument fondamental pour les bilans de l'hôpital de maximiser les performances du bloc opératoire en harmonisant et en synchronisant les tâches de ses ressources. Par ailleurs, le bloc opératoire est également l'élément clé qui influence la capacité des institutions à faire face aux urgences et qui influence par la même occasion le degré d'importance de l'attrait de

ces institutions pour les patients. Cependant, la direction du bloc opératoire doit concilier activités programmées et activités d'urgence, prendre en compte les besoins et contraintes des chirurgiens, anesthésistes, infirmières, articulation avec les activités de stérilisation, brancardage et logistique (fourniture de matériels divers) des lits d'hôpitaux (Lucas et al., 2006) [14]. Jebali (2004)[15] explique dans sa thèse que la « programmation opératoire » est un instrument de gestion permettant de préciser l'ordre des interventions à réaliser sur une période variant d'une journée à une semaine (ou plus), leur attribuant les ressources nécessaires et en fixant l'ordre de leur exécution. Jebali écrit « *La programmation opératoire doit être la plus efficace possible. Dans l'ensemble, elle devra garantir une utilisation efficiente et à moindre coût des ressources. Elle devra respecter la charge horaire journalière des ressources humaines et matérielles mises à disposition en garantir la santé de l'ensemble des patients et leur satisfaction* ».

Dans (Magerlein et Martin, 1978)[16], la programmation opératoire se compose de deux sous-problèmes consécutifs:

- Advance scheduling : c'est une planification qui consiste à affecter à l'avance une date d'intervention aux patients.
- Allocation scheduling : c'est l'ordonnancement qui permet de déterminer l'ordre des interventions dans une salle donnée pour une journée donnée.

Pour la construction du programme opératoire trois modèles classiques se dégagent de la littérature: (block scheduling), (open scheduling), (modified block scheduling) (Patterson, 1996)[17], (Kharraja, 2003)[11]. Jebali se distingue en ajoutant un quatrième en (2004)[15]: **les décisions en temps réel**, qui permettent au responsable du bloc opératoire de réagir aux différents aléas qu'il rencontre fréquemment.

2.1.1 Les contraintes de la programmation opératoire :

Le problème de planification du bloc opératoire est fortement contraint, avec des contraintes liées aux aspects suivants :

- Capacité des ressources, étant donné que les installations chirurgicales et le personnel chirurgical ne sont pas pleinement disponibles pendant l'horizon de planification,

- Les dates limites, car chaque patient doit être intervenu entre une date au plus tôt et une date au plus tard. Ces dates représentent la première et la dernière date entre lesquelles un patient peut être opéré dans l'horizon de planification,
- Limites du nombre des salles opératoires auxquels les chirurgiens peuvent être affectés pour effectuer des chirurgies un jour donné, afin de réduire le temps d'inactivité du chirurgien mais aussi d'un autre côté éviter le chevauchement des chirurgies consécutives à effectuer par le même chirurgien,
- Éligibilité de la salle opératoire, comme par exemple réserver des (salle-jour) pour la planification d'un certain type de chirurgie ou pour imposer que certaines chirurgies aient lieu uniquement dans certaines salles,
- Priorité du patient, les patients sont planifiés conformément à un indicateur de priorité. (La date d'arrivée, le degré d'urgence du patient, ... Ogulata et Erol, 2003)[18],
- Incertitude, afin de prendre en compte les écarts importants entre la durée prévue et la durée réelle d'utilisation des ressources ou la disponibilité des ressources réservées aux arrivées aléatoires de patients.

Certaines contraintes sont liées à la capacité des ressources :

- heures de salle d'opération ;
- la disponibilité des chirurgiens, des anesthésistes et des infirmières ;
- la disponibilité du matériel chirurgical ;
- nombre et disponibilité des lits de réanimation et des lits de récupération.

D'autres contraintes concernent les compétences des ressources comme la polyvalence des salles d'opération ou la qualification du personnel. En effet, de la même manière que les salles d'opération sont dédiées à certains types de chirurgie, le personnel médical est également parfois spécialisé.

En outre, il existe des questions variées sur l'organisation et la gestion des salles d'opération, telles que : Est-il préférable de construire des salles d'utilisation générale ou plutôt dédiées à une spécialité ? L'équipement pour chaque intervention chirurgicale doit-il être présent dans la chambre ou doit-il être livré avant chaque intervention chirurgicale ? Sur le plan de la planification, faut-il un taux d'occupation élevé ou une répartition des opérations plus rationalisée pour faciliter la gestion des incertitudes et des aléas ? Devrions-nous avoir

une salle dédiée aux urgences ou devrions-nous avoir un horaire aéré pour les absorber dès leur arrivée ?

Tableau 2 (Rodier et Gourgand , 2010)[19], les auteurs classent ces questions et ces problèmes par niveau de décision et selon le modèle d'approche considéré. Le dimensionnement d'un bloc opératoire et la construction d'un schéma directeur d'attribution des créneaux horaires se situent au niveau stratégique. La planification de l'intervention sur une semaine est davantage axée sur les problèmes tactiques, tandis que la planification quotidienne est davantage axée sur les problèmes opérationnels.

Tableau 2:niveau décisionnel versus modèle d'approche (S. Rodier 2010)

	Macroscopique	Mesoscopique	Microscopique
Stratégique	Conception d'ensemble Dimensionnement de la structure de l'unité chirurgicale	Conception des processus Définition de l'activité opérationnelle dans l'unité chirurgicale	Conception d'activité Conception détaillée de l'activité opérationnelle
Tactique	Configuration des flux Planification des ressources requises pour l'entièreté de l'activité	Configuration des procédés Planification des ressources requises de l'activité	Configuration de l'activité Planification des ressources requise pour chaque opération
Opérationnel	Gestion du système Allocation des ressources humaines et matérielles à toute l'activité	Gestion des procédés Allocation des ressources humaines et matérielles à chaque activité	Gestion de l'activité Programmation des opération et allocation des ressources Regroupement et réassignation
	Prise en compte d'événements aléatoires		

Notre étude traite de la gestion des activités en termes de programmation, de planification et d'ordonnancement des chirurgies et de leur affectation à différentes salles de chirurgies (niveau opérationnel avec une approche microscopique).

2.1.2 Planification et ordonnancement du bloc opératoire

Afin de gérer et de coordonner les différentes activités du bloc d'opérations, les hôpitaux utilisent un outil de gestion communément appelé programmation opérationnelle. Son objectif est d'établir pour chaque salle un calendrier prévisionnel des interventions à effectuer sur un horizon donné, d'une durée allant d'un jour à une ou plusieurs semaines, en leur allouant des moyens (humains et matériels) et en fixant la séquence de leur exécution. Les demandes d'interventions à programmer peuvent provenir d'un ou de plusieurs services chirurgicaux, selon le type de bloc mono ou multidisciplinaire. Le programme opératoire est également une source d'informations pour d'autres activités hospitalières telles que l'hospitalisation, la stérilisation, le brancardage, etc. (Kharraja 2003[11], Jebali 2006[20], Chaabane 2007 [21]).

Le programme d'un processus opératoire est l'aboutissement de la **planification** et du **séquençement** des chirurgies. Ces deux fonctions principales peuvent être effectuées de manière séquentielle ou simultanée, selon la politique adoptée par l'hôpital et selon le système de gestion conforme à cette politique. La planification préalable est le processus de détermination de la date d'une intervention chirurgicale pour un patient, tandis que la planification des affectations détermine la salle d'opération et l'heure de début de la procédure le jour de l'opération. (Blake et Carter 1997)[21] développent cette taxonomie dans leur revue de littérature et ajoutent le domaine de la planification des ressources externes qu'ils définissent comme le processus d'identification et de réservation de toutes les ressources externes au bloc opératoire.

La construction du programme opératoire est très complexe et son processus varie considérablement d'un hôpital à l'autre. Cette programmation peut être étroitement liée à la politique donc au modèle choisi par l'hôpital.

Avant d'expliquer les méthodes classiques de programmation opératoire, mentionnons Rossi-Turck (2002)[22] qui, pour optimiser l'exploitation du bloc opératoire, s'est distingué en utilisant les outils de gestion industrielle MRP 2 pour la programmation des opérations et le calcul des besoins en ressources. Son étude vise l'amélioration de la logistique au bloc opératoire. Elle combine une approche de type MRP2 avec un approvisionnement sous forme de kits standardisés pour les fournitures de type disponible.

- Le plan d'activité est établi à travers un dialogue constructif entre tous les acteurs influents impliqués dans le bloc : chirurgiens, anesthésistes, techniciens, etc. Il a pour but de permettre un cadrage de l'activité pour faciliter l'allocation des ressources du bloc. Ce plan permet de prédire le déséquilibre entre la capacité et la charge prévue dans le programme provisoire. L'horizon de planification est au moins le mois et la périodicité peut être le jour.

- Le plan directeur de production définit le calendrier des interventions. L'horizon est la semaine et la période le jour. Il est sujet à un calcul glissant de jour en jour et est divisé en trois zones :

- 1) Une zone ferme où plus aucun changement n'est accepté (jour J - 24 heures)
- 2) Une zone flexible de [J - 1 à J - 7]. Les changements sont acceptés dans le cadre d'un consensus entre les principaux acteurs.
- 3) La zone libre (avant J-7), on accepte les modifications.

- Le calcul des besoins nets permet de déterminer les besoins en ressources à partir de la planification prévisionnelle. Il déclenche les fournitures et les commandes pour les périodes futures.

La programmation opératoire comprend classiquement deux sous-fonctions :

- (Advance planning): La planification préalable consiste à fixer une date à l'avenir d'intervention pour chaque patient. Le modèle d'élaboration du programme opératoire varie considérablement en fonction de la politique de gestion choisi par l'hôpital. Il existe trois modèles: La programmation par allocation préalable de plages horaires (« Time-block scheduling »), la programmation ouverte (« Open scheduling »),

et la programmation par allocation de plages ajustables (« Modified block scheduling ») (Patterson, 1997)[23], (Kharraja, 2003)[11].:

- La stratégie (Time-block scheduling): La programmation par attribution préalable de plages horaires consiste en une attribution préalable de créneaux horaires pour les chirurgiens, les unités chirurgicales (groupes de chirurgiens) ou les spécialités médicales. L'ensemble des créneaux réservés forment le squelette du programme opératoire de la semaine. Une plage horaire fait référence à un intervalle de temps inclus dans la période de planification où une salle d'opération spécifique est réservée à l'utilisation d'une unité de chirurgie donnée. Chaque unité chirurgicale est responsable de la répartition de ses interventions sur ses plages horaires ; cette répartition ne fait pas partie de la tâche de planification. Le calendrier constitué des créneaux horaires forme le plan directeur d'allocation (PDA) dit également « *Master Surgical Schedule (MSS)* », (Przasnyski, 1986)[24], (Kennedy, 1992)[25], (Blake et Carter, 1997a)[26] et (Blake et Carter, 1997b)[21]. Une fois que le MSS est déterminé, il est gelé pour le futur jusqu'à ce qu'une mise à jour vienne le modifier. Selon (Margerlein et Martin, 1978), dans cette stratégie existe deux classes d'approche. Dans une classe, seules les heures de la salle d'opération sont prises en compte ; dans l'autre classe, les ressources humaines et matériels (lits..) sont également pris en compte. La difficulté de ce type de programmation réside dans la construction du (PDA) qui respecterait les disponibilités et les préférences des différents chirurgiens

Dans (Kharraja, 2003) l'auteur évoque les inconvénients de cette approche : La position et la taille des créneaux horaires sont les facteurs qui influent sur la qualité et la performance du programme opératoire. Les plages surdimensionnées offrent un confort pour les chirurgiens mais entraînent des performances médiocres en raison de la faible occupation des salles. Des plages sous-dimensionnées ou limites peuvent, en cas de circonstances imprévues, créer des tensions entre les chirurgiens en raison de dépassements de délai et du non-respect des créneaux horaires et, par la suite, d'un échec de la planification. De plus, le manque de flexibilité entraîne également une dégradation des performances du bloc. En effet, lorsque les créneaux horaires sont gelés, il peut arriver que certains chirurgiens refusent des interventions qui durent pendant que d'autres ne remplissent pas leurs créneaux horaires.

- (La stratégie Open Scheduling): c'est une programmation ouverte qui consiste à partir de zéro (planifier sans aucune contrainte d'emplacements initiale) puis à 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* : Un remplissage chronologique selon la règle du "premier arrivé, premier servi" consiste à établir un "agenda collectif" pendant toute la période de construction du planning. Cet agenda est construit en utilisant un système d'information commun qui permet d'estimer la durée des interventions et d'insérer de nouvelles interventions. Les secrétariats des différents services chirurgicaux adressent leurs demandes au fur et à mesure de leur arrivée. Dans le cas où une intervention causant une incompatibilité est placée, le responsable de bloc négocie la résolution du problème avec les services impliqués, mais il est le seul juge à décider de la solution. La méthode simple à mettre en œuvre présente toutefois des inconvénients. En effet, elle favorise les services chirurgicaux ayant une activité facilement planifiable (ophtalmologie, chirurgie plastique) et défavorise les autres (maternité, pédiatrie). En outre, cette pratique génère un taux élevé de déprogrammation, de sous-utilisation des ressources, de dépassement horaire et peut créer des tensions entre les services de chirurgie qui sont en permanence en concurrence pour la réservation d'emplacements. (Kontak-Forsyth et Grant)[27]
 - *Planification coopérative* : Le programme opératoire est décidé après un processus de négociation hebdomadaire du conseil de bloc dont les acteurs représentent tous les services regroupés autour du responsable de bloc. Le calendrier opératoire de la semaine à venir est généralement obtenu en harmonisant les préprogrammes, même partiels. La difficulté consiste à rechercher chaque semaine un programme d'exploitation de compromis optimisant le fonctionnement du bloc tout en satisfaisant les contraintes et les souhaits des différents services.

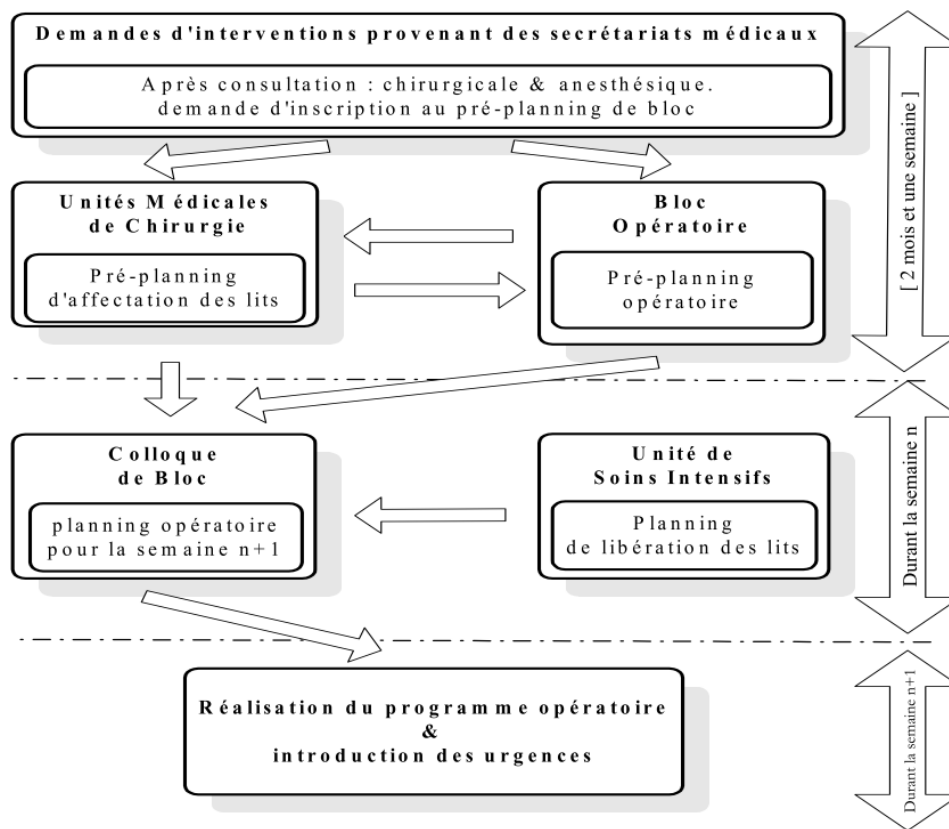


Figure 5: planification coopérative pour l'élaboration du programme opératoire (Kharraja, 2003)

(La stratégie Modified Block Scheduling) Il s'agit d'une programmation par pré-allocation et ajustement des plages horaires. À partir d'un SSM existant, le planning à venir repose sur un SSM modifié, si nécessaire. Deux pratiques sont généralement utilisées :

- *Unassigned block* : Le squelette de planification initialement établi (MSS) comprend un sous-ensemble de créneaux « banalisés » non attribués à un service chirurgical particulier. Ces plages horaires restent communes à tous les chirurgiens (Unassigned block). Les créneaux horaires non alloués peuvent être utilisés par tous les services pour résoudre leurs problèmes occasionnels de surcharge. Leur gestion repose sur une programmation ouverte, soit selon le principe du premier arrivé, premier servi, soit via un processus de négociation au sein du conseil de bloc.
- Toutes les plages horaires du (SSM) sont allouées, mais si, à une date prédéfinie (release block time), des créneaux horaires ne sont pas encore exploités «

plages délaissées », ces plages seront alors banalisées par le gestionnaire de blocs. Ces créneaux horaires retombent dans le pot commun et peuvent être utilisés comme décrit précédemment. (Malhotra, 2001)[28]

Cette approche de programmation attrayante qui combine les deux approches précédentes optimise l'exploitation du bloc opératoire. Cependant, son inconvénient réside dans la nécessité d'un grand effort de synchronisation et de coordination pour sa mise en œuvre.

- (Allocation Scheduling): L'ordonnancement consiste à déterminer l'ordre des interventions en salle d'opération pour une journée (Fei, 2006)[8]. Dans le cas où les fonctions planification et ordonnancement sont faites séparément d'une manière séquentielle, selon la stratégie de planification opératoire adoptée et du choix des hypothèses de simplification, Le problème de l'ordonnancement des salles d'opération, des ressources et des unités de soins post-anesthésie peut présenter certaines particularités et être modélisé et résolu de manières différentes. En fait, il peut être considéré comme un job shop avec des machines dupliquées (Saadani et al., 2006)[29], un flow shop hybride à trois étages (Kharraja et al., 2006) [30] ou un flow shop hybride à deux étages (Fei, 2006)[8]. Il s'agit d'un problème combinatoire NP-Hard (Gupta, 1988)[31]. Pour en savoir plus sur le HFS, voir Ruiz et Vazquez-Rodriguez (2010)[32] et Ribas, Leisten et Framinan (2010)[33].

Un magasin simple flux est un environnement dans lequel les produits, les tâches ou les emplois, nécessitent un traitement impliquant plus d'une étape. Chaque étape se compose d'une machine, et ajoute au résultat final.

Un magasin d'écoulement hybride a plus d'une machine (parallèle) dans au moins une des étapes, et toutes les machines dans une étape peuvent effectuer la même tâche, ou ont des capacités différentes. Chaque machine ne peut traiter qu'une seule tâche à la fois, et chaque tâche est traitée par une seule machine à chaque étape. Chaque travail (chirurgie) est assigné à une machine (OR), appartenant à l'ensemble des machines parallèles de l'étape 1 (OR), et exactement à une machine appartenant à l'ensemble des machines parallèles à l'étape 2 (lits réveil). Dans les deux étapes, il y a un sous-ensemble de machines qui peuvent effectuer le travail. Chaque travail

nécessite des ressources supplémentaires pour être traitées. Il y a des temps d'installation qui dépendent de la séquence, et une restriction de « pas d'attente » pour passer de l'étape 1 à l'étape 2. Enfin, il y a des emplois urgents (urgences) qui peuvent arriver, qui doivent être pris en charge dans un délai standard. (Chaabane, 2004)[10]

2.2 Gestion d'un processus fortement perturbé

Le programme opératoire doit garantir une utilisation efficace des ressources mais à un coût optimisé (respect de la charge horaire quotidienne des équipes sans exagérer l'utilisation des ressources matérielles). Il doit veiller à la santé de tous les patients sans en dégrader la satisfaction (absorber les urgences, répondre aux priorités médicales tout en respectant les dates chirurgicales annoncées). Néanmoins, assurer cette mission est une affaire complexe. Le bloc opératoire travaille dans un environnement fortement perturbé. En effet, il est soumis à diverses formes de perturbations qui concernent entre autres le processus de demande, les annulations, la durée des interventions chirurgicales et la disponibilité des ressources.

2.2.1 Le type des demandes

Les demandes d'interventions chirurgicales arrivent continuellement. La majorité de cas sont des interventions demandées par les services spécialisés de l'hôpital. Certains cas peuvent être prioritaires mais non urgents ; ils peuvent être retardés sans danger pour le patient. Ces cas de soins seront planifiés pour des dates proches. Ce type de demande est désigné par la chirurgie électorale. Néanmoins, certaines demandes de soins chirurgicaux sont inattendues et imprévues. Il arrive fréquemment de ces demandes d'urgence qui sont en général des cas traités dans le département des urgences de l'hôpital. Ces cas nécessitent une prise en charge immédiate. Ce type de demande, désigné par la chirurgie d'urgence, est évidemment imprévisible et par conséquent non planifiable à l'avance. Dans une telle situation, on a l'obligation d'insérer, dès que possible, les patients urgents dans le planning déjà établi, ce qui

occasionne des perturbations dans le déroulement du processus planifié et évidemment des coûts d'exploitation supplémentaires.

La performance du processus du bloc opératoire dépend fortement de la capacité à anticiper les besoins en chirurgie d'urgence, voire mieux, à gérer cette urgence en temps quasi réel, de manière optimale dès son arrivée. Selon (Lafon et Landry, 2001)[34], 69% des perturbations entraînant des modifications du calendrier opératoire sont dues à des interventions chirurgicales d'urgence. Ces urgences ont une très forte influence sur les performances du bloc d'opération, d'où la nécessité de les prendre en compte lors de la conception du système de management.

Un autre type de perturbation affectant le processus du bloc opératoire est le report ou l'annulation d'une intervention déjà programmée. En effet, dans certaines situations, un changement d'état du patient peut nécessiter des tests supplémentaires ou des tests conduisant à un report de la procédure. De plus, un refus de se faire opérer, ou pire, le décès du patient entraîne l'annulation de la procédure d'intervention. Ces annulations ont évidemment un impact important sur les performances, car toutes les ressources sont mobilisées mais aucune intervention n'est effectuée. Il est donc impératif d'envisager la gestion des annulations au même niveau d'importance que la gestion des urgences.

2.2.2 Durée d'intervention

Le processus du bloc opératoire ponctue différentes équipes (chirurgiens, infirmiers, anesthésistes, porteurs de brancards, entretien ...). Le respect de la planification de leurs activités et de leurs ressources est essentiel à la bonne fin des travaux conjoints. Par conséquent, le séquençage temporel des interventions chirurgicales selon ce qui a été prévu est essentiel pour la réalisation du programme opératoire.

La durée de la procédure correspond à la durée d'occupation d'une salle d'opération pour une chirurgie. Cette durée est composée de : une durée de préparation à l'intervention, une durée de l'acte chirurgical lui-même, une durée de nettoyage et de reconditionnement de la salle. Cette durée de séjour, désignée par la durée opératoire, est fonction de plusieurs paramètres en fonction du patient, du chirurgien et de la nature de la chirurgie. C'est une variable

hautement aléatoire qui ne peut être qu'estimée à l'avance mais jamais déterminée avec précision.

Les différences cumulées des temps de fonctionnement entre les valeurs estimées et les valeurs réelles provoquent souvent des perturbations majeures dans la réalisation des activités du bloc. Cela entraîne une dégradation des performances (heures supplémentaires, surcôt ...) et une diminution de la satisfaction à la fois des patients et des chirurgiens. Ces derniers sont obligés de retarder ou de différer les interventions prévues ce jour-là. Les retards sont une source de stress pour les équipes et pour les patients qui attendent leurs tours. Ils impliquent également des heures supplémentaires avec un coût supplémentaire important car les heures supplémentaires sont augmentées par rapport aux heures normales (Perdomo et al., 2008)[35]. Les infirmières les récupèrent, ce qui signifie qu'ils ne sont pas régulièrement présents, ce qui complique la réalisation du programme hebdomadaire prévu. *Les approches qui intègrent l'aspect stochastique des temps d'opération dans la planification des activités réduisent la dégradation des performances mais ne constituent pas la solution optimale.* La gestion dynamique et la maintenance du planning en temps quasi réel nous semblent la bonne approche pour minimiser les conséquences négatives.

2.2.3 Disponibilité des ressources.

Des aléas liés au fonctionnement de la salle d'opération peuvent être dus à un dysfonctionnement ou à des pratiques organisationnelles défectueuses ; cela peut entraîner une indisponibilité de ressources humaines ou matérielles. Un exemple est la survenue d'une panne d'équipement médical ou un sous-dimensionnement de la salle de réveil qui bloquera le flux de patients entraînant le blocage du processus opératoire ce jour. On peut aussi mentionner l'indisponibilité des chirurgiens ou leur retard dans l'intégration de la salle d'opération. Le manager de Bloc Opératoire harmonise ses ressources et les rend polyvalentes pour optimiser le processus. Dans la littérature, le critère d'optimisation est choisi différemment selon les auteurs : il s'agit souvent de coûts (ouverture des salles, coûts d'exploitation, personnel, équipement, coûts des heures supplémentaires, etc.) (Macario 2007[36], Lamiri et al., 2009[37], Hans et al. , 2008[38], Denton et al., 2007[5]), mais il s'agit parfois d'une fonction objective combinant plusieurs indicateurs de performance (temps

d'attente, intermédiaire, retard, heures supplémentaires, etc.).) (Denton et al., 2007[5]). Les indicateurs de temps sont aussi parfois traduits en termes de coûts. Les objectifs omniprésents sont à la fois d'améliorer les services de soins (y compris la sécurité des patients) et la satisfaction des patients (Testi et al., 2009[39], Van Oostrum et al., 2008[40])

Diverses autres perturbations compliquent la gestion du bloc opératoire (Hammami et al., 2006)[41]. Nous notons en particulier les demandes tardives de chirurgiens ou de services (Denton et al., 2007)[5], de complications liées à l'état du patient, de situations d'urgence (Hans et al., 2008 [38]; Lamiri et al., 2008, 2009[42] [37] ; Denton et al., 2007[5]), défaillance ou indisponibilité de l'équipement. Ces risques affectent la planification du jour et le devenir de certaines interventions (Augusto et al., 2010[43]).

Compte tenu des aléas fréquents et variés, du grand nombre d'acteurs et de leur diversité, ainsi que la limitation des ressources humaines et matérielles, le bloc opératoire s'avère l'un des plus difficiles à gérer. La construction du programme opératoire est d'une réelle complexité et la manière de le faire varie beaucoup d'un hôpital à l'autre.

2.3 Problématique

Nous allons introduire cette section par le témoignage d'un directeur d'un hôpital parisien dans (Gilles F. 2008)[44] . La désorganisation du bloc opératoire nuit à la qualité des soins et aux conditions de travail. Elle entraîne des tensions, elle affecte directement la qualité de la prise en charge : reports de bloc, délais d'attente au bloc, etc. Par exemple, la famille d'une patiente âgée de 76 ans a déposé une réclamation car la chirurgie pour fracture d'un col fémoral a été reportée six jours de suite. La désorganisation du bloc conduit à des dysfonctionnements lourds de conséquences, les chirurgiens programment leurs interventions sans tenir compte de la disponibilité du matériel pour s'en rendre compte au moment crucial de l'intervention. Les pressions sont déjà fortes au bloc opératoire. L'activité en relation avec des patients et la gestion de situations critiques (urgences, interventions vitales, etc.) sont sources de stress. Les procédures sont strictes. L'atmosphère est confinée. La désorganisation

du bloc présente un risque d'épuisement des professionnels. Les aléas font partie intégrante de la gestion du bloc opératoire. Les aléas peuvent provenir des patients, des personnels, du matériel. Les modifications de programme sont inéluctables : urgences, contre-indications chez un patient, intervention plus longue que prévue, réveil du patient moins rapide, etc. De même les arrêts inopinés peuvent empêcher l'ouverture d'une salle. L'absence d'opérateurs ne permet pas d'assurer les urgences. Les boîtes d'intervention peuvent avoir été toutes utilisées et il faut attendre le retour de la stérilisation pour pouvoir faire une intervention, etc. (Gilles F. 2008)[44]

Comme décrit dans les sections précédentes, il y a deux catégories très différents de patients. Les patients électifs qui nécessitent une gestion qui permet d'optimiser toutes les performances principales du processus et notamment la minimisation du cout et la maximisation de la satisfaction des chirurgiens et des patients. Cette gestion consiste en quelque sorte en un contrôle global pour atteindre les objectifs généraux. Trois modules de planification constituent la base de cette gestion : la programmation des patients, la planification prédictive et l'ordonnancement prédictif. Ces modules sont des planifications statiques réalisées avec des données déterministes ou stochastiques mais figées à un instant donné en amont de la période de réalisation. Il est évident que l'atteinte des objectifs est tributaire de la stabilité des données. Une question se pose : Existe-t-il un modèle ou une méthodologie pour concevoir des modules de planification suffisamment robustes ?

Le processus du bloc opératoire est fortement perturbé. Par conséquence, Le planning prédictif quel que soit sa qualité deviendra rapidement caduc. Les efforts d'optimisation dans la conception des plannings prédictifs seront vains. Donc il est impératif d'avoir une maintenance dynamique continue du planning pour pallier les conséquences des perturbations fréquentes. Pour que le système de gestion soit complet il est nécessaire de le doter d'un contrôle local qui surveille et agit sur le planning en cours d'exécution via des modules d'ajustement et de modification du planning en temps quasi réel qui remplissent le rôle d'un outil de maintenance dynamique du planning.

En outre, il y a le problème des urgences et des annulations qui sont évènements aléatoires considérées plus que des perturbations majeures mais auxquelles le système de gestion doit réagir rapidement et automatiquement pour optimiser leur prise en compte.

2.4 Objectifs

Gilles Florence (2008)[44] écrit dans son rapport : La prise de conscience de la nécessité de modifier les pratiques avec l'informatisation du bloc opératoire constituent le levier d'amélioration du fonctionnement du bloc. Le déploiement du logiciel de bloc qui permettra l'informatisation du programme opératoire contraindra les professionnels à modifier leurs pratiques. (Gilles F. 2008) [44]

Dans ce travail de recherche, nous nous concentrerons sur l'informatisation de la gestion du bloc opératoire, nous examinerons les possibilités et les avantages d'une architecture de gestion hybride qui assure l'optimisation globale du processus dans sa phase préopératoire et ceci dans le cadre des deux stratégies block scheduling et open scheduling. Nous explorons aussi les possibilités de la deuxième partie de cette gestion hybride, le contrôle local dynamique, pour doter le processus de la réactivité nécessaire pour faire face aux perturbations. Nous étudierons les bases des modules de la gestion prédictive, à savoir la programmation, la planification et l'ordonnancement à l'avance. Nous analyserons ensuite les modules d'ajustement dynamique du planning et de gestion en temps réel des urgences et des annulations. Les perturbations (incertitudes et aléas liées au processus de demande et au processus chirurgical) évoqués dans ce chapitre devront tous être pris en compte par la méthode proposée.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte du sujet de notre recherche. Nous avons décrit le bloc opératoire de chirurgie en milieu hospitalier, les différentes ressources qu'il mobilise et détaillé son processus opératoire et la complexité de son fonctionnement. Nous avons présenté les problèmes liés à sa planification et aux différentes perturbations qui affectent son fonctionnement. En particulier, nous avons montré que, pour ce processus fortement perturbé, la planification prédictive peut certes fournir un calendrier initial optimisé. Néanmoins, **une planification dynamique qui maintiendra ce calendrier en peropératoire est absolument nécessaire pour sauvegarder l'optimiser des performances mais également et surtout pour assurer la réactivité du système de gestion.**

Chapitre 2

Chapitre 2 : Etat de l'art en gestion hospitalière.

Ce chapitre passe en revue les travaux de recherche sur la gestion des blocs opératoires. Nous évaluons ces travaux sur plusieurs domaines liés soit à la définition du problème (par exemple, ressources prises en compte), soit aux modèles techniques (par exemple, la technique de résolution ou type des variables). Comme les articles sont regroupés et évalués de différentes manières, nous obtenons une comparaison diversifiée et détaillée, mais avec des aperçus synthétisés. Nous nous concentrons sur les principaux axes de recherche observés sur la planification et l'ordonnancement du programme opératoire. Nous résumons les limites des modèles utilisés pour mieux introduire la méthodologie de l'intelligence artificielle distribuée dans une architecture hybride de pilotage, proposée dans la suite de notre étude afin de résoudre le problème de la gestion du bloc opératoire.

3 Management des systèmes hospitaliers

3.1 Introduction

La qualité de vie des citoyens dépend principalement de leur bien-être et, par conséquent, 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, budgétaires mais aussi à une rude compétitivité. Les demandes de soins et, partant, les coûts des soins de santé ne cessent d'augmenter, dans un contexte où le patient devient un consommateur qui exige la meilleure qualité de soins au meilleur coût. Les gestionnaires de système hospitalier doivent adapter leurs méthodes et leurs outils de gestion à ces contraintes bien réelles, au risque de faire disparaître leur hôpital. Ils doivent revoir leurs méthodes d'organisation et le système de gestion de leurs processus. L'optimisation des systèmes de gestion soulève des problèmes tels que les systèmes d'information, le dossier de santé numérique, l'infotronique, le dimensionnement des ressources hospitalières et les outils d'aide à la décision qui sont par excellence, des compétences en ingénierie industrielle.

Le bloc opératoire est un des services les plus coûteux en investissement et en coût de fonctionnement de l'hôpital ; Néanmoins, il est le service qui génère la majeure part des recettes de l'hôpital d'où le grand intérêt porté à sa gestion. La littérature regorge de contributions axées sur les questions de dimensionnement, de planification, d'ordonnancement et de ré ordonnancement du bloc d'opération. Cette abondance et cette richesse illustrent la complexité de la gestion d'un bloc opératoire.

3.2 Systèmes d'information hospitaliers

Dans une entreprise, afin d'optimiser son efficacité organisationnelle et d'accroître sa compétitivité sur les marchés, les systèmes d'information s'imposent fortement, en tant que moyen stratégique clé. De même, les hôpitaux prennent conscience des avantages et bénéfices du système d'information. Le contrôle des flux d'informations concernant le patient, améliore sa propre sécurité dans son parcours de santé. En effet, l'outil de gestion de l'information permet

de décloisonner une organisation souffrant de problèmes de communication, non seulement entre services, mais également au sein d'un même service.

De plus, la mise en place d'un système d'information approprié peut permettre de mieux connaître l'activité et son déroulement [Romeyer 2000][45]. La communication faite par Romeyer et Bongiovanni en 2000 portait sur la manière dont certains hôpitaux publics français, qui développent des systèmes d'information caractérisés par une traçabilité des activités du personnel infirmier, parviennent à assurer la continuité des soins prodigués aux patients. Les auteurs distinguent deux types de systèmes d'information : les systèmes d'information centrés sur le patient et les systèmes d'information centrés sur les activités ou les unités de soins (exemple : le bloc opératoire).

Les systèmes d'information centrés sur le patient sont très utiles pour optimiser le parcours des patients depuis leur arrivée à l'hôpital jusqu'à leur départ. Pour ce qui concerne les systèmes d'information centrés sur les activités, ce type de système d'information repose sur une traçabilité de toute l'activité générée autour du patient dans une unité de soins par exemple. Ils permettent de connaître l'activité et d'avoir des données nécessaires à la modélisation et la simulation des systèmes hospitaliers afin d'objectiver certaines décisions organisationnelles ou opérationnelles. A titre d'exemple, Dans [Lapierre 1999][46] l'auteur propose une stratégie pour construire un système d'information, qui repose sur un système local de mesures évaluant les temps de délivrance des soins dans l'unité de soins concernée (bloc opératoire) afin d'identifier les retards et leurs différentes causes. L'interdépendance entre les différents acteurs dans la réalisation d'une chirurgie, à savoir les brancardiers, les infirmiers, les anesthésistes, les aides-soignants et les chirurgiens pour la réalisation de l'intervention, définissent une source significative du retard. Un indicateur de performance est établi à partir de mesures prélevées avec une périodicité choisie, il informe sur l'amélioration d'une performance (par exemple la réduction des retards des chirurgies). Mais l'importance de cet indicateur réside dans la possibilité de l'exploiter pour réagir sur le processus pour ajuster sa performance comme une boucle de retour dans un système automatique. Encore faut-il avoir des mesures fiables et pertinentes et que le système d'information soit dès la conception bien pensé et intégré au système de pilotage et de contrôle pour optimiser l'exploitation des informations.

Dans [Gonzalez-Martinez 1997][47] les auteurs présentent un système d'information dans un service d'urgence. En ce qui concerne les fonctionnalités implémentées, on trouve :

- la prévision de la demande, basée sur l'exploitation de modèles statistiques utilisant les données historiques du service.
- relever *automatiquement* les données techniques à partir de la surveillance de l'activité en phase de réalisation,
- ordonnancer des interventions et allouer des ressources en utilisant les données existantes de l'activité.
- le suivi des activités et de la réalisation pour constituer l'historique et mettre à jour les indicateurs,
- des rapports d'interventions pour extraire des données et faire des statistiques.

Les auteurs de [Wright 1996] [48] insistent sur la nécessité de disposer au préalable de données fiables et complètes pour pouvoir effectuer une gestion prévisionnelle bloc opératoire. La précision des données opératoires des interventions chirurgicales (durées, ressources, ...) dépend de l'adéquation de leur codification et de la richesse de l'historique. Ils précisent qu'un système de suivi des informations sur l'activité de la salle d'opération définit une condition préalable à toute fonction prévisionnelle de gestion. Ce système contribuera, pour un planning donné, à minimiser les dépassements d'heures par une meilleure connaissance des durées.

En outre, **Le flux physique** est visible et lent, alors que **le flux d'informations** est lui invisible et rapide (Thomas, 2008)[49]. Les informations considérées peuvent être verbales, informatiques, écrites... et plus ou moins structurées et formalisées. Cependant, la masse de données collectées de plus en plus importante, la structure de plus en plus complexe des systèmes d'informations et la complexité des traitements d'optimisation ont souvent conduit à mettre en place des transferts de données qui sont ponctuels ou mieux périodiques ralentissant les flux d'informations (pas de continuité dans le transfert de l'information).

L'émergence actuelle des technologies d'identification automatique et de transfert d'information (**infotroniques**) apporte des réponses au problème de synchronisation des flux : en effet, il devient possible d'identifier instantanément chaque instance de produit, voire d'y associer des informations pertinentes et de les transférer instantanément là où il faut. Avec

l'infotroniques la disponibilité d'informations à la fois sur le procédé et le patient (produit) lui-même amène à une amélioration de l'observabilité dans l'espace des états de fonctionnement contrôlé. L'identification automatique ajoute aux informations sur le procédé un complément les informations sur le produit. Si cette visibilité accrue permet incontestablement d'améliorer les performances des systèmes classiques d'exécution de la production, elle permet également d'envisager de façon réaliste la mise en œuvre de systèmes de pilotage de la production distribués, intelligents, et réactifs (Mc Farlane et al, 2003)[50].

Les technologies d'identification automatique couplées aux techniques « d'activation » du produit (patient intelligent) offrent un vecteur d'information permettant de capter précisément en temps réel les événements de la phase réalisation, mais également de véhiculer des informations permettant d'améliorer les décisions prises à même le flux. Une architecture informatique doit permettre la collecte, le traitement, le stockage, la mise en forme et l'accès aux informations ainsi collectées, afin d'améliorer la pertinence des décisions prises par les entités décisionnelles. *Cette idée concernant un système d'information distribué et intelligent « Activness au bloc opératoire » mérite à notre avis, d'être examinée dans le cadre d'une future thèse de recherche ou proposer en tant que thème dans un projet de recherche au niveau national (ANR par exemple).*

3.3 Systèmes de pilotage

« Factory control is defined as the actuation of a plant to make products, using the present and past observed state of the plant and demand from the market » (ISO,1986)[51]. Tout système de production doit être piloté pour atteindre des objectifs de productions. Ce terme est vaste et peut admettre de multiples moyens de mises en œuvre.

Dans la littérature une définition du système de contrôle a attiré notre attention tellement elle convient au problème sujet de cette étude la gestion du bloc opératoire : *« Le pilotage consiste à décider dynamiquement des consignes pertinentes à donner à un système soumis à perturbation pour atteindre un objectif donné décrit en termes de maîtrise de performances. La notion de maîtrise intègre non seulement celle de maintien d'un niveau de performance donné, mais également celle de progrès (évolution vers un niveau de performance souhaité ou avec une amélioration continue) » Professeur Damien Trenteseaux.*

De cette définition, que nous décrivons comme avant-gardiste, nous relevons qu'un système de pilotage n'est pas seulement destiné à réguler un processus, mais doit permettre d'agir sur les mécanismes du processus pour l'améliorer. Surtout, nous notons que lorsque le processus est perturbé, le système de pilotage acquiert son importance et sa valeur réelle. Nous soulignons également le mot "dynamiquement" qui a tout sa puissance dans le cadre du contrôle des processus très perturbés comme le bloc opératoire.

A. Les principales fonctions du système de pilotage du bloc opératoire sont :

- Planification

Cette fonction permet de générer des plans de distribution des patients (plan de production) sur les salles-jours (assimilés à des postes de production dans une usine). L'outil de génération de ces plans utilise les données du système d'information et décide en fonction des objectifs prédéfinis. Ses décisions s'inscrivent dans le cadre des stratégies du bloc opératoire.

- Ordonnancement prédictif(off-ligne)

Cette fonction concerne différentes zones de l'hôpital car elle concerne les salles d'hospitalisation, la salle d'induction, les salles d'opération, la salle de réveil, la salle de soins intensifs, les ressources humaines, l'approvisionnement et la gestion des consommables, les moyens de transport des patients, les moyens de visualisation (radio, scanner, IRM, ...) et les laboratoires des analyses médicales. Cette fonction vient après à la fonction de planification prédictive.

- Réordonnancement dynamique :

Cette fonction d'ajustement ou de reconstruction de planning tient compte des perturbations et adapte le calendrier aux données perçues de la situation du processus en temps réel. Cette fonction réalise une maintenance dynamique du planning.

- Conduite

La fonction de conduite assure une flexibilité à court terme pour absorber les fluctuations du système. Elle correspond au niveau décisionnel pour la mise en œuvre des tâches ordonnancées. Cette fonction correspondra dans notre système de gestion à la fonction d'équilibrage de la charge entre les salles opératoires.

- Commande

Cette fonction vous permet de lancer des commandes pour agir sur le système physique. Elle correspond d'habitude à la commande des équipements et automatismes de production. Cette partie sort du cadre de notre étude.

B. Performances d'un système de pilotage

La performance d'un système de pilotage de processus est généralement mesurée sur la base des critères suivants: (Bousbia & Trenteseaux, 2002)[52],

- Auto-organisation

Un système de pilotage doit trouver d'une manière automatique et autonome la meilleure organisation pour améliorer ses performances et pouvoir pallier les conséquences des évolutions de l'environnement.

- Adaptation

Un système de pilotage doit pouvoir changer automatiquement de comportement pour faire face aux fluctuations de son environnement mais avec toujours la même vision celle d'atteindre les objectifs.

- Optimisation

Un système de pilotage doit contrôler le processus de production non seulement pour que celui-ci réalise (performe) ses fonctions mais aussi pour optimiser cette performance de production sur la base des critères préfixés.

- Réactivité

« Un système réactif agit continuellement et instantanément à des événements ou stimuli, qu'ils soient externes ou internes. » (Zaffalon & Gerguet, 1995)[53]. Ainsi, le système de pilotage doit réagir en temps quasi-réel pour prendre ou proposer des décisions pour réaliser des tâches imprévues ou prendre des décisions rapides pour limiter la diminution de la performance qui peut être causée par des perturbations.

C. Les types de pilotage

Plusieurs classifications des approches de pilotage ont été proposées selon la considération de la nature des données et de la sévérité de l'incertitude :

a) Le pilotage proactif

« L'objectif des approches proactives est de prendre en compte l'incertitude lors de la réalisation de l'ordonnancement initial. Elle est utilisée pour rendre l'ordonnancement prédictif plus robuste. » (Davenport et al., 2000)[54].

Cette approche concerne les études de planification et de d'ordonnancements avec des modèles stochastiques et des variables aléatoires obéissant à des lois de probabilité estimées. En conséquence, les méthodes de population sont les plus utilisées pour générer une solution proactive (pour pouvoir déterminer les lois de probabilité)

b) Le pilotage réactif

« Les approches réactives se déroulent lors de la réalisation de l'ordonnancement. Elles se basent sur des informations mises à jour concernant l'état du système et éventuellement sur un ordonnancement prédictif initial, elles décident quand et où les activités doivent être exécutées » (Davenport et al., 2000)[54].

Les approches réactives sont adaptées aux processus fortement perturbés (c'est le cas du processus du bloc opératoire). En fait, ces méthodes prennent en compte des différences significatives des données telles que la variation de durée des interventions chirurgicales, les arrêts, le décalage des dates de début ou de fin, les arrivées d'urgence, les annulations, etc.

Le point fort de ce type de pilotage est bien sûr sa réactivité à prendre en compte les imprévus. Son point faible est qu'il risque de dégrader les performances globales du processus.

c) Le pilotage hybride prédictif-réactif

Les approches prédictives-réactives sont basées sur un ordonnancement initial déterministe sans tenir compte d'éventuels événements futurs. Le processus est guidé par cette planification et s'adapte occasionnellement en temps réel pour réagir aux perturbations.

Dans ce cas l'ordonnancement est soit modifié, soit recalculé à partir des données mises à jour (réordonnancement).

d) Pilotage proactif-réactif

Ce pilotage consiste à concevoir (offline), un ordonnancement initial prédictif et robuste qui prend en considération les données aléatoires avec l'aspect incertain de l'environnement. Dans une deuxième étape (online) on adapte le premier ordonnancement en fonction de la situation du processus à un instant donné en utilisant un algorithme de modification qui réalise une maintenance dynamique de l'ordonnancement.

Un pilotage dynamique consiste à reconstruire un ordonnancement de production ou à modifier, si possible, un ordonnancement existant au fur et à mesure de l'évolution du processus de production. Le nouveau calendrier prend en compte les événements aléatoires, les données incertaines et le caractère incomplet des informations, dès leur apparition ou dès que leur effet se fait sentir. Tout ceci est généralement connu sous le vocabulaire : planification ou ordonnancement dynamique.

e) Le pilotage distribué

Un système de [pilotage centralisée et hiérarchique reste inerte](#) et peu réactif face à des perturbations comme des urgences, des annulations, des indisponibilités de ressources, etc. Le découplage des fonctions de planification et d'ordonnancement par rapport à l'état (évoluant dynamiquement) du système physique engendre souvent un écart important entre solution planifiée et solution réalisée. C'est pourquoi, dans le but de proposer des approches agiles, de nombreuses initiatives de recherche s'orientent vers des solutions plus distribuées, dans lesquelles les décisions de planification et d'ordonnancement sont rapprochées de la phase de l'exécution et du flux de produits (patient).

L'organisation hiérarchique centralisée des systèmes de production conduit à un manque de réactivité : la réaction à un aléa n'est pas traitée directement à même le flux ce qui pénalise le temps de réaction. Afin de pallier cet inconvénient phénomène, les capacités de décision allouées aux acteurs locaux doivent être accrues. Dans ce paragraphe, nous introduisons l'approche multi-agents, un système dans lequel la construction de l'ordonnancement est émergente et résulte des événements survenant en phase de réalisation.

Afin de répondre aux impératifs de réactivité et de flexibilité, les recherches se sont orientées vers les systèmes flexibles de production pilotés par des systèmes à structure hétérarchique

(Trentesaux, 2007)[55]. Ces systèmes de production à intelligence distribuée sont souvent basés sur des systèmes logiciels de type multi-agents. Le concept des systèmes multi-agents repose sur l'intelligence émergente des interactions entre agents. La mise en œuvre de telles interactions suppose de doter les agents de capacités de perception et d'action sur l'environnement. Un système multi-agents de pilotage de la production permet de planifier en temps réel la charge de travail des ressources.

Le pilotage est réactif, le comportement global du système émerge de l'interaction des centres de décisions locaux. Les décisions sont prises en temps réel, par collaboration entre les différents acteurs et au fur et à mesure que les événements de production surviennent : l'approche est diachronique. Le principal avantage d'une telle approche est la capacité à prendre des décisions d'ordonnancement sans disposer d'une vue globale du système. Si cette absence de vue globale ne permet pas d'assurer l'atteinte d'un optimum global, l'ensemble des décisions est néanmoins pris par rapport à la situation courante réelle.

Le défaut majeur des architectures hétérarchiques réside dans le fait que chacune des décisions est prise de manière locale, par un ou plusieurs agents disposant chacun d'une vision partielle du système. Cette politique de prise de décision permet de simplifier le processus global de prise de décision mais n'assure pas l'optimalité de la solution. Comme souligné dans (Van Brussel et al, 1998)[56]: « the independence of agents prohibits the use of global information, central scheduling or resource planning are impossible ».

Les travaux présentés dans la littérature sur les organisations hétérarchiques ou hybrides montrent l'intérêt de prendre les décisions de pilotage à même le flux, voire de rendre le flux de produit acteur de son pilotage. Cette perspective est d'autant plus crédible que les technologies infotroniques permettent au produit de véhiculer les informations le concernant. Cependant, Les mécanismes de prise de décision automatique ne sont pas encore totalement éprouvés et ils ne sont pas adaptés tant que le système de production n'est pas suffisamment automatisé.

3.4 Planification dynamique

Le problème principal posé par le pilotage du bloc opératoire ne réside pas principalement dans la génération d'une solution initiale optimisée, mais dans la non-optimalité des solutions peu pensées, improvisées induites par l'avènement des aléas et qui sont réellement mises en œuvre.

Différentes approches permettent de prendre en compte plus ou moins les aléas et les événements imprévus, soit en les considérant dès la construction de l'ordonnancement afin de proposer un ordonnancement robuste, soit en reconsidérant en temps réel de réalisation une partie de l'ordonnancement. Ces approches peuvent être classifiées comme « hors-ligne » pour les premières et « en ligne » pour les secondes.

3.4.1 L'ordonnancement robuste face aux aléas

La robustesse de l'ordonnancement représente sa capacité à rester réalisable malgré la survenue d'événements imprévus. Un premier type d'approche consiste à intégrer lors de la génération de l'ordonnancement des paramètres de variabilité des grandeurs réelles (les urgences, variabilité des temps opératoires etc), afin de prévoir des marges d'erreurs permettant de maintenir la pertinence de l'ordonnancement, sous réserve que les phénomènes stochastiques soient correctement modélisés. Dans le domaine de la production, (Artigues et al, 2005)[57] proposent d'améliorer la flexibilité de la solution proposée, en ne proposant plus un seul ordonnancement, mais une famille d'ordonnements réalisables. Une famille d'ordonnement représente l'affectation ordonnée de groupe de tâches à chacune des ressources, l'ensemble des tâches d'un même groupe étant totalement permutable avec un objectif global de minimisation du temps total (makespan).

L'approche stochastique présentée ci-dessus consiste tout d'abord à identifier les lois de la variabilité des paramètres du système, c'est-à-dire à disposer d'une data d'historique significative de tous les paramètres. La collecte et l'analyse de ces données est un processus particulièrement long. De plus, le temps de calcul des moteurs d'optimisation, dans le cas de l'utilisation de modèles stochastiques, est souvent très coûteux en temps de calcul. Dans de telles situations, l'utilisation de la théorie des ensembles flous représente une alternative pour modéliser l'inexactitude et l'incertitude des données, avec peu de détails sur la variabilité des paramètres et des temps de calcul plus courts. (Balasbramanian et al, 2003)[58] modélise l'incertitude dans les durées d'opération en utilisant des ensembles flous. Un programme linéaire à nombre entiers est utilisé pour évaluer le temps total de réalisation, dans le pire des cas et dans le meilleur des cas. (Yimer et al, 2009)[59] utilisent une approche similaire, prenant en compte les temps intermédiaires et leur variabilité, mais utilise un algorithme génétique pour réduire le temps de calcul. Cependant, l'utilisation de la théorie des ensembles flous pour résoudre les

problèmes de planification est relativement récente et la pertinence de ces approches pour résoudre les problèmes liés à la dimension industrielle n'a pas encore été prouvée.

Si les techniques présentées précédemment permettent de générer un ordonnancement robuste ou flexible, il est également possible d'analyser a priori les performances et la robustesse dans un contexte incertain d'un ordonnancement généré à l'aide d'outils déterministes classiques par simulation. La simulation habituellement utilisée pour la conception et le dimensionnement des systèmes industriels, devient un outil permettant d'évaluer son comportement à court terme. (Cardin, 2007)[60] utilise une simulation en ligne dite proactive dans une démarche d'aide au pilotage en temps réel d'une cellule flexible de production. Ce travail met en évidence une contrainte essentielle d'initialisation du modèle de simulation dans un état cohérent avec l'état du système réel afin de donner des résultats pertinents. Dans (Klein et al, 2009)[61], nous présentons une structure permettant la collecte en temps réel des événements de terrain reposant également sur les technologies d'identification automatique, et permettant d'alimenter en temps réel un modèle de simulation afin d'évaluer différentes alternatives d'ordonnancement. Il est toutefois à noter que, comme pour les approches d'ordonnancement stochastique, l'utilisation de modèles de simulation peut parfois induire des temps d'évaluation des différentes alternatives assez longs. La technique de réduction des modèles de situation présentée dans (Thomas et al, 2005)[62] permet, par exemple, de ne représenter que les goulots afin de réduire considérablement les temps de calcul.

3.4.2 Ordonnancement réactif

Une seconde approche permettant la robustesse aux perturbations consiste à reconsidérer régulièrement (de manière périodique ou événementielle) l'ordonnancement en fonction de l'évolution réelle du système de production. Les décisions de réordonnancement peuvent être prises de façon centralisée ou distribuée.

Le but de l'ordonnancement réactif est de donner une réponse immédiate aux événements imprévus en corrigeant de façon dynamique l'ordonnancement prédictif préalablement établi. Deux approches existent : la première consiste à réordonnancer l'ensemble des tâches non-réalisées à partir du moment où survient l'événement perturbateur (réordonnancement), la seconde repose sur des techniques permettant de reconsidérer simplement et rapidement une partie de l'ordonnancement.

Les approches de réordonnancement s'appuient sur des outils similaires à l'ordonnancement. Par exemple, (Ruiz et al, 2001)[63] utilisent un système de surveillance des défauts (Fault Diagnosis System - FDS) couplé avec un module d'optimisation de l'ordonnancement afin de réagir aux aléas comme l'indisponibilité d'une ressource ou la variation des temps opératoires. Lorsqu'un aléa significatif survient, le FDS active le module d'ordonnancement, basé sur un réseau de neurones associé à un système expert, afin de minimiser l'impact de la déviation sur l'ordonnancement non-encore réalisé. (Kanakamedala et al, 1994)[64] proposent une heuristique permettant de sélectionner l'alternative représentant le moindre impact sur l'ordonnancement d'origine, permettant le décalage temporel des ordres (time shifting) et l'utilisation de ressources alternatives.

Enfin, des méthodes permettent de reconsidérer partiellement l'ordonnancement afin de l'améliorer localement ou de maintenir sa cohérence en cas d'aléas. (Roshif et al, 2001)[65] proposent un algorithme basé sur la programmation linéaire en nombres entiers, modifiant l'ordonnancement d'origine en relâchant, de manière itérative, un ensemble de tâches et en optimisant leur allocation.

3.5 Les architectures de pilotage

De l'étude bibliographique, il ressort que les approches centralisées et distribuées présentent des forces et faiblesses complémentaires, ce qui nous oriente vers une architecture de décision hybride, reposant sur un système de planification centralisé et une gestion de l'exécution décentralisée, à même le flux, intégrant le produit et son représentant dans le processus décisionnel. L'application des technologies infotroniques fortement souhaitée représenterait un lien efficace entre le flux physique, le flux d'informations et les centres de décisions.

Dans la littérature sont présentés, différentes approches permettant d'améliorer la réactivité du système de production et d'améliorer sa robustesse face aux perturbations. Les approches d'architecture hybride se font distinguées. Elles permettent d'obtenir à la fois, une optimisation globale par le pilotage centralisé qui a une vision sur l'ensemble du système, qui prend en compte les objectifs et les critères d'optimisation au niveau global, et elles permettent d'obtenir une réactivité rapide et pertinente, par le pilotage distribué prenant en compte les critères locaux et les informations temps réel.

De la problématique fonctionnelle décrite précédemment concernant la performance globale et la réactivité nécessaire, émergent une problématique scientifique :

- Comment coupler la réactivité d'une approche distribuée et les capacités d'optimisation globale autorisées par une approche centralisée prédictive ?
- Comment le produit actif (patient intelligent) peut-il contribuer à l'interopérabilité décisionnelle entre un système centralisé et entités décisionnelles distribuées
- Comment démontrer la validité de ces approches ?

Cette section présente différentes architectures de pilotage centralisées, distribuées ou hybrides apportant quelques éléments de réflexion concernant les problèmes soulevés.

3.5.1 Pourquoi, un processus bloc opératoire réactif ?

Au niveau opérationnel, la gestion du bloc opératoire doit faire face à deux types de perturbations :

- perturbations exogènes :

Dans un contexte hospitalier, les niveaux de variabilité et d'incertitude suivants doivent être pris en compte :

- Les chirurgies d'urgence à traiter par jour varient en nombre, en durée et en ressources mobilisées.
- Les annulations tardives entraînant des pertes de rentabilité significatives. Ainsi, si une intervention est annulée ou retardée, une autre intervention non programmée doit être positionnée à sa place si toutes les contraintes le permettent. En d'autres termes, le système de contrôle doit résoudre de manière réactive ce problème imprévu.

- perturbations internes :

Ces perturbations sont liées à la réalisation des interventions planifiées. Plusieurs types de perturbations internes peuvent être envisagés.

- Incertitude sur le temps nécessaire à l'achèvement de chaque opération : un retard important d'une intervention remet en cause la programmation pour le temps restant et peut entraîner le report des interventions déjà programmées.
- Les aléas qui affectent certains éléments du bloc d'exploitation, tels qu'une défaillance matérielle ou non disponibilité d'une ressource humaine. Parfois, une partie du bloc opératoire en heures d'ouvertures peut être fermé en raison de pannes ou d'opérations de maintenance curative. Bien sûr, des mesures doivent être prises pour réparer, mais le système de gestion doit également être en mesure de faire face à cette situation.

Notre recherche porte sur la gestion du processus du bloc opératoire en milieu hospitalier. Tenant compte des problèmes posés par l'exploitation du bloc opératoire, l'architecture de contrôle recherchée doit être conçue :

- Optimisé « Globalement » : pour assurer de bonnes performances globales et durables pour un bloc de chirurgies (par exemple, efficacité et efficience dans la réalisation des interventions planifiées, augmentation de la satisfaction des patients et des chirurgiens, réduction du temps d'ouverture moyen des salles, augmentation du taux d'occupation des salles et des chirurgies, réduction des coûts ...)
- Réactif « localement » : permettre au processus bloc opératoire de gérer efficacement les perturbations et de prendre en compte les interventions chirurgicales d'urgence le plus rapidement possible.

3.5.2 Pourquoi une Architecture Hybride de Pilotage ?

En (2009), Trentesaux [66] synthétise et regroupe dans son article les architectures de contrôle en trois classes:

- La classe I concerne les architectures de contrôle hiérarchiques qui offrent des performances optimales dans un environnement prédictif et déterministe, mais manquent malheureusement de réactivité et d'adaptation aux perturbations et aux incertitudes (Marik et al., 2005)[67].
- La classe III concerne les architectures non hiérarchiques, c'est-à-dire les structures de contrôle hiérarchiques hétérogènes (Veeramani et al., 1993)[68] , (Ounnar et al., 2010)[69].

Dans cette classe, puisqu'il n'y a pas de relation hiérarchique entre les entités de contrôle, ce type a une très bonne réactivité puisque les décisions sont prises à l'endroit où elles sont appliquées. Cependant, les architectures de classe III souffrent d'un manque important de vision large, ce qui implique une perte de performance globale (Marik et al., 2005)[67]. En effet, les décisions étant prises localement dans ce type d'architecture, elles risquent de ne pas être adéquates pour optimiser les performances globales. *However, the class III architectures suffer from myopia, This myopia is due to a lack of information of each entity about its future and other entities' future. Since the decisions are made locally in this type of architecture, they are globally not sufficient. (Pach et al., 2013)[70]*

- Le système de contrôle de classe II est constitué d'une combinaison de classe I et de classe II. Il existe plusieurs façons de choisir la combinaison appropriée. Pour expliquer ce dernier point, dans les différentes littératures concernant les architectures de contrôle hybrides classe II, on peut pour ces architectures identifier deux pôles de caractéristiques :

Le premier pôle de caractéristique est la structure : (dynamique ou statique), la structure dynamique concerne une structure de contrôle évolutive (par exemple, un changement complet d'une architecture de classe I à une architecture de classe III). La structure statique est une structure de contrôle non évolutive.

Le second pôle de caractéristique : est l'homogénéité du contrôle et la manière dont le contrôle est appliqué à toutes les entités, de la même manière (contrôle homogène) ou non (contrôle hétérogène).

Dans ce contexte, une solution adéquate, proposée par les travaux de (Zambrano et al., 2011)[71], consiste en une association intelligente de deux types de contrôle pour:

- maintenir l'optimisation globale des entités non affectées par les perturbations,
- Restez réactif aux incertitudes tout en évitant les coûts de communication inter-niveaux et de recalculs globaux.

4 Etat de l’art en planification et ordonnancement du bloc opératoire

Nous présentons des travaux concernant les problèmes de la planification et de l'ordonnancement au bloc opératoire en les classant selon les ressources matérielles ou humaines prises en compte dans la préparation du programme opératoire.

4.1 Introduction

Dans cette deuxième partie du chapitre 2, nous présentons les deux problèmes de la planification et de l'ordonnancement, qui peuvent être réalisée de manière séquentielle ou intégrée pour construire le programme du bloc opératoire. Nous détaillons toutes les contraintes, les fonctions objectives, les ressources humaines et les ressources matérielles incluent dans ces problèmes. Nous passons en revue toutes les méthodes exactes, heuristiques, méta heuristique, algorithme de la recherche opérationnelle, programmation par les contraintes mis en œuvre pour résoudre le problème. Nous examinons les modèles déterministes et stochastiques en mettant l’accent sur la nature et les sources des données utilisées, déterministes ou aléatoires, en tenant compte de considérations déterministes et stochastiques. Ensuite, nous présentons le problème de la planification et de l'ordonnancement intégrés du programme opératoire, avec des équipes chirurgicales de spécialités différentes. Enfin, nous examinons les conclusions à tirer de cette analyse de la littérature.

4.2 An Overview :

Le bloc opératoire comprend des salles d'opération, ainsi que des installations préopératoires et postopératoires telles que l'unité d'induction et d'anesthésie, l'unité de soins post-anesthésie (USPA) et, enfin, l'unité de soins intensifs (USI); ainsi que des ressources humaines (chirurgiens, anesthésistes, infirmières...). Le bloc opératoire est l’une des ressources les plus critiques et les plus coûteuses de l’hôpital (Guerriero et Guido, 2011)[72], représentant environ

70% des revenus (Jackson, 2002)[73] et 40% des coûts (Macario et al., 1995)[6] faisant que le problème de la gestion du bloc opératoire est largement analysé par la littérature.

Les décisions relatives à la gestion du bloc opératoire sont généralement décomposées en trois niveaux de décision hiérarchiques (Cardoen et al., 2010)[73]: stratégique, tactique et opérationnel. Les principaux paramètres et hypothèses pour chaque niveau de décision sont décrits dans plusieurs revues sur le sujet (Cardoen et al., 2010)[74]; (Guerriero et Guido, 2011)[72]; May et al., 2011)[75].

Au niveau stratégique, les décideurs déterminent le volume et le mélange de cas de chirurgies afin de maintenir une taille acceptable des listes d'attente et d'atteindre les objectifs de coûts (Adan et Vissers, 2002)[76]; (Blake et Carter, 2002)[77]; (Testi et al., 2007)[78].

Le mélange de cas dépend des pathologies affectant la population dans la zone de recrutement et de la capacité des ressources de l'hôpital (Blake et Carter, 2002)[77]. Une fois la combinaison de cas définie, les ressources du bloc d'opération sont affectées aux spécialités chirurgicales de l'hôpital, ce qui détermine la quantité de ressources que chaque spécialité obtient (c'est-à-dire le temps d'opération, le nombre de lits...).

Au niveau tactique, une fois le niveau stratégique défini, les ressources du bloc opératoire sont réparties sur un horizon de planification de plusieurs semaines (Blake et al., 2002)[77]; (Wachtel et Dexter, 2008)[79]. Étant donné que le bloc opératoire représente un goulot d'étranglement dans la plupart des hôpitaux et qu'il est en outre l'installation la plus coûteuse de l'hôpital (Jebali et al., 2006)[79], la plupart des articles ne traitent que du problème d'allocation des salles (Testi et al., 2007)[78]. L'objectif est de définir le (**Master Surgery Schedules**), qui spécifie quelles spécialités chirurgicales sont affectées à chaque salle d'opération au cours d'une journée (OR-jour) sur l'horizon de planification (Beliën et Demeulemeester, 2007)[80]. Le (MSS) définit également les besoins en ressources globales, tels que la demande d'infirmières, les médicaments, les procédures de diagnostic, les tests de laboratoire, etc. (Blake et al., 2002)[77]. Cependant, peu d'études ont pris en compte les lits (Beliën et Demeulemeester, 2007)[80] et les infirmières (Beliën et Demeulemeester, 2008)[81] dans la construction du (MSS). Le but de cette prise en compte était de réduire les coûts de personnel.

Enfin, au niveau opérationnel, le calendrier chirurgical est obtenu sur un horizon de planification d'une semaine ou de deux semaines voir par exemple (Fei et al., 2008)[82];

(Lamiri et al., 2009)[37]; (Marques et 2012)[83], (Ozkarahan, 2000)[84]. A ce niveau, le nombre, le type et les heures d'ouverture de chaque ressource ont déjà été définis, ainsi que les données pertinentes des patients figurant sur la liste d'attente (telles que la durée prévue de l'opération, la priorité du patient, le délai opératoire, etc.). Les décideurs doivent prendre en compte plusieurs décisions avant de déterminer le calendrier chirurgical. Tout d'abord, l'affectation du chirurgien responsable du patient lors de son séjour à l'hôpital, qui est effectuée lors de la première consultation afin de garantir la continuité des soins.

Cette décision est prise en fonction de la spécialité du chirurgien, de ses compétences et de sa charge de travail. Après que chaque patient figurant sur la liste d'attente se retrouve avec un chirurgien qui lui est assigné, chaque créneau de time-OR du (MSS) est alloué à un chirurgien (ou équipe). L'affectation est faite en fonction des préférences du chirurgien ou du type de la chirurgie qu'il doit effectuer (le but est que le chirurgien soit affecté à des salles d'opération bien équipées lui permettant de réaliser dans des conditions correctes les chirurgies assignées). L'une des trois stratégies de gestion proposées par Patterson (1996)[17] peut être utilisée selon la politique de l'hôpital.

La première est la stratégie « block scheduling », dans laquelle chaque spécialité possède un certain nombre de plages de time-OR dans lesquelles un chirurgien de cette spécialité peut effectuer ses chirurgies. Un chirurgien ne peut effectuer aucune opération chirurgicale en dehors des fenêtres horaires qui sont allouées à son équipe. La seconde est la stratégie « open scheduling » dans laquelle le décideur attribue des time-OR aux chirurgiens en fonction de l'arrivée de leurs demandes de planification de chirurgies. Dans (Fei et al. 2008)[82], les auteurs considèrent la stratégie block scheduling comme un cas particulier de la stratégie open scheduling, cette dernière étant plus flexible que la précédente.

Enfin, la stratégie « modified block scheduling » où l'allocation time-OR peut être modifiée ce qui permet d'accroître la flexibilité. Le niveau de décision opérationnel comprend les deux cas hors ligne et en ligne (Hans et al., 2012)[85].

Selon les auteurs de (Magerlein et Martin, 1978)[16] le niveau opérationnel hors ligne est traditionnellement résolu en deux étapes: la première étape appelée « advance scheduling » implique la détermination pour chaque chirurgie de l'OR-jour salle et jour de l'intervention, tandis que dans la deuxième étape appelée « allocation scheduling », une séquence de chirurgies pour chaque salle d'opération et à chaque jour de l'horizon de planification est obtenue. Ultérieurement en 2010, les auteurs de (Cardoen et al. 2010)[74] proposent une nouvelle

définition, ainsi au niveau opérationnel hors ligne, l'advance scheduling est désormais la planification et l'allocation scheduling est désormais l'ordonnancement. La décomposition du niveau opérationnel en deux étapes successives avait pour but de réduire la complexité du problème résultant (Riise et Burke, 2011)[86]. Néanmoins, par cette séparation, la qualité du calendrier chirurgical ainsi obtenu est réduite en raison de la forte interdépendance entre ces deux étapes (Cardoen et al., 2009a)[87]. L'approche planification et ordonnancement intégrés constitue un sujet de recherche émergent (Marques et al., 2012)[83]; (Riise et Burke, 2011)[86]; (Van Huele et Vanhoucke, 2014)[88]; Vijayakumar et al., 2013)[89].

Le niveau opérationnel planification en ligne (planification dynamique) implique des mécanismes de contrôle permettant de surveiller le processus et de réagir aux événements imprévus qu'on ne peut pas anticiper (Hans et al., 2012)[85], tels que les écarts importants entre la durée programmée et la durée réelle des chirurgies (Min et Yih, 2010) [90] ou l'indisponibilité des ressources réservées aux arrivées incertaines (Lamiri et al., 2009)[91].

En raison de la variabilité de la durée de l'opération et de l'arrivée de chirurgies d'urgence, l'emploi de temps (planning opératoire) de la salle d'opération est interrompu tout au long de la journée, ce qui entraîne une modification de l'heure prévue de début des interventions chirurgicales. Par conséquent, le calendrier de la salle d'opération doit être ajusté. Les travaux sur la planification dynamique se font pas nombreux. Dans (Van Essen, Hurink, et al 2012)[92] les auteurs développent un système d'aide à la décision d'ajustement du planning. Le système ne concerne que les plannings des salles d'opération en difficulté, il repose sur une analyse approfondie du problème de réordonnancement de la salle opératoire. Le problème est modélisé par un (ILP) dont l'objectif est de minimiser l'écart par rapport aux préférences des parties prenantes concernées par l'ajustement.

4.3 Le problème de la planification du bloc opératoire.

La planification prédictive des chirurgies au niveau de la décision opérationnelle hors ligne est un sujet de recherche très populaire (Hans et al., 2012)[85] (la revue de littérature de Cardoen et al., 2010)[74]; (Guerriero et Guido, 2011)[72]; (May et al., 2011)[75]. Le tableau 2.1, présente un classement des contributions de la littérature sur la planification des blocs opératoires. Il est indiqué dans ce tableau pour toutes ces contributions quelles sont le

ressources prises en compte, la stratégie de gestion (open ou block), l'approche de modélisation (déterministe et stochastique), le type de la décision, les fonctions objectives et la méthodologie pour solutionner le problème.

La planification de la salle d'opération est un problème fortement contraint. Nous présentons ci-dessous certaines des contraintes les plus importantes prises en compte dans la littérature.

- La capacité des ressources, car les ressources humaines (chirurgiens, anesthésiologistes, ...) et les ressources matérielles (salles d'opération, lits en salle de réveil, ...) ne sont pas pleinement disponibles pendant l'horizon de planification,
- Les délais d'intervention, chaque patient doit être opéré dans un intervalle de temps compris entre une date au plus tôt et une date au plus tard,
- Limitation du nombre de salles d'opération auxquelles un chirurgien peut être assigné un jour donné pour effectuer des chirurgies afin de réduire les temps d'indisponibilité du chirurgien ce jour-là tout en évitant le chevauchement de deux interventions consécutives effectuées par le même chirurgien,
- Eligibilité d'une salle d'opération, par exemple (la réservation d'une salle / jour pour planifier un type particulier de chirurgie ou obliger certaines chirurgies à être effectuées uniquement dans des salles / jours spécifiques).
- Priorité du patient, étant donné que les patients sont programmés en fonction d'un degré de priorité dépendant de plusieurs paramètres, tels que, par exemple, la date d'arrivée et l'urgence du patient (Ogulata et Erol, 2003)[18].
- Incertitude, car il existe un écart important entre la durée estimée et la durée réelle d'utilisation des ressources (salle d'opération, unité de soins intensifs, par exemple) ou la disponibilité des ressources humaines aux arrivées incertaines (urgences, ...)

Pour le choix de la fonction objectif, nous présentons ci-dessous les objectifs classiquement considérés dans la littérature:

- Le taux d'occupation des ressources, l'objectif est de minimiser leur sous-utilisation ou bien minimiser leur surutilisation ou de minimiser la surutilisation de l'unité de soins intensifs USI,

- Les coûts, l'objectif étant de minimiser les coûts fixes des patients, c'est-à-dire minimiser les coûts qui ne dépendent pas du nombre de chirurgies à effectuer,
- Equilibrage, les objectifs sont d'équilibrer la distribution du temps total de chirurgie entre les chirurgiens, d'équilibrer la répartition des interventions sur les chirurgiens et la répartition des chirurgiens sur les jours de l'horizon de planification.
- Éligibilité, l'objectif est de maximiser la satisfaction des chirurgiens en prenant en compte les différentes préférences des chirurgiens pour la réalisation de leurs interventions,
- Le risque des annulations, l'objectif est la minimisation du risque qu'une chirurgie planifiée soit annulée,
- La priorité, telle que l'objectif de minimiser le temps d'attente du patient, c'est-à-dire le délai entre la date de la décision d'opération et la date d'exécution de la chirurgie.

Parmi les méthodes exactes proposées dans la littérature pour résoudre les problèmes de planification du bloc opératoire, on trouve des modèles de programmation linéaire en nombres entiers (MILP). La limite de ce modèle est qu'il ne peut fournir des solutions optimales que pour des tailles d'instance nettement inférieures à celles trouvées dans la pratique. De plus, étant donné le contexte de la programmation opératoire, il est prioritaire de trouver une bonne solution (bien que non optimale) dans un délai raisonnable, plutôt que des calendriers optimaux nécessitant un temps de calcul important. En outre, en raison du nombre élevé d'événements imprévus (par exemple, urgences) (Roland et al., 2010)[93] ou de l'absence du patient le jour prévu (Weinbroum et al., 2003)[94], il sera finalement nécessaire de reprogrammer les interventions. Le temps de calcul doit être raisonnable pour que les décideurs puissent examiner plusieurs scénarios possibles. En conséquence, plusieurs méthodes, principalement des méthodes de recherche opérationnelle, ont été proposées dans la littérature pour résoudre le problème de la programmation opératoire, telles que:

- Les heuristiques basées sur des méthodes exactes, comme la version étendue de la méthode hongroise proposée par Guinet et Chaabane (2003)[95], et les approches de génération de colonnes (Fei et al., 2008[82]; Fei, Meskens et Chu, 2010[95]; Lamiri et al. ., 2007 [96] ; Lamiri, Xie et Zhang, 2008 [97]).

- Des heuristiques constructives, telles que les méthodes «bin packing" (Dexter, Macario et Traub, 1999 [98] , Hans et al., 2008[38]) et telles que l'approche de programmation dynamique proposée par Liu et al. (2011) [99].
- Heuristique d'amélioration, en tant que méthode de recherche locale (voir par exemple Hans et al., 2008 [38]; Lamiri et al., 2009[37]), dans laquelle l'amélioration de la solution consiste à permuter différents patients entre des jours de chirurgie.
- La méta-heuristique, comme la méthode de recherche tabou (Lamiri et al., 2009)[91], et comme la méthode de recuit simulé (Lamiri et al., 2009)[91].
- Heuristique stochastique, en tant que méthode SAA, qui combine la simulation de Monte Carlo et la programmation mixte d'entiers (voir par exemple Lamiri, Xie, Dolgui et al., 2008 [42]; Min et Yih, 2010 [90]).

Par ailleurs, plusieurs auteurs proposent des méthodes approchées pour tenter de réduire le temps de calcul requis par la programmation linéaire en nombres entiers, en tant qu'approche de génération de colonnes (Lamiri, Xie et Zhang, 2008[97]), d'heuristiques d'amélioration et de méta-heuristiques (Lamiri et al., 2009)[37].

4.4 Méthodologie pour une planification et un ordonnancement intégrés.

Dans cette section, nous présentons des travaux de recherche concernant le problème de planification et d'ordonnancement intégrés des blocs opératoires. La prise de conscience de l'intérêt d'une approche intégrée ne cesse de grandir en raison de l'interdépendance des deux problèmes de planification et d'ordonnancement (Augusto et al., 2010 [43]; Ghazalbash et al., 2012[100]; Hashemi Doulabi et al., 2014 [101]; M'Hallah and Al-Roomi [102], 2014; Marques et al., 2012[83], 2014[103]; Meskens et al., 2013[104]; Pham and Klinkert, 2008[105][86]; Riise and Burke, 2011 [86]; Roland et al., 2010[93]; Van Huele and Vanhoucke, 2014[88]; Vijayakumar et al., 2013[89]; Zhao and Li, 2014[106]). Dans le tableau 2.2, nous avons classé les contributions concernant le problème de planification et d'ordonnancement intégrés du bloc

opératoire et nous avons indiqué pour toutes ces contributions quelles ressources chirurgicales sont prises en compte, la stratégie de gestion (open ou block), ainsi que les types de décision, les contraintes, et les fonctions objectives.

La plupart des contraintes considérées dans le problème de planification et d'ordonnancement intégrés du bloc opératoire ont déjà été décrites précédemment. En ajout, des contraintes concernant la capacité matérielle sont prise en compte comme la stérilisation des plateaux médicaux ou la disponibilité du matériel mobile nécessaire pour effectuer des chirurgies. Meskens et al. (2013) [104] ont examiné de nouvelles contraintes en matière de personnel, ainsi que les préférences de l'équipe chirurgicale pour l'attribution des créneaux horaires dans la salle d'opération et leur affinité pour travailler ensemble ou non. L'affinité dans le groupe de travail chirurgical (groupe de chirurgiens, d'infirmiers et de personnel qui travaillent d'habitude ensemble) est une contrainte parmi d'autres et la programmation par contraintes (CP) est utilisée pour résoudre le problème.

En ce qui concerne la fonction objective, les principaux objectifs ont déjà été décrits dans le problème de planification du bloc opératoire. Pour le problème intégré, les objectifs supplémentaires considérés dans la littérature sont les suivants :

- Objectifs de temps, tel que la minimisation du makespan (c.-à-d. le délai d'achèvement de la dernière intervention chirurgicale programmée dans l'horizon de planification) et tel que la minimisation des retards lorsqu'ils existent (c.-à-d. La réduction de l'écart entre la date planifiée et la date limite de la chirurgie)
- objectifs de flux ou de débit, tel que maximiser le nombre de chirurgies programmées dans l'horizon de planification,
- Objectifs concernant l'utilisation des ressources, tel que la minimisation de la surutilisation des chirurgiens,
- Les objectifs de coûts, tels que la réduction du nombre de salles d'opération ouvertes,
- Affinités, telles que la maximisation des collaborations qui correspondent aux préférences des "équipes".

Comme le montre le tableau correspondant, la plupart des articles qui traitent du problème de la planification et de l'ordonnancement intégrés, considèrent une équipe chirurgicale composée d'un seul chirurgien (le chirurgien responsable de l'équipe). Cependant, des études relatives aux interventions chirurgicales générales (Zheng et al., 2012) [107] ainsi qu'aux interventions laparoscopiques (Cassera et al., 2009)[108] montrent qu'environ 90% des chirurgies réalisées par une équipe chirurgicale composée de plus d'un chirurgien, est le cas le plus répandu (Cassera et al., 2009[108]; Chitwood Jr. et al., 2001[109]; Giulianotti et al., 2003[110]; Powers et al., 2007 [111], 2008[112]; Zheng et al., 2012[107]). Néanmoins, le problème intégré avec des équipes chirurgicales composées de plusieurs chirurgiens a été étudié par (Ghazalbash et al. 2012[100]).

Dans les équipes chirurgicales composées de plusieurs chirurgiens, la littérature souligne que la durée de la chirurgie dépend de l'expérience du chirurgien assistant (Cassera et al., 2009[108]; Parker et al., 2012[113]; Zheng et al., 2012[107]). Bridges et Diamond (1999)[114] ont étudié l'impact financier de l'enseignement des résidents en chirurgie dans les salles d'opération, en montrant que la présence d'un résident entraîne dans la majorité des cas une augmentation de la durée de la chirurgie. Par ailleurs, un chirurgien expérimenté qui opère en tant qu'assistant réduit la durée de la chirurgie (réduction d'environ 30% du temps dans certaines procédures d'urologie, voir Ludwig et al., 2005[115]). Par conséquent, la littérature atteste que l'expérience du chirurgien assistant influence clairement la durée de la chirurgie. Toutefois, selon notre étude bibliographique, cette variabilité n'a pas encore été abordée. Les délais de traitement en fonction des ressources font l'objet d'une attention croissante (Akturk et Ilhan, 2011)[116]. Dans ces problèmes, les temps de traitement sont considérés en fonction à la fois de la quantité de ressources affectées (Demeulemeester et al., 2000[117]; Tseng et al., 2009[118]) et de l'expérience des ressources affectées à la tâche (Dodin. et Elimam, 1997[119]; Drexler, 1991[120]; Valls et al., 2009[121]). Comme une expérience particulière, Heimerl et Kolisch (2010)[122] considèrent une courbe d'apprentissage des ressources affectées. Le temps de traitement d'une tâche diminue si la ressource affectée a déjà effectué la même tâche auparavant phénomène appelé effet d'apprentissage. Dans (Kara et al., 2011)[122], les temps de traitement varient selon que la tâche est exécutée avec ou sans assistant. Cependant, dans cette étude ces temps de traitement ne dépendent pas du chirurgien assistant spécifique affecté à la tâche.

4.5 Planification et un ordonnancement axés sur les ressources.

4.5.1 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[78], Fei et al., 2010[95], Liu et al., 2011[99], Su et al., 2011, Devi et al., 2012[123]. Marques et al., 2012[83]). Dans certains travaux de planification, le dépassement des heures normales n'est pas autorisé (Addis et al., 2013[124], Bruni et al., 2015[124], Addis et al., 2015[125], Cappanera et al., 2016[126]). Dans d'autres, bien que les heures supplémentaires soient autorisées, il est préférable de les minimiser (Hans et al., 2008[38], Denton et al., 2010[127], Min et Yih, 2010[90], Rachuba et Werners, 2014[128], Wang et coll., 2014[129]. Les auteurs de (Landa et al., 2016[130]) 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[18]), les auteurs proposent une approche visant à minimiser la sous-utilisation des salles d'opération, à équilibrer la répartition des interventions entre les équipes chirurgicales et à réduire le temps d'attente des patients. Ils présentent un modèle de programmation multi- objectifs pour définir le programme opératoire hebdomadaire. Pour ce faire, les auteurs ont adopté une approche hiérarchique en décomposant le problème en trois phases :

- 1) détermination du sous-ensemble de patients (priorité et urgence) à opérer la semaine future
- 2) affectation des patients à des équipes chirurgicales
- 3) affectation des interventions aux salles-jours.

Dans (Marques et al., 2011)[83], 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)[131] une approche de résolution basée sur un algorithme génétique (Marques, et al., 2014)[103].

Dans (Marcon et al., 2001a[132], 2003[133]), les auteurs avaient pour objectif de maximiser le taux d'occupation des salles tout en respectant les heures d'ouverture régulières. Ils ont proposé une approche en deux étapes :

- 1) Une phase de planification statique dans laquelle l'outil de planification lisse les interventions sur les heures d'ouverture des salles d'opération afin de minimiser les dépassements de temps et donc le risque de non-réalisation.
- 2) Une étape dynamique, l'outil estime par calcul stochastique le risque de non-réalisation des interventions, puis aide la négociation entre les différents acteurs à apporter les modifications nécessaires.

Dans (Hans et al., 2008)[38], l'objectif des auteurs était de maximiser le taux d'utilisation des salles d'opération et de minimiser les heures supplémentaires, et donc de minimiser les annulations d'opérations programmées. Ils proposent de traiter le problème de la planification (dite robuste) en utilisant plusieurs heuristiques de construction et deux recherches de voisinage (algorithme de recuit simulé et algorithme glouton). Une marge de sécurité estimée est attribuée à chacune des salles pour absorber la variabilité des durées.

Dans (Denton et al., 2010)[127], le calcul des coûts comprend un coût fixe d'ouverture des salles d'opération et un coût variable des heures supplémentaires sur une durée quotidienne déterminée. L'objectif est de minimiser le plafond des coûts résultant de la dérive cumulative de durées des interventions incertaines. Les auteurs décrivent deux types de modèles. Le premier est un programme linéaire stochastique en deux étapes avec des décisions binaires dans la première étape et un recours simple dans la deuxième étape (solution exacte robuste). Le second est un modèle mathématique avec une heuristique pour trouver la solution.

4.5.2 La programmation prédictive incluant les salles opératoires et salle de réveil.

Beaucoup de travaux ont été faits sur le problème de la planification de bloc opératoire, avec la contrainte de la disponibilité des lits de récupération.

(Fei et al., 2010[95]; Dekhici et al., 2012[134]; Huang et al., 2012[135]; Yu et al., 2013[136]) le problème d'ordonnancement est assimilé à un flow shop hybride à deux étages. Les méthodes

de résolution adoptées sont : algorithme génétique hybride, algorithme de recherche Tabou et algorithme d'optimisation par « particle swarm ».

Lee et Yih (2014) [137] déterminent les heures de début des chirurgies en salle d'opération en fonction de la disponibilité des lits dans l'unité de soins post-anesthésie (PACU) et de l'incertitude quant à la durée des tâches. Le problème est abordé comme un atelier de travail flexible avec des temps flous. Pour résoudre ce problème, ils développent un algorithme génétique qui détermine l'ordre des interventions chirurgicales et une heuristique pour déterminer les heures de début.

Dans (Guinet et Chaabane, 2003)[138], les critères sont la minimisation du temps d'attente des patients (l'écart entre la date d'hospitalisation et la date d'intervention), la minimisation des heures supplémentaires et la minimisation du makespan de la salle de réveil. Les contraintes sont : la disponibilité des ressources (les heures supplémentaires maximales autorisées, les heures d'ouverture régulières, le nombre maximal d'interventions effectuées par les chirurgiens par jour et le type d'équipement disponible dans chaque salle opératoire), les dates d'hospitalisation au plus tôt et au plus tard et la date d'intervention au plus tard. Le problème de programmation opératoire a été résolu en deux étapes. Dans un premier temps, 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)[139]. Dans un deuxième temps, en plus des salles opératoires, les auteurs ont pris en compte les lits de réveils. Ce problème a été modélisé sous forme d'un flow shop hybride à deux étages avec une contrainte sans attente, puisque les auteurs supposent que les patients opérés doivent être directement transférés à la salle de réveil.

Pour élaborer le programme opératoire, Jebali et al. (2006)[140] ont adopté une approche à deux étapes. Première étape, la planification, les actes chirurgicaux sont affectés à des salles-jours. Les auteurs ont proposé un MILP la fonction objective était exprimée en terme de coût. Deuxième étape l'ordonnancement, les auteurs ont pris en considération la disponibilité des lits de réveil. Ils ont traité ce problème comme un flow shop hybride à deux étages avec pour objectif la minimisation des heures supplémentaires. Deux stratégies différentes ont été testées. Dans la première, pas de remise en question de l'affectation des interventions aux salles, alors qu'avec la deuxième, certaines affectations peuvent être modifier. Dans (Kharraja et al.,

2003)[11], les auteurs ont assimilé le problème de l'ordonnancement à celui d'un flow shop hybride à deux étages. L'objectif considéré était la minimisation du makespan de la salle de réveil.

Les auteurs de (Fei et al., 2010)[95] ont résolu les deux sous problèmes (Advanced scheduling et Allocation scheduling) séquentiellement. Ils ont proposé un modèle mathématique en nombres entiers avec multi-objectifs (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 », basés sur la génération de colonnes. Le sous problème Allocation scheduling a été modélisé comme celui d'un flow shop hybride à deux étages avec comme objectif la minimisation du makespan des salles d'opérations et de la salle de réveil. Le flow shop hybride proposé est résolu par un algorithme hybride génétique-Tabou.

4.5.3 Programmation prédictive incluant les ressources de transport du patient (brancardiers).

Dans (Chaabane et al., 2004)[10], les auteurs prennent en compte les ressources de transport du patient (les brancardiers). Le bloc est assimilé à un flow shop hybride à 3 étages avec contraintes de précédences. Les auteurs ont comparé plusieurs règles d'ordonnancement et ont déduit que « Nawaz, Enscore et Ham associé à l'indice de Palmer (Framinan, J. M)[141] » et « Last Busy Machine » donnent les meilleures solutions.

Dans (Saadani, et al, 2006)[29] les auteurs considérées dans leurs travaux : le brancardage aller, les salles d'opérations, 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 appliqué avec les règles NEH (Nawaz, nscore et Ham) et LBM

Les auteurs de (Perdomo et al., 2006)[142] 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 dans sa chambre. Les auteurs tiennent également compte du nettoyage de la salle d'opération après la procédure. Le réveil est prévu dans les salles d'opération si le transfert dans 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 les délais d'exécution des différentes étapes du parcours du patient. Quatre ans plus tard, les mêmes auteurs assimilent le problème à un flow shop hybride à 4 étapes et le résolvent en utilisant la relaxation lagrangienne (Augusto et al., 2010)[43].

4.5.4 Programmation prédictive incluant l'USI.

Les programmes opératoires sont influencés par certaines ressources hors bloc, en particulier l'USI. En effet, un patient nécessitant des soins intensifs après une chirurgie ne peut être programmé que s'il y a un lit disponible dans la salle de soins intensifs.

Dans (Kim et al., 1999[143], Seung-Chul et al., 2000 [144]; Kim et Horowitz, 2002 [144]), les auteurs focalisent leurs travaux sur la gestion des unités de soins intensifs. Dans (Kim et al., 1999)[143], les auteurs ont présenté une étude des performances d'une unité de soins intensifs au moyen d'un outil de simulation. L'unité de soins intensifs est modélisée par une file d'attente multiserveur. Les indicateurs de performance sont la probabilité qu'un patient soit accepté sans attente ou le taux de rejet. Dans (Seung-Chul et al., 2000[144], Kim et Horowitz, 2002[145]), les mêmes auteurs ont évalué cinq stratégies d'affectation de lits en réanimation. Le but de leur étude est de minimiser le nombre d'opérations électives annulées en raison du manque de lits dans l'USI. Les auteurs proposent dans leur modèle, concernant les variables aléatoire d'arrivée des patients en USI, les temps de services pour les patients non électifs et les temps de services des patients électifs, les lois de distribution de probabilité que ces variables suivent. La réservation de lits dans l'unité de soins intensifs pour les opérations électives réduirait d'une manière significative le nombre d'interventions annulées. En résultat, Les auteurs recommandent de réserver un nombre, estimé par calcul, de lits pour la prise en charge de patients électifs.

Les auteurs de (Kharraja et al., 2006)[30] ont envisagé un flow shop à trois étages pour l'élaboration du programme opératoire. Outre les salles d'opération et le service de post-intervention (réveil), le troisième étage est l'unité des soins intensifs. L'objectif était de réduire l'écart, pour l'ensemble de chirurgiens, entre l'offre et la demande hebdomadaire de lits en soins intensifs pour les patients opérés.

4.5.5 Programmation prédictive incluant autres ressources.

Pour le développement du programme opératoire, d'autres ressources humaines et matérielles ont été prises en compte. Dans (Smolski et al., 2002[146], Marcon et al., 2003[133]), les auteurs tentent de déterminer la capacité de ressources telles que des lits de réveil et des brancardiers, en utilisant une simulation d'événements discrets. (Hsu, et al., 2003)[147], Dans un contexte de chirurgie ambulatoire, les auteurs ont modélisé le problème de la planification par celui d'un flow shop en deux étapes avec une contrainte sans attente entre les deux étages. Les salles d'opération sont le premier étage avec les chirurgiens comme ressource principale. Le deuxième étage représente l'ensemble des lits de récupération, les infirmières constituant la principale ressource. Deux objectifs sont envisagés : minimiser makespan et le nombre d'infirmières dans la salle de réveil. Pour résoudre ce problème, une heuristique de recherche tabou a été utilisée.

Vijayakumar, Parikh, Scott, Barnes et Gallimore (2013)[89] Examinez les ressources du problème et utilisez un modèle de dual bin-packing. Étant donné le nombre de jours et de ressources disponibles pour le calendrier, ils maximisent le nombre de chirurgies à planifier. Ils modélisent le problème en tant que MILP et développent une heuristique pour résoudre le problème sans prendre en compte la deuxième étape (récupération).

Dans Pham et Klinkert (2008)[105], chaque intervention chirurgicale est décrite comme une séquence d'activités prédéterminée avec un temps d'attente maximum autorisé entre deux activités consécutives, un ensemble de ressources étant affecté à chacune des activités. Les auteurs ont pris en compte l'unité de soins intensifs en plus des ressources des salles d'opération. Le problème est modélisé comme un (multi mode blocking job shop). Le but est de minimiser le makespan, Les auteurs développent un modèle de programmation linéaire mixte à nombres entiers (MILP).

Dans (Roland et al., 2006)[148], les auteurs considèrent deux catégories de ressources, renouvelables (chirurgiens, anesthésistes, infirmières) et non renouvelables (produits pharmaceutiques et matériel stérilisé). Le modèle mathématique proposé a pour objectif de minimiser les coûts d'ouverture des salles d'opération et de minimiser les heures supplémentaires. Dans (Roland et al., 2010)[93], les auteurs ont présenté une version modifiée du modèle 2006. Les auteurs supposent que certaines ressources humaines impliquées peuvent

quitter la chirurgie avant la fin. Dans ces travaux, une approche basée sur un algorithme génétique a été développée.

Dans (Chaabane et al., 2007)[149] les auteurs comparent les stratégies Block scheduling, Modified-block scheduling et Open scheduling. Dans leur étude, Ils prennent en compte la disponibilité du matériel spécifique, des anesthésistes et des chirurgiens, nécessaire à chaque opération. Les critères de performance considérés concernaient Le taux d'occupation, les heures supplémentaires, le nombre de salles opératoires en dépassement horaire, le taux de planification des opérations et le taux d'utilisation des plages horaires disponibles.

4.6 Une vue synthétique de la revue de littératures :

4.6.1 Décision opérationnel en ligne/hors ligne.

Dans ce chapitre, un aperçu de l'état de l'art de gestion du bloc opératoire est présenté. Nous avons mis l'accent sur le niveau de décision opérationnel, qui comprend deux catégories de contrôle "hors ligne" et "en ligne".

Le niveau opérationnel hors ligne est traditionnellement résolu en deux étapes (Magerlein et Martin, 1978)[16]:la première étape (appelée "advance scheduling") implique la détermination de l'OR-jour pour chaque intervention tandis que dans la deuxième étape (appelée "allocation scheduling"), un ordonnancement séquencé des chirurgies pour chaque salle d'opération au cours de chaque jour de l'horizon de planification est établie.

Le *niveau opérationnel en ligne* implique des mécanismes de contrôle pour surveiller le processus et réagir à des événements imprévus qui ne peuvent être anticipés (Hans et al., 2012)[85], tels que des différences significatives entre la durée programmée et la durée réelle des chirurgies (Min et Yih, 2010)[90], ou la disponibilité des ressources réservées aux arrivées incertaines (voir par exemple Lamiri et al., 2009). Les chirurgies d'urgence ne peuvent pas être programmées à l'avance, car elles peuvent arriver à n'importe quel moment de la journée. Cependant, les patients doivent être assistés rapidement. Pour remédier à ce type d'incertitude, (Erdem, Qu et Shi, 2012)[150] ont formulé un modèle MILP et un algorithme génétique permettant de reprogrammer les chirurgies électives déjà au planning en cours. Le modèle

proposé minimise le coût du report des interventions chirurgicales, des heures supplémentaires et du coût du rejet d'une patiente en urgence en la transférant vers un autre hôpital.

4.6.2 Littérature sur la planification et/ou l'ordonnancement.

Certains travaux ont traité uniquement le problème de planification (Ozkarahan, 1995[151], 2000[84]; Gerchak, et al., 1996[152]; Marcon, et al., 2001a[132]; Lovejoy et Li, 2002[153]; Guinet et Chaabane, 2003[138]; Kuo et al., 2003[154]; Ogulata et Erol, 2003[18]; Fei et al., 2005[155]).

D'autres ont abordé uniquement le problème d'ordonnancement (Dexter et al., 1999[98], 2002[156]; Dexter et al., 1999[98]; Fei et al., 2004[157]).

Finalement, nous retrouvons des auteurs ayant résolu les deux problèmes d'une manière séquentielle ou simultanément (Chaabane, 2004[10]; Jebali, 2004[15]; Aïda Jebali et al., 2006[140]; Velásquez et Melo, 2005 [158]; Beliën et al., 2008[159]; Roland et al., 2010[93]; Marques et al., 2012[160]; Marques, et al., 2014[103]).

4.6.3 Les objectifs ou critères d'optimisation.

Dans toute la littérature examinée, nous avons noté une multitude d'objectifs choisis lors de l'élaboration des programmes opératoires.

Certains tentent de minimiser les coûts d'exploitation (Dexter et al., 2002[156]; Lovejoy et Li, 2002[153]; Dexter et Ledolter, 2003[161]; Dexter et al., 2005 [162]; Bruni et al., 2015[124]). D'autres tentent de maximiser l'utilisation des ressources (Dexter, 2000 [163]; Guinet et Chaabane, 2003[138]; Marcon et al., 2003[133]; Sciomachen et al., 2005[164]; Denton et al., 2007 [5]; Marcon et Dexter, 2006[165]; Fei et al., 2008[82]; Hans et al., 2008[38]; Pham et Klinkert, 2008[105]; Bouguerra et al., 2015[166]).

D'autres essayent d'équilibrer la charge répartie entre :

- Les salles opératoires ou groupes de chirurgiens (Marcon et al., 2003[133]; Ogulata et Erol, 2003[18]; Beli et Demeulemeester, 2006[167])

- Les services de soins (Beliën et Demeulemeester, 2007[80]; Santibáñez et al., 2007[168]; Van Oostrum et al., 2008[40])
- Les salles de réveil (Beliën et Demeulemeester, 2006[167]; Marcon et Dexter, 2006[165]).

Certains auteurs essaient de maximiser la satisfaction des patients et/ou des chirurgiens en minimisant le temps d'attente ou les heures supplémentaires (Arenas et al., 2002[169]; Everett, 2002[170]; Testi et al., 2007[78]; Rachuba et Werners, 2014[128]). Les préférences de certaines ressources humaines sont prises en considération dans (Ozkarahan, 2000[84]; Krempels et Panchenko, 2006[171]; Velásquez et Melo, 2005[158]; Tan et al., 2007[172]).

Wullink et al. (2007)[173] ont eu recours à la simulation pour évaluer le temps réservé aux chirurgies d'urgence. Ils évaluent deux méthodologies traditionnelles : (a) concentrer toutes les capacités de réserve dans des salles opératoires dédiées exclusivement à la chirurgie d'urgence et (b) réserver de manière uniforme la capacité de tous les salles réservées à la chirurgie programmée. Les mesures de performance sont le temps d'attente, les heures supplémentaires et l'utilisation des blocs opératoires. Ils concluent que la deuxième approche est la plus efficace.

Van Essen, Hans, Hurink et Oversberg (2012)[174] étudient comment minimiser le temps d'attente pour une intervention chirurgicale d'urgence, pour laquelle ils introduisent deux nouveaux concepts: le " break-in-moment " (BIM) qui correspond au moment exact où une chirurgie d'urgence peut être effectuée après la conclusion d'une chirurgie élective et le « break-in-interval » (BII), défini comme étant l'intervalle entre deux BIM consécutifs. Ce qu'ils recherchent, c'est une distribution uniforme des BIM tout au long de la journée, pour laquelle ils minimisent le plafond (maximum) de BII. Les auteurs supposent que les chirurgies sont programmées sans temps mort entre les deux.

D'autres auteurs considèrent des critères multi-objectifs, (Cardoen et al., 2009[87]; Cardoen, et al., 2010[74]; Conforti, et al., 2010[131]; Cappanera, et al., 2017[126]; Guido et Conforti, 2017[175]).

4.6.4 Les méthodologies et les outils de résolution.

Différentes méthodes de résolution ont été mises en œuvre pour la construction des programmes opératoires. Nous distinguons :

- La programmation mathématique : (Dexter et Traub, 2002[176]; Jebali, et al., 2006[140]; Beliën et Demeulemeester, 2007[80]; Pham et Klinkert, 2008[105]). Des approches de goal programming pour les problèmes multi-objectifs ont été utilisées (Ozkarahan, 2000a[84]; Blake et Donald, 2002[177]; Ogulata et Erol, 2003[18]). Nous distinguons aussi les résolutions du problème exacte par relaxation lagrangienne (Perdomo, et al., 2006[142]; Augusto, et al., 2010[178]).
- Les heuristiques : face à la complexité du problème et la difficulté de faire converger rapidement la résolution des problèmes de grandes tailles avec les méthodes exactes, certains auteurs proposent plutôt des heuristiques nettement plus rapides avec des résultats très acceptables. Nous distinguons les heuristiques constructives (Guinet et Chaabane, 2003[179]; Liu et al., 2011[99]) et d'amélioration (Marcon et al., 2003[133]; Hans et al., 2008[38])
- Les méta-heuristiques : recuit simulé (Beliën et Demeulemeester, 2007[80]), génération de colonnes (Fei et al., 2004[157]; Fei et al., 2008[82]), algorithmes génétiques seuls (Roland et al., 2006[148]; Marques et al., 2014[103]; Guido et Conforti, 2017[175]), ou combinés avec une autre méthode (Fei et Meskens, 2006[180]; Fei et al., 2008[82]; Amin-Naseri et Afshari, 2012[181]; Guido et Conforti, 2017[175]).
- La simulation avec événements discrets qui est utilisée pour le dimensionnement des ressources. (Jun, et al., 1999[182]; Everett, 2002[170]; Harper, 2002[183]; Sciomachen et al., 2005[164]; Vanberkel et Blake, 2007[184]; M'Hallah et Al-Roomi, 2014[102]).

4.6.5 Les ressources humaines et matérielles

L'élaboration d'un programme opérationnel est un processus complexe, chaque cas de programmation opératoire étant adapté à ses spécificités et à un cadre particulier qui impose différentes contraintes, variables de décision et hypothèses de travail. Cette partie concernant les ressources prises en compte par les auteurs sera résumée dans un tableau. Cette synthèse nous permet de conclure :

- ✓ Pratiquement tous les auteurs considèrent que les chirurgiens et les salles d'opération sont les principales ressources à prendre en compte dans la programmation opératoire.
- ✓ La plupart des travaux prennent en compte la disponibilité des chirurgiens, mais très peu sont ceux qui rentrent dans les détails de leur disponibilité horaire.
- ✓ Les autres ressources (humaines et matérielles) impliquées dans le processus opératoire (brancardiers, lits de récupération, postes d'anesthésie, infirmières, etc.) influencent fortement la mise en œuvre du programme opératoire. Mais les auteurs considèrent souvent un sous-ensemble de ces ressources. Personne ne prend le risque de considérer toutes ces ressources à la fois.

4.7 Conclusions

Le problème de la planification du bloc opératoire sous des considérations déterministes et stochastiques, ainsi que le problème de planification et d'ordonnancement intégrés du programme opératoire ont été analysés. Après avoir résumé l'analyse de la littérature, nous concluons que :

- Il n'existe ni moyens ni critères permettant d'analyser et d'évaluer la performance des approches ou méthodes de résolution. Par conséquent, une comparaison et une confrontation des résultats (benchmark), pratique courante dans d'autres sujets de recherche (Taillard, 1993[185]). ; Vallada et al., 2015)[186], n'est pas possible à partir des données disponibles.
- Le problème de planification déterministe a été analysé de manière approfondie dans la littérature. Néanmoins, nous ne voyons pas de définition "de référence" du problème ni de modèle de décision générique. Chaque auteur souligne ses points forts et concentre son argumentation et ses démonstrations sur le paramètre qui le distingue des autres.
- Les approches de planification utilisant des méthodes stochastiques sont certainement d'un grand intérêt. Cependant, à notre avis, afin de simplifier le traitement mathématique du problème, des hypothèses simplificatrices ont été formulées, de sorte que des aspects essentiels de l'adéquation des résultats aux réalités du processus ont été ignorés :
 - La stratégie de planification en "block scheduling" est la seule stratégie de gestion utilisée dans le problème de planification stochastique pour la gestion des ressources chirurgicales. Cependant, cette stratégie de planification, dans sa forme stricte, constitue un cas particulier beaucoup moins souple que toutes les autres, qui sont alors utilisées plus fréquemment.
 - Sur le terrain, il est courant que le décideur attribue à chaque chirurgien (ou à son équipe) un ensemble de chirurgies à effectuer pendant la période de planification, en fonction de ses compétences, de sa disponibilité, etc. Les chirurgiens et leur disponibilité ne sont pas pris en compte dans les modèles de décision stochastiques

existants, pourtant leur disponibilité devrait être incluse dans le problème étudié (Fei, Meskens et Chu, 2010[95], Jebali et al., 2006[140]).

- Dans ces approches, les contraintes temporelles ne sont guère prises en compte pour les patients. Par exemple, chaque patient inscrit au programme opératoire doit être intervenu au plus tard à une date limite (exprimée en jours). Ce laps de temps dépend du degré d'urgence défini pour le patient par les services de santé avec un ensemble de critères cliniques et sociaux explicites (Valente et al., 2009)[187]. Ce paramètre n'apparaît nulle part dans ces modèles.
- Le problème de la planification et d'ordonnancement intégrés a été résolu et correctement analysé dans la littérature. Cependant, les approches présentées négligent les aspects importants suivants du problème:
- Seules les équipes avec un seul chirurgien sont considérées dans l'approche planification et ordonnancement intégrés. Cependant, 90% des chirurgies sont effectuées par une équipe chirurgicale comprenant plus d'un chirurgien, le cas le plus répandu étant les équipes avec deux chirurgiens.
- L'influence de l'expérience individuelle du chirurgien assistant sur la durée de la chirurgie est très grande; Ce niveau d'expérience introduit des variations allant jusqu'à 30% (Bridges et Diamond, 1999)[114]. Ces données ne sont prises en compte nulle part dans les modèles de la littérature existante.
- La plupart des références bibliographiques supposent que la durée de l'intervention est une variable discrète divisée en unités de temps: 10, 15 ou 30 minutes (Augusto et al., 2010[178], Ghazalbash et al., 2012[100], Marques et al. 2012[160]). Cependant, les durées d'opération ne sont pas nécessairement multiples de ces unités de temps. Il est plus correct d'utiliser une valeur de variable continue pour la durée de l'intervention (Pham et Klinkert, 2008[105], Zhao et Li, 2014[106]).

L'Object de la thèse est le problème de la gestion du bloc opératoire tout au long du processus opératoire, y compris les phases préopératoire, peropératoire et postopératoire. Compte tenu de la complexité et des exigences de calcul élevées des modèles de décision traditionnels et de leur

manque de prise en charge de la totalité des paramètres et des contraintes critiques. Compte tenu d'absence de réactivité de ces méthodes pour faire face à diverses perturbations fréquentes mettant en péril la validité des plannings et le déroulement du processus opératoire.

Nous proposons de résoudre les problèmes de gestion du bloc opératoire, par une approche bien connue et qui a fait ses preuves dans d'autres domaines mais qui est tout à fait nouvelle dans le domaine du bloc opératoire, l'intelligence artificielle distribuée dans un système multi-agents coopératif. Une méthode basée sur la négociation entre tous les agents représentant les acteurs réels du bloc opératoire. Donc, peu ou presque pas de calcul, les décisions sont prises unitairement et chaque décision unitaire est la conclusion d'un jugement logique prenant en compte toutes les contraintes et le contexte global du processus.

[illegible]

[illegible]

	Type of Problem			Medical staf			Ressource Type				
	scheduling	rescheduling	planning	surgeons	nurses	anesthesiologists	recovery beds	ICU	equipment	instruments	others
Addis, Carello, Grosso, and Tànfani (2015)											
Augusto, Xie, and Perdomo (2010)											
Cardoen et al. (2009a)											
Cardoen, Demeulemeester, and Beliën (2009b)											
Dekhici and Belkadi (2010)											
Dios,Molina-Pariente, Fernandez-Viagas, Andrade-Pineda, and Framinan (2015)											
Erdem et al. (2012)											
Fei, Chu, and Meskens (2009)											
Fei, Meskens, and Chu (2010)											
Guinet and Chaabane (2003)											
Guo, Wu, Li, and Rong (2014)											
Jebali et al. (2006)											
Lee and Yih (2014)											
Marcon and Dexter (2006)											
Marcon et al. (2003)											
Marques, Captivo, and Vaz Pato (2012)											
Marques, Captivo, and Vaz Pato (2014)											
Meskens et al. (2013)											
Paoletti and Marty (2007)											
Perdomo, Augusto, and Xiaolan (2006)											
Persson and Persson (2009)											
Pham and Klinkert (2008)											
Roland et al. (2006)											
Roland et al. (2010)											
van Essen, Hans, et al. (2012)											
van Essen, Hurink, Hartholt, and van den Akker (2012)											
Vijayakumar et al. (2013)											
Wullink et al. (2007)											
Guillermo Latorre-Núñez and al.(2016)											

	Stochastic aspects			Solution method								
	surgery duration	emergency surgeries	surgery cancellations	Mathematical programming model	CP	GA	other heuristics	metaheuristics	simulation	Lagrangian relaxation	Dynamic programming	Branch-and-price
Addis, Carello, Grosso, and Tànfani (2015)												
Augusto, Xie, and Perdomo (2010)												
Cardoen et al. (2009a)												
Cardoen, Demeulemeester, and Beliën (2009b)												
Dekhici and Belkadi (2010)												
Dios,Molina-Pariente, Fernandez-Viagas, Andrade-Pineda, and Framinan (2015)												
Erdem et al. (2012)												
Fei, Chu, and Meskens (2009)												
Fei, Meskens, and Chu (2010)												
Guinet and Chaabane (2003)												
Guo, Wu, Li, and Rong (2014)												
Jebali et al. (2006)												
Lee and Yih (2014)												
Marcon and Dexter (2006)												
Marcon et al. (2003)												
Marques, Captivo, and Vaz Pato (2012)												
Marques, Captivo, and Vaz Pato (2014)												
Meskens et al. (2013)												
Paoletti and Marty (2007)												
Perdomo, Augusto, and Xiaolan (2006)												
Persson and Persson (2009)												
Pham and Klinkert (2008)												
Roland et al. (2006)												
Roland et al. (2010)												
van Essen, Hans, et al. (2012)												
van Essen, Hurink, Hartholt, and van den Akker (2012)												
Vijayakumar et al. (2013)												
Wullink et al. (2007)												
Guillermo Latorre-Núñez and al.(2016)												

	Criteria									
	makespan	total completion time	overtime	number of beds	start time	cost	OR utilization	opening OR	idle time	Aggregation of criteria
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Addis, Carello, Grosso, and Tànfani (2015)										
Augusto, Xie, and Perdomo (2010)										
Cardoen et al. (2009a)										
Cardoen, Demeulemeester and Beliën (2009b)										
Dekhici and Belkadi (2010)										
Dios,Molina-Pariente, Fernandez-Viagas, Andrade-Pineda, and Framinan (2015)										
Erdem et al. (2012)										
Fei, Chu, and Meskens (2009)										
Fei, Meskens, and Chu (2010)										
Guinet and Chaabane (2003)										
Guo, Wu, Li, and Rong (2014)										
Jebali et al. (2006)										
Lee and Yih (2014)										
Marcon and Dexter (2006)										
Marcon et al. (2003)										
Marques, Captivo, and Vaz Pato (2012)										
Marques, Captivo, and Vaz Pato (2014)										
Meskens et al. (2013)										
Paoletti and Marty (2007)										
Perdomo, Augusto, and Xiaolan (2006)										
Persson and Persson (2009)										
Pham and Klinkert (2008)										
Roland et al. (2006)										
Roland et al. (2010)										
van Essen, Hans, et al. (2012)										
van Essen, Hurink, Hartholt, and van den Akker (2012)										
Vijayakumar et al. (2013)										
Wullink et al. (2007)										
Guillermo Latorre-Núñez and al.(2016)										

Chapitre 3

Chapitre 3 : MAS pour optimiser le processus des blocs opératoires hospitaliers.

De nouvelles stratégies de modélisation des blocs opératoires deviennent essentielles pour leur permettre de faire un saut significatif en termes d'efficacité et de réactivité. L'utilisation de modèles d'intelligence artificielle distribuée issus du domaine de l'ingénierie industrielle constitue l'approche appropriée pour atteindre cet objectif. Bien qu'il ne s'agisse plus de produits et de machines, mais d'interventions et de chirurgiens, la gestion reste très similaire. Ce chapitre présente un état de l'art sur le paradigme multi-agents, les méthodologies, l'organisation et les architectures de contrôle, le processus de développement d'applications et les plateformes de développement. Puis, nous présentons la planification coopérative dans les systèmes multi-agents. Nous détaillons ensuite la structure du système multi-agents modélisant le bloc opératoire.

5 Systèmes Multi-Agents

Les systèmes multi-agents constituent un moyen émergent de concevoir des systèmes informatiques pour le contrôle de processus complexes. Le domaine d'applications concerné par le SMA est en pleine expansion, ils sont utilisés dans une variété d'applications de plus en plus diversifiées. Dans cette section, nous présentons les systèmes multi-agents, des systèmes distribués composés d'entités informatiques intelligentes et autonomes qui interagissent les unes avec les autres pour accomplir une tâche. Les systèmes multi-agents proviennent du domaine de l'intelligence artificielle distribuée (IAD), actuellement en plein essor, pour le contrôle de processus.

5.1 Pertinence de MAS pour la modélisation du bloc opératoire.

Dans la littérature récente, de nombreux travaux ont été consacrés à la création d'applications de gestion pour les systèmes distribués et à une meilleure compréhension des problèmes et des exigences qui leur sont associés[188]. Ces systèmes se différencient par la connaissance d'aspects techniques spécifiques, tels que le contrôle décentralisé, l'auto-organisation, l'adaptation et l'évolutivité. La technologie de contrôle MAS de ces systèmes se distingue par la vertu de réactivité rapide par rapport aux technologies de contrôle conventionnelles.

Les blocs opératoires sont des systèmes dynamiques complexes. Les MASs constituent un moyen pratique et convenable pour modéliser, contrôler, piloter efficacement leur processus. Les avantages de MAS pour cette application, proviennent du fait que les salles d'opération sont réparties de manière inhérente dans le bloc, que chaque salle a ses propres ressources et sa propre planification proactive, que les équipes chirurgicales ont des capacités sociales et que les ressources humaines et matérielles sont en quantité limitée.

Tout comme le bloc opératoire avec ses salles distribuées, interdépendant par les ressources humaines et matérielles communes et par le partage des tâches (les interventions chirurgicales), le MAS utilisé pour modéliser le processus réel, peut être distribué par conception avec des agents modélisant des identités physiques ou de la connaissance ou bien des interactions aux seins du système réel.

Jusque récemment, le MAS était peu utilisé dans des applications des systèmes de santé, et à notre connaissance MAS n'a jamais été utilisé pour contrôler le processus du bloc opératoire. Cependant, Nous citons la thèse d'Amani Daknou en 2011[189] « Architecture distribuée à base d'agents pour optimiser la prise en charge des patients dans les services d'urgence en milieu hospitalier » et la thèse de Noura Ben Hajji en 2017 [190] « Système multi-agents de pilotage réactif des parcours patients au sein des systèmes hospitaliers ».

5.2 Concepts Agents et systèmes multi-agents

Dans les systèmes multi-agents de plus en plus utilisés par les chercheurs et les industriels, la notion d'agent est une extension de la notion d'objet bien connue par les informaticiens, la modélisation à base d'agents autonomes permet de simuler des systèmes complexes, distribués, ouverts et adaptables.

Un agent est une entité logicielle (ou matérielle) située dans un environnement et capable de réagir de manière autonome aux évolutions de cet environnement. Un agent est conçu et programmé pour atteindre ses objectifs dans le contexte de son environnement. L'environnement peut être physique (un bloc opératoire par exemple) ou un espace informatique (une base de donnée, par exemple) [191] and [192] *«on appelle agent une entité réelle ou abstraite qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui, dans un univers multiagent, peut communiquer avec d'autres agents et dont le comportement est la conséquence de ces observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents»* [Ferber, 95]. Il existe deux considérations dans la littérature du paradigme de l'agent. Dans le premier, un agent correspond à une entité physique du monde réel [193], dans le second, les agents sont des entités représentant des éléments qui ne font pas exclusivement partie du monde physique, mais qui permettront une agentification du problème [194], [195].

Les propriétés suivantes sont communément reconnues pour un agent :

Autonomie :

L'autonomie différencie l'agent d'un objet. Un agent peut éventuellement agir sans aucune intervention extérieure d'un humain ou autre agent.

Réactivité :

La réactivité d'un agent consiste en sa capacité à adapter son comportement en fonction de l'évolution de son environnement.

Proactivité :

Un agent ne se limite pas à être réactif ; il peut prendre des initiatives pour atteindre les objectifs qui lui sont assignés.

Sociabilité :

Un agent est en mesure d'interagir socialement avec d'autres agents dans le cadre d'une organisation sociale.

Les agents présentant différentes propriétés, ce qui leur confère un degré d'autonomie avec différents degrés d'intelligence. Trois types de modèles d'agents se distinguent [196] :

- Les agents réactifs ne présentent que des réactions simples suite à excitation (stimuli). Ils ne possèdent pas de comportement individuel intelligent, mais le comportement qui émerge de leurs interactions peut être "intelligent"[197]. Les agents réactifs ont la capacité de résoudre des problèmes complexes par la modélisation du système global plutôt que la modélisation d'un individu [198]. La simulation constitue un domaine privilégié pour leur utilisation[199].
- Les agents cognitifs disposent des capacités étendues d'intelligence et peuvent utiliser leurs compétences pour effectuer des tâches qui nécessitent une prise de décision complexe résultat d'un raisonnement rationnel qui se base sur un ensemble de connaissances de leur environnement [200].
- Les agents d'apprentissage peuvent acquérir des connaissances à partir de l'expertise de l'histoire et des résultats passés. Eux aussi, ils sont indispensables à la prise de décision complexe.

Il existe des agents hybrides, chaque agent étant composé de modules cognitifs, de modules réactifs et d'un module de contrôle. Le module réactif fournit des réponses aux stimuli environnementaux. Le module cognitif fournit la planification. Ces agents hybrides fournissent une solution adéquate pour la modélisation de systèmes complexes avec un environnement dynamique [201] [202].

Les MAS sont conçus, implémentés et utilisés pour modéliser des systèmes physiques distribués. (MAS) sont à la base d'un modèle, relevant de l'intelligence artificielle distribuée, de contrôle des systèmes pouvant être décomposés en entités individuelles en interaction. Les

systèmes multi-agents reposent sur les concepts d'agents, d'organisation d'agents, d'interaction entre les agents et de la communication entre agents [203]. Des définitions formelles des MAS ont été proposées par Wooldridge et Weiss [204] et Ferber [205]. La définition suivante donne un aperçu simple du concept de MAS: *“a MAS is a system composed of a collection of interacting entities called agents, evolving in an environment where they can autonomously perceive and act to satisfy their needs and objectives”*. L'environnement d'un agent peut être défini en tant qu'entités et ressources externes avec lesquelles le serveur MAS peut interagir. En résumé, un système multi-agents est un système composé d'un ensemble d'agents, situés dans un environnement donné et qui interagissent entre eux pour réaliser des objectifs donnés.

Sur la base de cette définition, un groupe dans lequel les agents sont des personnes qui communiquent entre eux, coopèrent, se font concurrence, dans un but donné est un MAS ; Un réseau d'ordinateurs dans lequel les agents sont des algorithmes logiciels, qui interagissent en échangeant des messages et des données, pour résoudre un problème ensemble est un MAS ; Des robots d'une chaîne de production, qui coopèrent et se coordonnent pour effectuer une tâche commune est un MAS. Enfin, un bloc opératoire dans lequel les ressources humaines et matérielles (salles d'opération, salle de réveil, chirurgiens, anesthésistes, etc.) sont modélisées par des agents qui interagissent les uns avec les autres pour servir les patients, en leur offrant le meilleur contrôle du processus opératoire tout en respectant les contraintes, est un MAS.

5.3 FIPA Specifications

Afin d'exploiter pleinement le potentiel des technologies à base d'agents et d'en généraliser le champ d'application, les fonctionnalités des agents prenant en charge les normes doivent être disponibles, ainsi que les structures-cadres appropriées pour le développement du système d'agents. Plusieurs structures de recherche (telles que la **F**ondation pour les **A**gents **P**hysiques et **I**ntelligents (FIPA) [206]) travaillent sur la normalisation des technologies des agents. D'autres travaillent sur les structures-cadres de développement pour la conception d'applications basées sur des systèmes d'agents tels que JADE (Java Agent Development) [207].

FIPA est une association internationale à but non lucratif d'entreprises et d'organisations partageant l'effort de production de spécifications génériques des technologies des agents. La FIPA est considérée non seulement pour une technologie pour une application particulière, mais surtout pour une technologie générique pour différents domaines d'application. FIPA est

considérée non seulement pour des technologies indépendantes, mais pour un ensemble de technologies de base pouvant être intégrées par les développeurs pour créer des systèmes complexes avec un degré élevé d'interopérabilité. Le FIPA repose sur une hypothèse principale : seul le comportement externe des composants système doit être spécifié, laissant aux développeurs d'agents les détails de la mise en œuvre et les architectures internes [206].

FIPA prend en charge les formes courantes de conversation entre agents via la spécification de protocoles d'interaction, qui sont des modèles de messages échangés par deux agents ou plus. Ces protocoles incluent de simples protocoles de requête, au bien célèbre **Contract Net Protocol** (CNP) de négociation et les « English ou Dutch » enchères. 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 les uns avec les autres. Dans la section suivante, certains de ces comportements sont expliqués.

En outre, les langues de communication d'agent (ACL) sont considérées comme l'une des spécifications les plus importantes et essentielles pour MAS. La communication d'agent à agent est basée 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. La norme ne prévoit aucun mécanisme ni aucun moyen spécifique pour le transport de messages. Étant donné que différents agents peuvent fonctionner sur différentes plates-formes et utiliser différentes technologies de réseau de transmission de données, FIPA ne spécifie que la forme textuelle et le codage des messages échangés entre plates-formes. On suppose que les agents disposent de divers moyens techniques pour transmettre le message, mais cela ne fait pas partie du MAS au niveau du contrôle [208] .

JADE est une plate-forme logicielle permettant de développer des applications basées sur des agents, conformément aux spécifications FIPA, pour des systèmes multi-agents intelligents interopérables. L'objectif est de simplifier le développement d'applications tout en garantissant la conformité aux normes grâce à un ensemble complet de services et d'agents système. JADE peut alors être considéré comme un middleware d'agent implémentant une plate-forme d'agent ou une structure-cadre de développement. JADE traite de tous les aspects qui ne sont pas propres aux éléments internes de l'agent et qui sont indépendants des applications, tels que le transport de l'information, le codage et l'analyse des messages ou le cycle de vie de l'agent. Le tableau 3 récapitule certaines des spécifications FIPA, JADE et ACL mentionnées plus haut

dans ce chapitre. Ils sont considérés comme les normes / applications les plus couramment utilisées pour la conception, le développement et la communication des agents.

Tableau 3:Some of the most common standards/applications used in agent-based systems

Standards/Application	Task in Agent-Based Systems	Specifications
FIPA	Standard for design	Ontology design, high flexibility, and capability of using three applications : MATLAB , JADE and RT-Lab
JADE	Development environments to build system platforms	Using Java programming code with extra JADE libraries
ACL	Transfer light weight encoded messages between agent	Transfer Java messages but it also converts another message types to Java ACL Message

5.4 Communication, Langages et Ontologies

Concevoir un MAS nécessite de formaliser la manière dont les agents se coordonnent, coopèrent, prennent des décisions, etc., ce qui implique que les agents et les MAS doivent au moins adopter des langues communes. Des langages tels que ACL (langage de communication d'agent) et KQML (langage de requête et de manipulation de connaissances) ont été créés pour être utilisés dans le développement de MAS, afin que les agents puissent utiliser un langage et un vocabulaire communs pour communiquer. Lorsque deux agents communiquent, leur objectif est d'échanger des informations ce qui nécessite qu'ils se comprennent. La communication se fait par envoi de messages ou de signaux (stimuli). Alors, quel que soit la forme de communication, l'obligation réside dans le fait pour un agent de pouvoir comprendre les autres

agents. À cette fin, la Fondation pour les agents physiques intelligents (FIPA) a défini certaines spécifications et normes relatives à l'utilisation des MAS [209]. ACL est une spécification FIPA [210] , il est généralement le plus utilisé. Chaque message se voit affecter plusieurs attributs, notamment 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 contient les paramètres suivants :

- un paramètre définissant 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: Structure d'un message dans la norme FIPA 00037.

Paramètre du message	Rôle du paramètre
Sender	Identifiant de l'agent émetteur
Receiver	Adresse du ou des agents destinataires du message
Reply-to	Identifiant de l'agent auquel doit être envoyé une réponse
performative	Performatif de l'acte de communication
Content	Contenue de l'acte de communication
Language	Langage utilisé pour décrire le contenu
Encoding	L'encodage de caractère utilisé
Ontology	Ontologie utilisé pour définir les concepts du contenu
Conversation-id	Identifiant de la conversation
Protocol	Identifiant du protocole utilisé pour la conversation
Reply-with	Numéro du message dans la conversation
In-reply-to	Numéro du message auquel celui-ci répond
Reply-by	Le délai de réponse pour ce message

La figure 2.3 montre la structure d'un exemple de message ACL, envoyé par agent1 à agent2. Le paramètre performatif est le seul paramètre obligatoire de la spécification, mais d'autres doivent également être inclus si nécessaire pour faciliter le tri des messages. Le langage sémantique FIPA (FIPA-SL) est une spécification de langage de contenu avec une syntaxe et une sémantique spécifiques pour une utilisation avec ACL, qui est implémentée dans plusieurs outils de développement MAS [210] .

Tableau 5:Exemple de message ACL, à l'aide de l'ontologie par défaut.

```
(REQUEST
:sender ( agent-identifieur :name agent1@platform:1099/JADE )
:receiver (set ( agent-identifieur :name agent2@platform:1099/JADE ) )
:content "Hello! How are you?"
:language FIPA-SL0 )
```

Un message, en communication directe, doit au moins indiquer l'agent qui reçoit le message, le contenu propositionnel et le performatif. Le tableau précédent définit les champs pour structurer les messages. Certains champs peuvent être superflus selon le contexte. La FIPA propose 22 performatifs de base avec une sémantique définie en utilisant la logique BDI de Belive-Desire-Intention [Rao et al., 95]). En pratique, les programmeurs SMA utilisent principalement les performatifs request, query-if et inform. En fait, les opérations de coordination nécessitent principalement la possibilité de déléguer des tâches (request) ou de s'informer de l'état de l'autre agent (query-if ou query-ref).

Pour les conversations complexes entre agents hétérogènes, des ontologies peuvent être nécessaires pour définir le vocabulaire utilisé par les agents dans leurs conversations. Pour les humains, utiliser un langage commun peut ne pas être suffisant. Une ontologie est une représentation formelle de la connaissance, sous la forme d'un ensemble de concepts et de relations entre ces concepts. Comme décrit dans Mc Arthur et al. [191]des normes spécifiant des modèles de données, telles que CIM (Common Information Model), peuvent être utilisées comme base pour la construction de telles ontologies.

5.5 Management des agents.

Les premiers documents sortis de FIPA, appelés spécifications FIPA97, spécifient les règles normatives permettant à une société d'agents de s'interagir, d'opérer et d'être gérée. La spécification décrit le modèle de référence d'une plate-forme d'agent. Il identifie les rôles de certains agents clés nécessaires à la gestion de la plateforme et spécifie le langage de contenu et l'ontologie de gestion des agents. Trois rôles de base sont identifiés dans une plate-forme d'agent : le système de gestion d'agents (AMS), le canal de communication d'agent (ACC) et le facilitateur d'annuaire (DF). AMS est un agent interne qui exerce un contrôle de supervision sur l'accès et l'utilisation d'une plate-forme d'agent. Il est responsable de l'authentification des agents résidents et du contrôle des enregistrements. ACC est un agent interne qui fournit le chemin pour le contact de base entre les agents à l'intérieur et à l'extérieur de la plate-forme. DF est un agent qui fournit un service d'annuaire des agents (pages jaunes de la plateforme d'agents). Notez qu'aucune restriction n'est imposée à la technologie réellement utilisée pour l'implémentation de la plate-forme : les plates-formes basées sur la messagerie, l'architecture basée sur CORBA (Common Object Broker Architecture) et les applications multi-thread Java peuvent toutes être des implémentations conformes FIPA.

La spécification FIPA SC00023 [211] définit deux niveaux internes de gestion, du cycle de vie et de fonctionnement des agents. Le premier niveau, appelé niveau d'agent, correspond à chaque agent lui-même, tandis que le second se rapporte à des groupes d'agents et à la manière dont ils interagissent, appelés niveau MAS. Au niveau agent, il définit le cycle de vie de l'agent, et au niveau MAS, il propose des services de gestion d'agent et un système de transport de messages. Ces services sont essentiels pour permettre au MAS de fonctionner de manière distribuée et flexible.

Le premier niveau définit comment les agents ont leur cycle de vie, de leur création à leur fin. Au cours de sa vie, un agent peut être dans cinq états possibles (Fig. 6) :

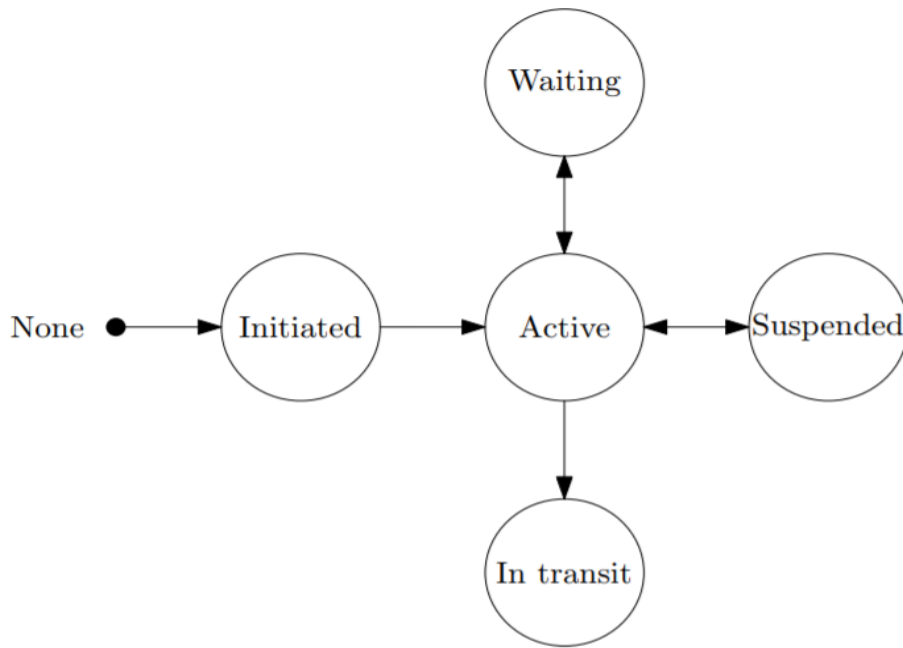


Figure 6: Cycle de vie d'un agent, basé sur FIPA [Std. SC00023K].

- 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 est l'état normal dans lequel l'agent fonctionne.
- En attente, lorsque l'agent est en (pool) attendant un événement externe et tant qu'il n'a pas été 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).

Au niveau MAS, chaque plate-forme d'agent contient les entités obligatoires répertoriées ci-dessous (AMS, DF, ACC) et au moins un agent. Une seule plate-forme peut comprendre des agents situés dans différents emplacements physiques, tels que des ordinateurs distants. Sur la plate-forme on doit démarrer par l'implémentation du modèle de référence de gestion des agents (Fig. 2.5), qui définit les entités de gestion, à savoir :

- Un facilitateur d'annuaire (**D**irectory **F**acilitator) qui fournit un service de pages jaunes aux agents, c'est-à-dire une liste d'agents avec leurs aptitudes et capacités respectives. Chaque agent

peut enregistrer ses services dans le DF, puis interroger celui-ci pour savoir qui ont un service donné (enregistré). L'implémentation d'un DF est facultative et plusieurs DF peuvent exister simultanément.

- Un système de gestion des agents le (**A**gent **M**anagement **S**ystem unique), qui supervise le point d'accès et tient 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 nom et adresse, auxquels chaque agent doit s'inscrire.

- un système de transport de messages (**M**essage **T**ransport **S**ystem), qui permet le transport de messages d'un agent à l'autre. Un **P**rotocole de **T**ransport de **M**essages (MTP) est utilisé pour transférer physiquement des messages entre agents sur des plates-formes éventuellement différentes ; tous les messages échangés entre plates-formes passent par le MTP.

- L'agent lui-même, qui communique avec d'autres agents à l'aide du langage ACL et peut avoir accès à un logiciel externe.

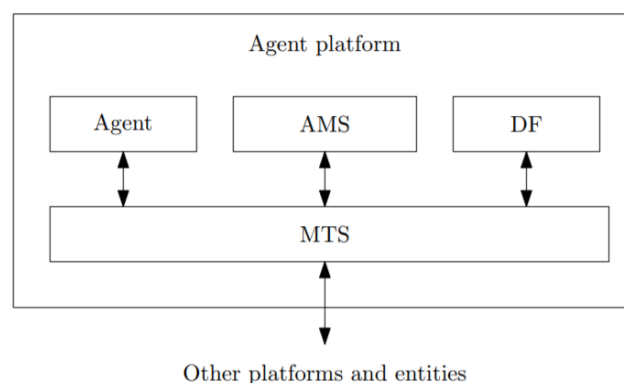


Figure 7:Modèle de référence de gestion des agents FIPA, basé sur FIPA [Std. SC00023K].

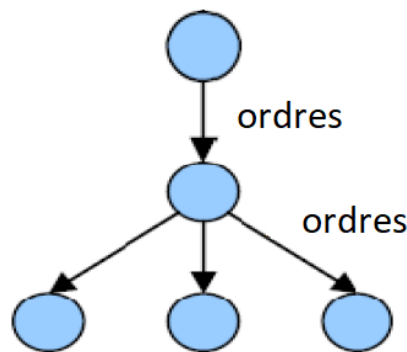
Pour permettre aux services précédents de fonctionner correctement, chaque agent se voit attribuer un identifiant d'agent (AID) unique. Chaque AID est composé de trois paramètres : un nom unique, généralement composé d'un nom local et de l'adresse AP (Agent Platform); une liste d'adresses à laquelle les messages doivent être livrés; et un résolveur, utilisé par l'AMS pour la résolution de l'adresse de transport de l'agent.

5.6 Topologies des structures d'organisation.

La collection : de rôles, de relations d'autorité, de flux de données, d'allocation de ressources et de modèles de coordination qui guident les comportements des agents ; est définie comme une

topologie organisationnelle. Les principaux types de topologie utilisées dans les MAS incluent les hiérarchies, les holarchies, les coalitions, les équipes, les congrégations, les sociétés, les fédérations, les marchés et les organisations matricielles [212] .

- Une hiérarchie est la topologie dans laquelle les agents sont organisés en une structure arborescente. Les agents situés plus haut dans l'arborescence ont une vue plus globale que les agents situés en dessous d'eux. Les agents de niveau inférieur transmettent les informations perçues localement à des agents de niveau supérieur, qui fournissent des instructions à ceux qui se trouvent en dessous d'eux.



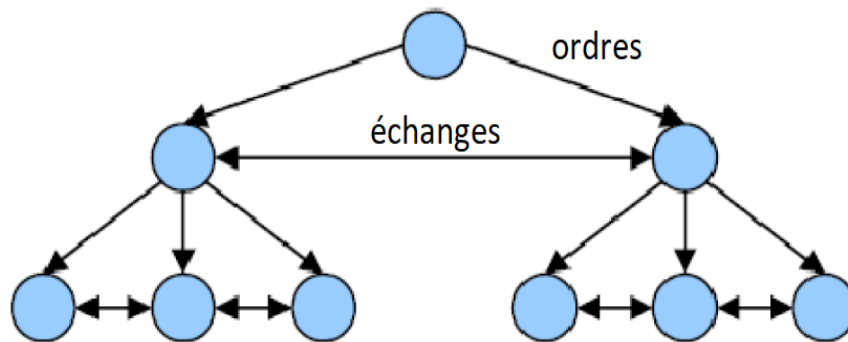
- Les holarchies sont constituées d'holons constitués de plusieurs entités et chaque holon lui-même faisant partie d'une entité plus grande.

- Les coalitions sont dynamiques et de courte durée, et émergent dès qu'un objectif doit être rempli par un sous-ensemble d'une population d'agents (coalition). Dans une coalition, les agents sont « self-interested » ils essaient de maximiser leur propre profit.

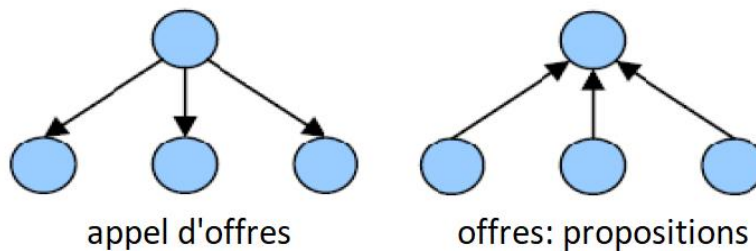
- les équipes sont de type altruiste, par opposition aux coalitions ; ils tentent de maximiser l'utilité de toute l'équipe et coordonnent leurs actions afin de remplir efficacement une tâche commune.

- Les congrégations ont une longue vie et sont constituées d'agents hétérogènes qui ont un grand intérêt à se réunir. Les Agents se rassemblent rationnellement, et cherche à maximiser leur utilité à long terme.

- Les sociétés ont une longue vie et sont ouvertes. Les agents coexistant dans une société peuvent avoir des objectifs, des niveaux de rationalité et des capacités hétérogènes, ils interagissent selon les lois sociales.



- Les fédérations sont organisées de telle sorte que certains agents délèguent une partie de leur autonomie à un seul agent représentant le groupe. Les membres du groupe interagissent uniquement avec ce délégué (également appelé facilitateur, médiateur ou courtier), qui sert d'interface entre le groupe et le monde extérieur.
- Les marchés, ou organisations basées sur les marchés, permettent aux acheteurs et aux vendeurs d'envoyer et de recevoir des offres pour un ensemble d'éléments communs, tels que des ressources ou des tâches partagées.



- Les organisations matricielles imitent la façon dont les humains s'influencent, c'est-à-dire que le comportement d'un agent ou d'un groupe d'agents peut être influencé par plusieurs centres d'autorité.

5.7 Architectures des systèmes de contrôle basés sur agents et multi-agents

La modélisation par un SMA d'un processus distribué permet un contrôle entièrement distribué en temps réel avec un degré élevé de réactivité et d'efficacité. Les communications entre agents sont programmées à la demande en fonction de l'avènement des tâches à réaliser telles que l'ajustement de la charge, ou l'ajout d'une intervention d'urgence. Les systèmes multi-agents modélisant des systèmes distribués, incluent des agents matériels ou des agents logiciels

intelligents, qui travaillent ensemble pour atteindre les objectifs globaux. Dans MAS, toutes les connaissances relatives à un élément local de la couche physique (salle opératoire), sont programmées dans l'agent qui la représente, situé dans la couche software (Room-agent), permettant ainsi aux agents de MAS, qui représentent l'ensemble de la couche physique, de contrôler par leurs interactions le processus d'un système qui est éventuellement distribué sur un plateau étendu ou sur plusieurs sites. En outre, MAS peut être doté d'une architecture de contrôle qui peut être opérationnelle en temps réel et qui lui permet d'adapter le processus aux événements de l'environnement. Le pilotage d'un processus par MAS consiste en un groupe d'agents travaillant ensemble pour optimiser et adapter les plannings du processus en prédictif ou en cours de réalisation. Le système de pilotage doit être certes flexible mais aussi efficient en ne faisant intervenir que les agents des salles dont le planning est concerné par une modification.

L'adoption d'une architecture de contrôle générale, puis les définitions des modules de gestion inclus dans cette architecture forment la colonne vertébrale du contrôle des systèmes distribués à grande échelle. Ensuite, il est nécessaire de développer des algorithmes de communication et de négociation entre agents, suffisamment efficaces et rapides pour optimiser les performances et la réactivité.

En ce qui concerne les architectures de contrôle des systèmes distribués, trois types d'architectures fonctionnelles sont généralement définis : les architectures hiérarchiques, hétérarchiques et hybrides.

L'architecture hiérarchique, est plutôt adaptée à l'établissement des plans généraux pour l'ensemble de l'activité au niveau global. Il n'y a pas de « communication directe » entre les modules de réalisations et le niveau de contrôle global. Bien que cette architecture, soit réputée pouvoir optimiser, (off line), les performances du processus, sa faisabilité et son optimalité sont loin d'être prouvées pour la planification en temps réel (in line). L'architecture de contrôle hétérarchique repose sur une autonomie locale totale (contrôle distribué), ce qui crée un environnement de contrôle dans lequel des composants autonomes coopèrent afin d'atteindre des objectifs globaux par le biais d'une prise de décision locale [213].

Dans un modèle hétérarchique distribué où chaque agent représente une ressource individuelle, chaque agent implémente individuellement ces algorithmes de contrôle local pour les ressources qu'ils représentent. Duffie dans [214] présente quelques-uns des avantages des

architectures hétérarchiques, notamment leur complexité réduite, leur flexibilité accrue et le coût de programmation réduit.

MAS convient à toutes les architectures de contrôle, il peut combiner les avantages des diverses technologies de contrôle centralisées, distribuées et hybrides.

Dans la littérature, la qualité des technologies de contrôle pour les systèmes distribués est évaluée en fonction de paramètres tels que l'évolutivité, la gestion des erreurs et la vitesse de convergence vers la solution. Aussi, une des évaluations de la qualité d'un algorithme de contrôle est la quantité et la durée des messages, échangés entre les nœuds du système, qui seront nécessaire à l'établissement de la solution optimale. Ceci est couvert par « l'interopérabilité » analysée dans la section suivante.

5.8 Interaction entre agents

Les topologies décrites définissent la manière dont les agents sont organisés, mais il reste nécessaire de définir leur interaction. Une interaction entre agents peut avoir lieu s'ils peuvent agir ou communiquer et s'il existe des situations dans lesquelles ils doivent interagir, tels qu'une coopération pour remplir une tâche commune. Les caractéristiques dynamiques des interactions impliquent que de organisations d'agents sont susceptibles d'être dynamiques, formées au fur et à mesure que de nouveaux objectifs doivent être atteints. Plusieurs critères peuvent être utilisés pour classer les interactions, notamment la nature des objectifs poursuivis par les agents, leur relation aux ressources externes et leurs compétences individuelles en ce qui concerne la tâche à accomplir :

- En règle générale, les agents sont engagés dans des tâches concurrentielles lorsque leurs objectifs sont contradictoires, alors qu'ils coopèrent et co-évoluent lorsque leurs objectifs individuels sont compatibles
- Les ressources externes incluent tous les éléments environnementaux dont les agents ont besoin pour atteindre un objectif. Des ressources limitées peuvent conduire les agents à des conflits, de telles situations conflictuelles peuvent généralement être résolues par la coordination des actions des agents.
- Le dernier critère consiste à déterminer si la tâche peut être confiée à un seul agent plutôt qu'à un groupe d'agents ou si chaque agent impliqué dans une sous-tâches, possède les compétences appropriées pour effectuer sa sous-tâche.

Pour permettre *l'interopérabilité (c'est-à-dire la capacité de plusieurs agents ou systèmes d'échanger des informations et de les utiliser)*, les interactions sont structurées et suivent des règles communes, appelées protocoles. Le protocole FIPA-Request [215] en est l'exemple de base: un agent peut formuler une requête que d'autres agents peuvent accepter ou refuser. Les interactions simples sont limitées et leurs combinaisons sont plutôt utilisées dans le cadre de protocoles d'interaction complexes tels que la sous-traitance, les enchères, le trading, le vote et le courtage.

- Le " Contract-Net-Protocole CNP " est un exemple de protocole d'interaction, défini dans la spécification FIPA SC00029 [216] Le CNP proposé par Davis et Smith est le protocole le plus utilisé pour élaborer des processus de négociation coopérative (Smith & Davis, 1981). Ce protocole de partage de tâches consiste en un ensemble d'agents formant un « contract network ». On distingue deux catégories d'agents : le gérant et les agents contractuels. Un tour typique commence par un appel à propositions envoyé par l'initiateur. Une date limite peut être définie pour limiter la durée d'attente des réponses. Les contractants (participants) peuvent ensuite soumettre des propositions (prix, délai d'exécution d'une action, etc.) ou refuser. L'initiateur évalue les propositions et sélectionne zéro, un ou plusieurs agents pour effectuer la tâche à effectuer. Les participants sélectionnés sont libres d'accepter ou de refuser cette offre.

- Les enchères : Quatre principaux types de ventes aux enchères sont couramment utilisés : English, Dutch, sealed first-price or Vickrey, et Walrasian auctions [217].

English auction: Les participants soumissionnent ouvertement les uns contre les autres, chaque offre ultérieure étant supérieure à la précédente. Un prix de réservation (le prix minimum) peut être fixé par le auctioneer. La vente aux enchères se termine si aucun participant n'est disposé à faire d'autres offres. FIPA définit une spécification pour les English auctions dans XC00031 [218].

Dans Dutch auctions, l'auctioneer commence avec un prix élevé qui est abaissé jusqu'à ce qu'un participant accepte le prix annoncé. Ce type d'enchère est également défini par FIPA dans sa spécification XC00032 [219].

Avec des enchères de premier prix scellées (sealed first-price auctions), tous les soumissionnaires soumettent leurs offres simultanément, et le gagnant est celui qui propose l'offre la plus élevée. Les soumissionnaires ne peuvent soumettre qu'une seule offre. Les enchères de Vickrey sont identiques sauf que le gagnant paie le deuxième prix soumis le plus élevé [220].

Les enchères walrasiennes permettent de faire correspondre l'offre et la demande sur un marché en concurrence parfaite. Un prix de compensation du marché est défini de manière à ce que la demande totale soit égale à la quantité de biens vendus et conduise à un équilibre général [221].

-) Négociation compétitive :

Négociation basée sur la théorie des jeux : les agents adoptent un comportement rationnel pour déterminer la stratégie optimale à utiliser pour atteindre un équilibre d'une simulation d'un jeu. (Esmaeili et al., 2009)[222].

Négociation basée sur les heuristiques : Pour pallier aux limites de la négociation rationnelle de la théorie des jeux, les agents peuvent opter pour des stratégies heuristiques approximatives (Ury et al., 1997)[223].

Négociation basée sur l'argumentation : l'argument permet à un agent de justifier sa position dans le processus de la négociation et d'influencer les positions des autres agents (Huang & Lin, 2010)[224].

- Les votes : Les interactions peuvent également se produire sous la forme de votes. Les protocoles de vote, tels que les règles de procédure de Robert [225], définissent la conduite des procédures de votes entre agents. Le vote peut être utilisé pour prendre des décisions lorsqu'il est simple (vote par oui ou non). De la même manière que les votes pendant les élections, différentes règles peuvent être adoptées pour sélectionner le (s) gagnant (s).

- Le courtage : Un autre type d'interaction spécifié par FIPA est le courtage [226]. Par exemple, un agent peut demander à un courtier de rechercher d'autres agents capables de répondre à une requête. Le courtier relayerait ensuite la réponse à l'initiateur.

Dans cette thèse, le **Contract Net Protocol** et une version de négociation coopérative un peu plus complexe dite **Simulated Trading** sont utilisés pour les applications présentées.

6 Structure-cadre de développement multi-agents

Bien qu'il soit possible de développer un MAS en partant de zéro, l'utilisation d'une plate-forme de développement dédiée (middleware) est, dans la plupart des cas, une meilleure solution. De nombreuses plateformes ont été créées au fil des ans [227] et comprennent des outils et des fonctionnalités facilitant le développement des MAS.

Les technologies basées sur les agents sont encore immatures et peu de systèmes véritablement basés sur les agents ont été réalisés [228]. En effet, les technologies basées sur les agents ne peuvent pas exploiter tout leur potentiel et ne se généraliseront pas tant que les normes favorisant l'interopérabilité des agents ne seront pas disponibles et faciles d'utilisation, ni que les structures-cadres de développement de systèmes d'agents ouvertes et adéquates ne seront opérationnelles et bien connues.

L'utilisation d'un langage de communication commun ne suffit pas pour prendre en charge facilement l'interopérabilité entre différents systèmes d'agents. Plusieurs chercheurs travaillent à la normalisation des technologies d'agent (voir par exemple les travaux de Knowledge Sharing Effort [228] , OMG [229] et FIPA [230]) et à la réalisation de cadre de développement pour la conception des systèmes d'agents (voir, par exemple, RETSINA [207]).

Parmi les nombreuses plates-formes existantes, les applications courantes les plus répandues sont sur JADE (Java Agent Development Framework), AgentBuilder, MadKit et ZEUS, enfin nous signalons NetLogo qui permet aux débutants de se familiariser avec la programmation MAS.

Dans cette thèse, JADE est préconisé comme plate-forme pour développer l'application MAS du Bloc opératoire Bloc-Scheduler conformes aux spécifications FIPA pour les systèmes multi-agents intelligents interopérables.

Bloc-scheduler est conçu en tant que système basé sur des agents combinant la prévisibilité et la robustesse des architectures de contrôle hiérarchiques centralisées avec l'agilité, la réactivité contre les perturbations et le degré élevé d'adaptabilité des architectures de contrôle hétérarchiques [231].

6.1 JADE

JADE est une plate-forme open source pour les applications basées sur les agents peer-to-peer. Son principal avantage est qu'elle dispose d'une documentation complète, avec des tutoriels, des livres et une communauté active d'utilisateurs. Il comprend également des outils graphiques intégrés prenant en charge les phases de débogage et de déploiement du développement de MAS. Entièrement compatible avec les normes et les spécifications FIPA, Comme il est entièrement implémenté dans le langage Java, il est également multiplateforme. De nombreux

plug-ins et extensions tiers sont disponibles pour des utilisations spécifiques. En raison de ces propriétés, le middleware JADE est choisi comme base pour la construction du MAS simulant le bloc opératoire.

On commence par initier une plate-forme, dans laquelle au moins le premier conteneur contenant des agents est créé. Le premier conteneur, appelé aussi le conteneur principal, contient deux agents spécialisés internes : les agents AMS et DF. L'agent AMS est celui qui crée ou détruit les autres agents, conteneurs et plates-formes. L'agent DF implémente un service de pages jaunes que les autres agents peuvent interroger pour récupérer des informations sur les services proposés par d'autres agents.

L'exécution de MAS sur JADE suit un modèle qui repose sur des comportements des agents. La notion de comportement décrit comment un agent réagit à un événement et il permet aux agents de fonctionner de manière indépendante selon le contexte. Cette fonctionnalité est rendue possible en affectant un thread Java à chaque comportement au lieu d'un seul thread par agent, chaque agent pouvant être impliqué dans plusieurs tâches en parallèle.

Trois outils graphiques permettent un débogage et une surveillance plus rapides et plus faciles :

- L'agent Introspector aide à la surveillance et au contrôle des agents en fournissant des informations sur leur cycle de vie et leurs comportements, ainsi que sur les échanges de messages ACL.
- L'agent factice (dummy) 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 intercepte les messages ACL et les affiche de la même manière que les diagrammes de séquence UML (Unified Modeling Language), ce qui est utile pour surveiller la manière dont les agents interagissent lors d'échanges de messages.

JADE étant utilisé pour la modélisation, le contrôle et le pilotage du processus du bloc opératoire, des algorithmes dédiés sont mis en œuvre pour permettre les fonctionnalités de la planification offline, de la planification dynamique, d'ajustement de la charge entre les salles et d'allocation des urgences.

Les systèmes de contrôle intelligents reposent souvent sur des algorithmes d'intelligence artificielle, tels que des algorithmes d'apprentissage, des algorithmes d'optimisation, des systèmes experts, etc.[232]. Les principaux objectifs justifiant l'utilisation de ces algorithmes

sont leur capacité à résoudre efficacement des problèmes complexes. Les problèmes à résoudre peuvent aller d'une répartition économique et humaine optimale des interventions et de la robustesse de la solution offline, au diagnostic de la situation en cours et la prise en charge des imprévus comme les urgences. La capacité des algorithmes d'intelligence artificielle à tirer parti de l'expérience et à explorer efficacement les espaces de recherche les rend particulièrement adaptés aux applications de bloc opératoire intelligent, même si leur utilisation industrielle et développement pour un large champ d'application est encore phase de décollage.

6.2 « Behaviours » des agents

L'architecture de MAS utilisée dans la modélisation des processus (bloc opératoire) comprend classiquement trois couches différentes : couche locale, couche d'intermédiaire (coordination processus) et couche globale de planification [233] , [234], [235]. Chaque agent est placé dans différentes couches en fonction de sa tâche (par exemple, l'agent de la couche coordinatrice est attribué à la couche intermédiaire et est appliqué en tant que passerelle de communication entre le modèle et le système physique [236] . Les agents situés dans la couche locale dépendent directement du contexte et coopèrent pour piloter, éventuellement en temps quasi réel, les tâches locales. De plus, les agents sont placés dans la couche de planification Globale s'ils sont programmés pour établir les planifications globales du processus. En outre, les agents intermédiaires peuvent communiquer avec tous les autres agents et les interfaces du système physique.

Dans MAS, chaque agent, en fonction des exigences de conception, est capable de comportements différents tels que le courtage, la facilitation et la mise en correspondance (brokerage, facilitating, and matchmaking) [237]

Comme le montre la figure 1.7, Le comportement du courtier consiste à gérer le processus de partage en recevant des informations des autres agents et en allouant les protocoles permettant aux agents de communiquer avec les courtiers. [238] . Agent1 en tant qu'agent courtier (BrAg) initie la communication avec tous les autres agents pour détecter la voie optimale (exemple, la moins coûteuse), À la prochaine étape, les trois autres agents proposent leurs offres. Après la décision de choix de l'agent convenable, Agent1 en informe tous les agents de sa décision.

L'agent facilitateur (FacAg) communique avec tous les agents pour établir la voie optimale. Son rôle est de détecter les agents appropriés pour exécuter une tâche déterminée. En outre, l'agent Matchmaker (MchAg) est utilisé pour établir des sous-systèmes d'agents collaboratifs.

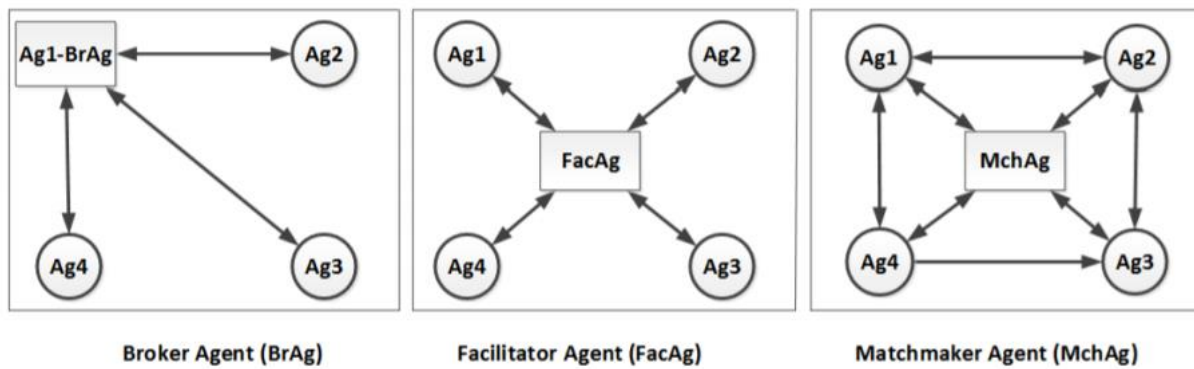


Figure 8: Communication entre agents utilisant trois behaviors différents (Broker, Facilitator, and Matchmaker)

Un agent "matchmaker" met en paire deux types d'agents de service : fournisseur et demandeur de service, afin de faire correspondre les demandes formulées des agents demandeurs aux services annoncés appropriés des agents fournisseurs enregistrés. Contrairement aux fonctionnalités du "courtier" et du "facilitateur", l'agent "matchmaker" renvoie simplement une liste classée d'agents de fournisseurs pertinents à l'agent demandeur. Par conséquent, l'agent demandeur doit contacter et négocier avec l'agent fournisseur lui-même pour obtenir les services qu'il souhaite.

Cette interaction directe entre le demandeur et les agents fournisseurs sélectionnés est effectuée indépendamment du "matchmaker". Cela évite, par exemple, (des goulots d'étranglement lors de la transmission de données) chez le "matchmaker", mais augmente la charge de communication directe entre les agents demandeur / les agents fournisseur appariés [239]. Par conséquent, un (sous-système d'agents collaboratif) est établi à l'aide de MchAg. Après ceci, Les agents individuels commencent à communiquer directement les uns avec les autres par le biais de liens établis et les données n'ont plus besoin de passer par MchAg.

En se référant à la catégorisation des technologies d'agent de surveillance en temps réel dans l'article de Brennan [240], nous constatons que le facilitateur et les MchAg sont les options les plus appropriées pour le système de ressources formé d'un assemblage d'échantillons individuels.

L'algorithme "matchmaking" est utilisé pour établir des liens entre les agents et ensuite le MchAg s'éclipse. Un agent facilitateur est des fois utile nécessaire pour assurer une communication fiable entre les agents. Il existe également un autre comportement d'agent appelée publish-subscribe, qui associe des comportements de "facilitator" et de "matchmaking".

6.3 Méthodologies / Algorithmes

Dans les sections suivantes, quelques-uns des algorithmes ou méthodologies les plus utilisés extraits de la littérature sont évoqués :

Architecture "Belief, Desire, Intention (BDI)", utilisant des algorithmes d'enchères ; Conçu pour la théorie des jeux et la simulation des bras de robots [241].

- Beliefs: current information of agents, qui reflètent les connaissances que peut avoir un agent sur l'univers auquel il appartient.
- Desires: « set long-term goals that agents want to achieve », qui représentent l'ensemble des opportunités offertes à l'agent qui sont générées à partir de ses croyances et des objectifs à plus long terme que l'agent a pu se fixer
- Intentions : “make a plan and become committed to its intention”, sont les options retenues par l'agent et qui mènent à une action.

RUP (Processus unifié) [242] est une méthode incrémentale et itérative de développement des logiciels orientés objets :

- MASE (MultiAgent Systems Engineering) : Quatre étapes composent cette méthodologie : conception du domaine, conception d'agents, conception de composantes et conception du système. La méthodologie MaSE n'est pas en mesure de gérer le dynamisme des systèmes multi-agents car le modèle ne permet pas l'entrée/sortie d'un agent dans un SMA dynamiquement.
- O-MaSE (Organization – based Multiagent System Engineering) [243], considère un MAS comme une organisation sociale. Chaque agent remplit un rôle spécifique en fonction de sa capacité. Elle est composée des modèles de But, d'Organisation, de Rôles, d'Ontologie, d'Agent, de Protocole et d'Etat d'agent. O-MaSE permet la gestion des systèmes dynamiques d'agents.

Holonic Control Architecture (HCA) ; Conçu pour global data centric, telles que les réseaux Internet distribués [244], [245].

Dans la communauté de fabrication holonique, une hiérarchie d'agents (holons) est appelée holarchie [246]. Un holon se distingue d'un agent logiciel en ajoutant une partie de traitement physique à une partie de traitement d'information, qui est dans MAS. La norme IEC 61499 peut

être utilisée pour les blocs fonctionnels dans une automatisation distribuée de conception Holonic [247].

Système d'alimentation autonome distribué intelligent (IDAPS) ; Conçu pour les smart-grids.

Départ sa conception, l'IDAPS est un micro-réseau spécialisé qui est configuré au niveau des clients utilisateurs finaux pour permettre l'échange d'électricité entre voisins [248]. Il est également possible d'acheter et de vendre de l'électricité parmi les différents micro-réseaux IDAPS [249]. Les principales caractéristiques d'exploitation d'IDAPS sont (demande générée par l'offre), la technologie multi-agents et l'architecture de communication Web.

Une combinaison de publish-subscribe et d'un mécanisme de synchronisation décentralisée comprenant Distributed Hash Table (DHT) et Consistent Hash Table (CHT); Appliqué pour différents systèmes distribués.

Publish-subscribe est un modèle de messagerie dans lequel les expéditeurs de messages (éditeurs) ne programment pas l'envoi des messages directement à des destinataires spécifiques (abonnés). Les messages publiés sont catégorisés en classes. Les abonnés expriment leur intérêt pour une ou plusieurs classes et ne reçoivent que les messages présentant un intérêt. C'est une nouvelle méthode de la répartition des tâches entre les systèmes multi-agents. Le concept des systèmes de Publish-subscribe est que les messages sont adressés par contenu plutôt que par destination.

7 Planification coopérative par multi-agents

La planification multi-agent (MAP) étend la planification automatisée classique (ou planification à un seul agent) centrée en répartissant plus ou moins la tâche de planification entre plusieurs agents qui travaillent ensemble pour concevoir un planning commun performant. MAP implique quelques différences essentielles par rapport à l'approche plus restrictive de la planification centrée, telles que la répartition de la tâche entre les agents ou la coordination des activités de ces derniers.

Dans certaines approches du MAP, comme « Best-Response Planning [250] », les agents de planification sont compétitifs et cherchent leurs avantages personnels (self-interested). Le « self-interested » MAP implique l'utilisation de techniques autres que celles utilisées dans la

planification coopérative, telles que la théorie des jeux, les systèmes d'enchères ou la planification basée sur les préférences.

Dans la planification coopérative multi-agents, bien que les agents soient pleinement coopératifs, la protection de la confidentialité est devenue une fonctionnalité requise dans la coopération MAP.

Cette section décrit le MAP coopératif tout en montrant les difficultés supplémentaires qu'il ajoute à la planification par agent unique. Les problèmes de la représentation d'une tâche du MAP en coopération et des langages de spécification du MAP sont discutés. Ensuite, les principales caractéristiques du modèle MAP coopératif, dans travaux présentées dans la littérature, sont décrites. Enfin, l'utilisation de la recherche heuristique dans le MAP coopératif est analysée et la plate-forme MAS, utilisée dans notre étude pour faciliter la conception du système MAP distribué, est présentée.

7.1 Caractérisation des tâches MAP coopératives

Une tâche MAP coopérative implique plusieurs agents de planification, travaillant ensemble dans un environnement partagé. Les agents doivent 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 donne lieu à des agents spécialisés possédant des connaissances et des capacités propres. Cette spécialisation des agents implique le besoin de coopération, car les agents sont obligés d'interagir afin de résoudre les objectifs de la tâche commune. Aussi, La complexité d'une tâche MAP est décrite au moyen de son niveau de couplage (nombre d'interactions qui surviennent entre les agents). Selon ce paramètre, les tâches MAP coopératives peuvent être classées comme suit :

1) Tâches faiblement couplées : qui nécessitent peu ou pas d'interactions, car les agents n'ont pas besoin de coopérer pour atteindre les objectifs de la tâche (pas besoin d'interactions positives).

2) Tâches à couplage étroit : dans ces tâches, un grand nombre d'interactions entre agents est nécessaire pour obtenir la solution du planning.

Le niveau de couplage est un aspect clé qui influe l'approche de conception des architectures du MAP : certaines méthodes sont plus efficaces, voire limitées, à des tâches faiblement

couplées, tandis que d'autres adoptent une approche plus générale et sont tout aussi efficaces, quel que soit le niveau de couplage de la tâche.

Un autre aspect fondamental des tâches du MAP, est évidemment la présence ou pas d'objectifs de coopération qui ne peuvent être résolus individuellement par les agents car leur résolution implique forcément la coopération d'agents spécialisés.

La distribution des informations dans le MAP pose la question de la confidentialité, qui constitue l'un des aspects à prendre en compte dans les applications multi-agents [251]. Souvent, les informations partagées entre les agents de MAP sont minimisées, soit pour des raisons stratégiques, soit simplement parce que cela n'est pas pertinent pour le reste des agents afin de s'acquitter de la tâche de planification.

7.2 Langages de spécification des tâches MAP coopératif.

La représentation d'une tâche MAP coopérative implique la modélisation d'éléments qui ne sont pas présents dans les tâches de planification à agent unique. Ce qui implique la nécessité de langages spécialisés pour le MAP.

Certains modèles MAP incluent un point d'entrée centralisé qui répartit la tâche MAP entre les agents ; Cependant, les approches entièrement distribuées de MAP nécessitent une entrée personnalisée par agent, chaque agent reçoit deux fichiers indépendants qui codent son domaine et sa spécification de problème.

La représentation des tâches individuelles peut inclure des informations sur la confidentialité concernant les agents, pour que le modèle distingue les informations pouvant et ne pouvant pas être partagées avec d'autres agents.

Parmi les langages MAP existants, MA-PDDL1 (Planning Domain Definition Language) est l'un des premiers langages de spécification standard pour les tâches MAP coopératives.

La planification étant traditionnellement considérée comme un problème centralisé, les langages de définition les plus courants (différentes versions de PDDL), sont conçus pour modéliser des tâches de planification centralisée à agent unique.

MAP ajoute un ensemble d'exigences qui ne figurent pas dans la planification à agent unique, telles que la confidentialité ou les agents spécialisés, ce qui motive le développement de langages spécifiques pour la planification multi-agents.

MA-STRIPS, est l'un des langages MAP les plus répandus dans la littérature. MA-STRIPS permet de définir un ensemble d'agents de planification et fournit à chaque entité les actions qu'elle peut exécuter ce qui définit la typologie de l'agent et sa vue locale de sa part de tâche MAP.

7.3 Confidentialité dans les coopératives MAP

Le rôle de la protection de la confidentialité est un des aspects importants dans le MAP distribué. Les premières approches du MAP étant axées sur d'autres aspects, tels que la distribution de l'information. La littérature récente révèle un effort croissant en matière d'analyse, de formalisation et d'utilisation de confidentialité en tant que moyen d'améliorer les performances des systèmes MAP [252] , [253] .

Il existe divers modèles théoriques de confidentialité qui présentent différentes définitions et utilisations des informations privées. D'autre part, la mise en œuvre de la protection de confidentialité dans les approches du MAP présente également des caractères distinctifs.

7.3.1 Modèle théorique de confidentialité

La confidentialité dans MAP peut être appliquée aux actions et aux littéraux (conditions préalables et effets). Un littéral privé ou une action privée n'est connu que d'un agent ou d'un sous-ensemble d'agents (les propriétaires).

Dans la littérature un modèle théorique de confidentialité se distingue MA-STRIPS :

Le modèle MA-STRIPS est actuellement le système de confidentialité le plus étendu. Étant donné un agent i , un littéral est dit privé pour i s'il est requis et affecté uniquement par les actions de i . Une action α est donc dite privée de l'agent i si toutes ses conditions préalables et ses effets sont privés et sont la propriété de i , sinon, α est dite publique. Cependant, les actions publiques peuvent inclure un sous ensemble de conditions préalables et d'effets qui sont privés. Dans ce dernier cas, l'agent i , pour faire respecter la confidentialité, révélera seulement la part publique au reste des participants.

7.3.2 Application pratique de la confidentialité

Outre le modèle théorique de confidentialité, des études récentes ont également abordé les garanties pratiques d'un algorithme MAP en matière de confidentialité. Les auteurs suggèrent une classification de la confidentialité sur quatre niveaux pour analyser les modèles de confidentialité des approches du MAP :

- Pas de confidentialité : l'approche de MAP ne met en œuvre aucun degré de confidentialité et permet aux agents de partager des états complets de recherche.
- Confidentialité faible : un système MAP est dit faiblement privé si les agents ne communiquent pas les valeurs privées d'une variable à d'autres agents pendant la recherche.
- Obscurcissement : (majoritaire dans les méthodes MAP) consiste à encrypter les valeurs privées d'une variable dans la projection publique des actions associées. Cette technique implique la substitution d'informations privées par des identifiants uniques, empêchant ainsi d'autres agents d'accéder aux données privées [252].
- Confidentialité de la cardinalité d'objet : étant donné un agent i et un type t , aucun autre agent ne peut déduire la valeur de la cardinalité de type t de l'agent i . En d'autres termes, ce niveau de confidentialité préserve le nombre d'objets d'un type donné t qu'un agent i possède.
- Confidentialité renforcée : un algorithme MAP est dit fortement privé si aucun agent ne peut déduire des données privées de tout autre agent.

7.4 Classification des systèmes MAP coopératifs

Les tâches MAP coopératives impliquent des difficultés supplémentaires par rapport à la formulation plus compacte des tâches de planification à agent unique, telles que la distribution d'informations, les agents spécialisés, la coordination ou la confidentialité. Nous énumérons dans la suite les aspects les plus pertinents selon lesquels les approches MAP peuvent être classées :

Planification centralisée / distribuée : le MAP concerne la planification par plusieurs agents (MAP réparti) ou la planification pour plusieurs agents au moyen d'une seule entité de planification (MAP centralisée). En général, les approches MAP centralisées visent à améliorer l'efficacité du processus de planification global. En revanche, les agents du MAP distribué coopèrent pour effectuer conjointement la planification qui sera un compromis.

- 1) MAP centralisée : Plusieurs travaux dans la littérature appliquent une approche centralisée du MAP, tirant parti de la structure distribuée pour optimiser les performances globales. Le MAP centralisé (un seul agent décideur ayant une connaissance complète) comporte deux opérations de base : un processus de planification permettant de résoudre les tâches de planification locales des agents et une procédure de coordination associant les solutions locales à un plan global.
- 2) MAP distribué (DAP) : L'aspect principal des approches distribuées est la combinaison des fonctions planification et coordination.

Divers modèles de DAP mettent l'accent sur la coordination de la planification préalable qui divise la tâche entre les agents, de sorte que chaque agent se voit attribuer une partie de la tâche MAP.

Un autre groupe de techniques DAP se concentre sur la fusion de plans. Dans cette approche, les agents effectuent la planification individuellement, tandis qu'un processus de coordination est ensuite appliqué pour proposer une solution globale à la tâche MAP. Cependant, la fusion de plans est adaptée à la résolution de tâches faiblement couplées où les ressources ne sont pas partagées et dans lesquelles les agents sont capables d'atteindre individuellement leurs objectifs [254]. Cette stratégie de coordination post-planification ne permet pas de résoudre des problèmes étroitement liés, car la fusion peut conduire à une augmentation exponentielle des contraintes dans les problèmes qui nécessitent un effort de coordination [254].

Une autre approche du MAP associe les activités de planification et de coordination, ce qui aboutit à une vision unifiée du MAP coopératif. La planification et la coordination inter-reliées donnent lieu à des méthodes polyvalentes qui ne sont pas contraintes à des tâches faiblement couplées, ce qui permet de traiter efficacement des tâches complexes avec des agents spécialisés et des objectifs de coopération.

Coopération des agents [255]: Certaines approches MAP distribuées effectuent une coordination avant la planification (répartition des tâches ou répartition des objectifs). D'autres

approches suivent une méthode de fusion des plans individuels pour en déduire le plan de solution global. *Enfin, d'autres modèles intercalent les activités de planification et de coordination afin que les agents construisent ensemble un plan de solution de manière coordonnée et progressive.*

Paradigme utilisé pour la planification : De nombreux modèles du MAP reposent sur une problématique particulière, telle que la planification en tant que problème de satisfaction des contraintes.

Protection de la confidentialité : Outre le besoin de diffusion de l'information, la confidentialité est également l'une des principales fonctionnalités MAP (Coordination sans rendre les informations sensibles publiques).

Heuristique locale / globale dans MAP coopératifs : Un grand nombre des modèles de MAP coopératifs appliquent une forme de recherche heuristique pour guider le processus de planification. Comme les agents ont généralement une connaissance limitée de la tâche, la qualité des estimations locales d'un agent est plutôt médiocre par rapport à l'heuristique globale appliquée dans la planification à agent unique.

Une heuristique globale dans MAP consiste à appliquer une heuristique pour estimer la tâche MAP effectuée par plusieurs agents ayant une connaissance différente de la tâche et, éventuellement, des exigences de confidentialité.

Les données d'une tâche MAP sont réparties sur les agents. Contrairement à la planification à agent unique, il n'existe pas, dans MAP, d'entité centralisant toutes les informations. Par conséquent, un protocole de communication robuste entre les agents est nécessaire pour calculer des estimations heuristiques globales. Cependant, la construction et l'exploration d'un planning général impliquent de nombreuses communications entre agents, entraînant une approche coûteuse en calcul. En outre, Le protocole de communication doit alors garantir que les agents sont capables de calculer des estimations heuristiques sans révéler d'informations confidentielles.

7.5 MAS Platforms

Afin de développer des systèmes MAP entièrement distribués, il est nécessaire de doter les agents de planification de capacités de base en matière d'opérations et de communication, afin qu'ils puissent interagir les uns avec les autres et de travailler en coopération. Au cours des dernières années, des travaux pertinents sur les modèles de conception des systèmes du MAP ont été publiés.

Outre les modèles conçus exclusivement pour prendre en charge MAP, de plus en plus de travaux sur les middlewares polyvalents sont conçus pour la conception de systèmes multi-agents (MAS) planificateur. L'une des conditions de base pour la création d'un MAS consiste à définir un langage de communication standard. La Fondation pour les agents physiques intelligents (FIPA) fournit un ensemble de normes visant à promouvoir l'interaction d'agents hétérogènes et des services qu'ils peuvent représenter. En particulier, le langage ACL (FIPA Agent Communication Language) [256] est devenu le standard de facto pour les agents communicants dans la plupart des plates-formes MAS.

JADE (Java Agent Development Framework) [257] est une plate-forme MAS basée sur Java qui fournit les ensembles de services, les conventions et les connaissances nécessaires pour que les agents puissent interagir. JADE se distingue notamment par son mécanisme de transmission de messages asynchrone et un service de pages jaunes, parmi d'autres fonctionnalités facilitant le développement de modèles distribués, tels qu'un système MAP.

Le modèle MAP présenté dans cette thèse repose sur JADE, une plate-forme polyvalente pour les MAS ouverts. JADE fournit une variété de services et d'outils pour la gestion optimisée des MAS ouverts, tels qu'une infrastructure de communication permettant aux agents d'interagir via le langage FIPA ACL.

Chapitre 4

Chapitre 4 : Le modèle MAS du Bloc opératoire

8 Domaine et énoncé du problème

Le domaine problématique d'allocation des tâches (chirurgies) en bloc opératoire consiste en leur planification sur une période donnée. Pour le cas particulier d'allocation des urgences, les blocs opératoires avec une seule salle dédiée à la chirurgie d'urgence ne posent certes pas le problème de l'affectation de l'urgence. Néanmoins, les performances de cette solution sont loin d'être optimisées. Cette solution peut même être inadéquate dans certains cas. Que se passe-t-il si une nouvelle urgence se produit alors que la salle vient d'être occupée par une précédente urgence ? Et si plusieurs urgences se produisent en même temps, suite à un accident par exemple ? Les cas d'urgence dans les grands et moyens hôpitaux dépassent la capacité d'une seule salle opératoire.

C'est pourquoi plusieurs salles opératoires doivent pouvoir recevoir et effectuer des interventions chirurgicales d'urgence. Dans un langage plus conventionnel, le processus comprend plusieurs tâches (chirurgies) et plusieurs unités de ressources (salles) pouvant effectuer ces tâches. Nous avons donc besoin de développer une stratégie pour affecter des tâches à des unités de ressources afin d'optimiser les performances attendues. Une solution est dite optimale s'il n'existe pas de meilleure solution compte tenu des informations disponibles dans le système. Nous espérons qu'une solution optimale donnera une performance globale maximale. MAS au bloc opératoire permet une gestion flexible d'une structure en équipe de multi-agents représentant les réels acteurs du processus. Les agents agissent de manière dynamique en fonction de l'évolution de l'environnement. La structure de travail en équipe inclut une planification commune préalable mais aussi une autonomie des agents qui agissent individuellement, et coopèrent entièrement si besoin, en gardant à l'esprit les objectifs globaux. Dans le domaine du problème de la salle opératoire, la solution optimale est classiquement celle qui minimise le coût marginal nécessaire pour effectuer une chirurgie. Dans le cas particulier d'une chirurgie d'urgence, la réactivité du système est un facteur crucial. Ainsi, le paramètre de coût n'est pas le seul à prendre en compte, l'heure estimée du début de la chirurgie est déterminante dans la décision du choix de la salle d'opération. Un autre paramètre qui peut être

aussi décisif est celui des ressources spécifiques, par exemple la présence d'un chirurgien spécifique, recommandé pour cette chirurgie.

Cela permet de formuler le problème en vue d'une répartition optimale des tâches dans un ensemble de salles opératoires : Pour un ensemble de chirurgies qui sont à planifier (chaque chirurgie peut être une urgence ou pas), et pour un ensemble de salles capables d'effectuer ces chirurgies, chaque intervention doit être affectée à la salle qui permet d'obtenir le meilleur compromis satisfaisant aux critères prédéfinis: minimiser le coût marginal, commencer l'opération en temps adéquat et maximiser la commodité des chirurgiens et des patients. C'est typiquement une optimisation multicritère.

9 Architecture hybride de contrôle.

Les approches d'optimisation classiques des problèmes de planification et d'ordonnancement statiques des interventions chirurgicales en bloc opératoire ne peuvent pas tenir compte simultanément de toutes les contraintes de ressources humaines et matérielles et aboutissent donc à des solutions sous-optimales. Malgré tous les efforts et malgré tous les modèles mathématiques complexes pour prévoir l'évolution des charges de travail des salles d'opération et la dynamique du processus, fréquemment en temps réel les plannings deviennent invalides pendant leur exécution.

De plus, des interventions chirurgicales sont souvent annulées le jour de la réalisation planifié. Souvent, une urgence peut survenir à tout moment et doit être prise en compte dans les meilleurs délais. Par conséquent, il est nécessaire de poursuivre une maintenance du planning et de l'ordonnancement bien en aval du processus pendant la phase de réalisation.

Nous avons trouvé très peu des travaux concernant la replanification en temps réel, Nous citons (Gerchak, Y., D. Gupta, M. Henig. 1996)[152], les auteurs utilisent une programmation stochastique dynamique quotidienne pour sélectionner les chirurgies à retarder ou à ajourner. Les critères et la politique décisionnelle du choix des interventions chirurgicales à déplacer sont analysés et caractérisés. L'optimum sélectionné par les auteurs est celui qui entraîne la perte de profit relative la plus faible.

En outre, dans le domaine de transport routier des marchandises, Le problème de la planification dynamique a été plus fréquemment travaillé. (Fischer et al., 1995) [258] décrivent des modèles de planification coopérative basé dans un système multi-agents

où la solution du problème global émerge des stratégies locales de prise de décision. Le modèle présenté peut être utilisé pour obtenir de bonnes solutions aux problèmes complexes d'allocation de ressources et d'ordonnancement dynamiques. Nous avons constaté que les concepts utilisés pour la gestion dynamique du fret dans le domaine de transport peuvent être utilisés pour une grande variété de domaines où il est question d'allocation de ressources en temps réel et précisément c'est le cas du domaine du bloc opératoire.

Aussi, (Bachem, Hochstattler & Malich, 1993) [259] proposent l'algorithme d'enchère appelé "Simulated Trading " (ST). Les auteurs ont présenté une heuristique de recherche itérative pour établir un marché d'échanges complexes de tâches entre ressources de transport routier. Les auteurs montrent que Simulated Trading fournit des solutions de haute qualité au problème d'équilibrage de la charge et d'optimisation du fret de la marchandise. *Leur étude nous a donnés la conviction que l'intelligence artificielle distribuée dans un système de ressources multi-agents pourrait apporter une réponse appropriée au problème de révision en temps réel de la planification dans le domaine incertain des blocs opératoires où les perturbations sont fréquentes.*

Aussi, *l'une de contribution majeur de notre travail de recherche consiste à proposer une architecture hybride en complétant le contrôle hiérarchique classique et global par un contrôle coopératif local.* Ce type d'approche originale dans ce domaine (bloc opératoire en contexte hospitalier) vise à fournir une architecture de contrôle hybride capable d'optimiser les performances globales (efficacité des blocs et qualité des soins dispensés aux patients) tout en apportant une réactivité efficace en réponse à la réalité de ce processus très perturbé.

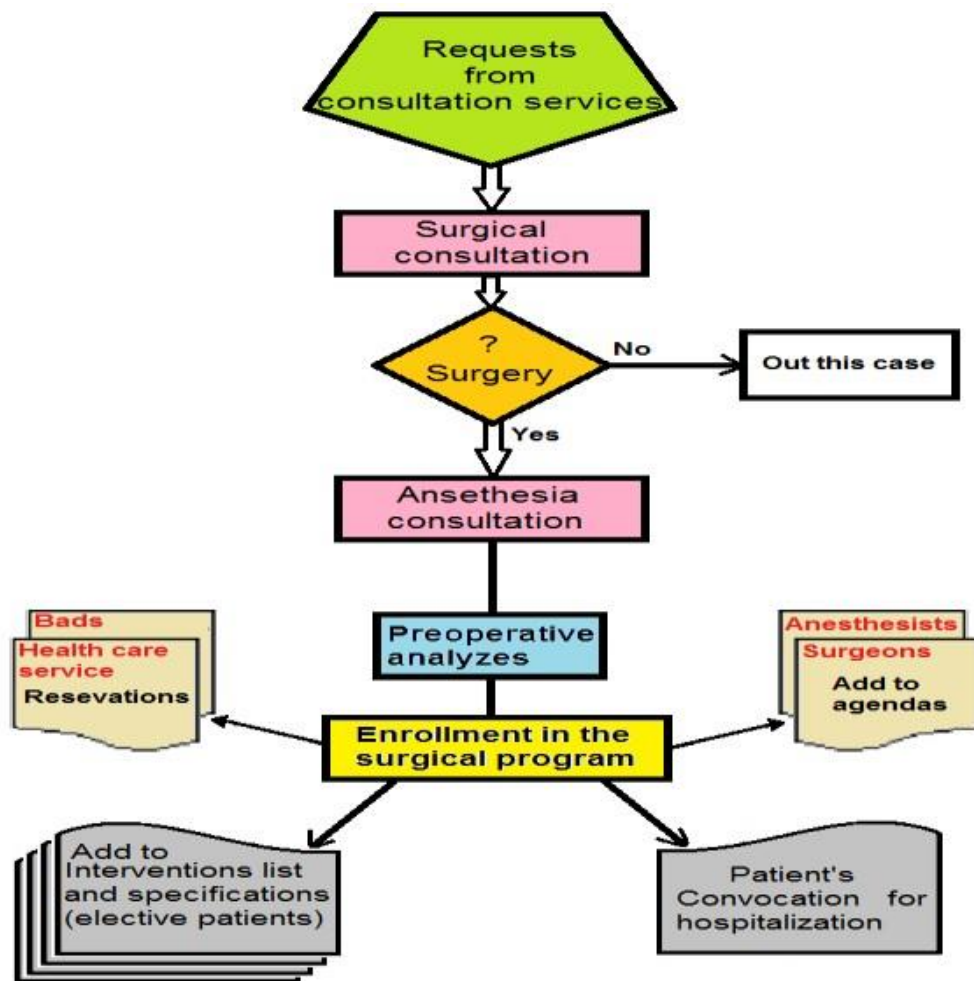


Figure 9: Management of the preoperative phase

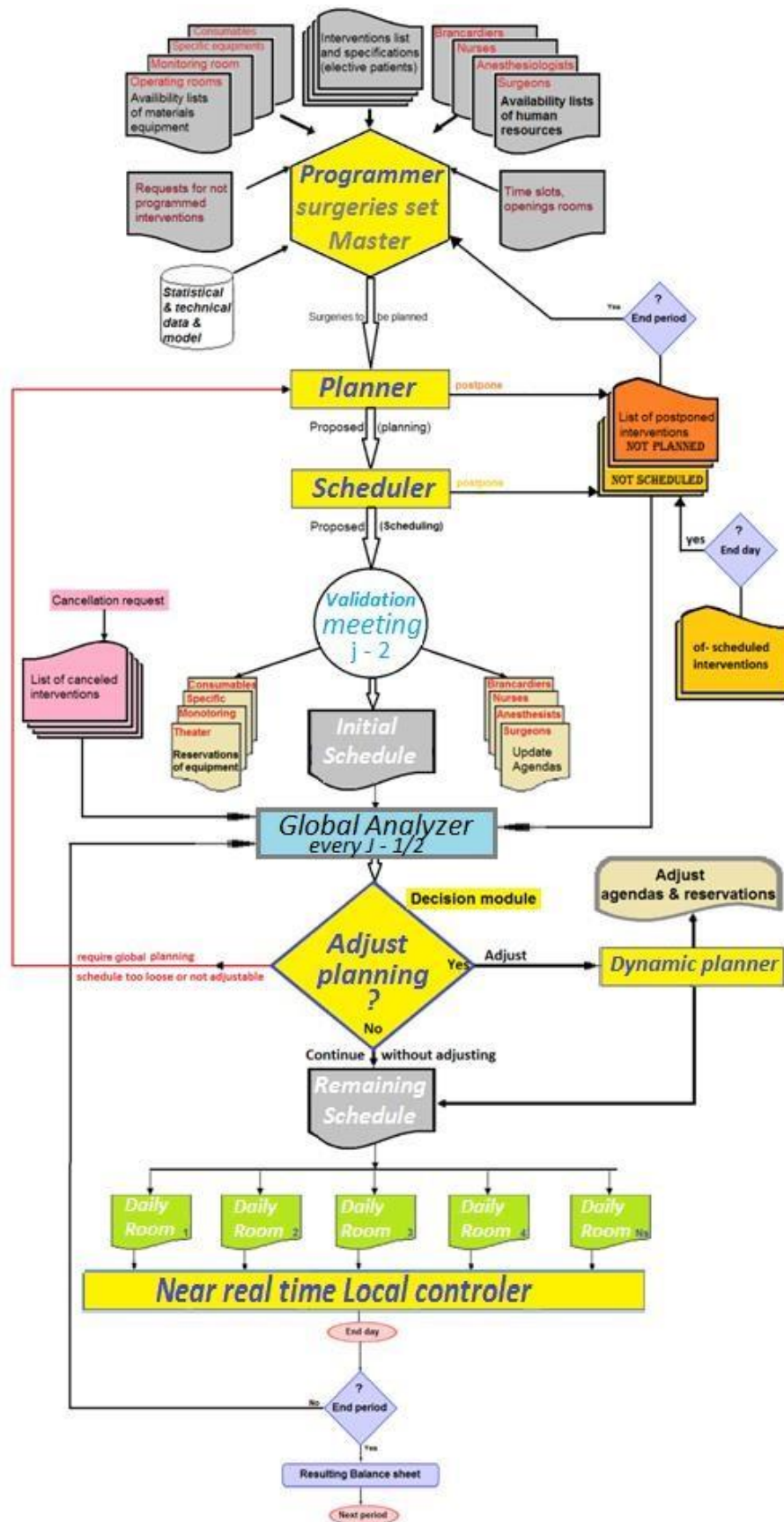


Figure 10 : Modèle de contrôle hybride pour la gestion d'un bloc opératoire de chirurgie

Les architectures de contrôle hybrides tentent de combiner la robustesse des systèmes hétérarchiques avec les performances élevées promises par les systèmes hiérarchiques. Pour ce faire, nous proposons une approche basée sur les agents dans un contexte de coopération totale qui maintient en permanence le plan valide et optimisé. La partie de notre étude dans le domaine des systèmes multi-agents porte sur la construction d'un modèle décrivant comment des agents coopératifs représentant les salles d'opération doivent interagir efficacement pour atteindre leurs objectifs de coût de convenance des chirurgiens et d'efficacité de soins aux patients.

Nous proposons dans ce qui suit un "work flow" construit avec des modules fonctionnels basés sur les protocoles CNP et ST dans le cadre de MAS entièrement coopératif afin de trouver la solution précise pour faire face aux urgences et aux incertitudes dans le domaine des blocs opératoires. Pendant la phase finale d'achèvement du processus du bloc opératoire, trois modules principaux de gestion se distinguent : la planification dynamique (exchanging Trading Procedure), l'affectation des chirurgies d'urgence (Emergencies Tenders), l'adaptation de l'ordonnancement (schedule adapter). Bien entendu, ces fonctions forment la base du "contrôle coopératif" dans le système de gestion proposé.

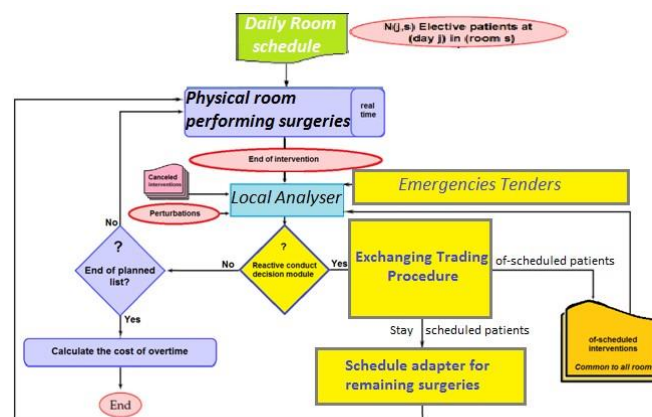


Figure 11 : Real time local controller work flow

10 Architecture du système multi-agents

Dans ce travail, nous proposons un système de gestion de bloc opératoire, basée sur un système intelligent multi-agents (MAS), pour une assistance dans la conduite du processus de fonctionnement des blocs opératoires modernes. Le système intelligent multi-agents est une technique d'intelligence artificielle distribuée qui, à notre connaissance, n'avait encore jamais été utilisée dans le domaine du bloc opératoire, mais a été utilisée avec grand succès pour résoudre divers problèmes dans d'autres domaines d'application tels que le commerce électronique, les systèmes multi-robots, les applications de sécurité, la fabrication industrielle, etc. Cette technologie a un potentiel considérable pour résoudre les problèmes de gestion dans les blocs opératoires modernes.

Un système multi-agents (MAS) 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.

Les multi-agents de planification (MAP) se sont distingués. Cette nouvelle méthodologie poursuit l'intégration des capacités de planification dans des agents intelligents. Ainsi, un groupe d'agents peut élaborer un plan d'action qui permet d'atteindre un ensemble d'objectifs communs. En conséquence, le MAP élargit considérablement le champ d'application des méthodes de planification automatisées, tout en étant fondamentalement différent des méthodes conventionnelles, dont la plupart relève de la recherche opérationnelle. MAP se présente comme une méthode de planification puissante, simple et à intelligence distribuée (DAI) pour les applications gérées par un système multi-agents (MAS) où plusieurs entités ou agents intelligents planifient en communiquant et en combinant leurs connaissances, informations et capacités. MAP est utilisé pour produire une planification distribuée (une planification individuelle par Agent) ou pour produire une planification commune pour plusieurs agents, c'est-à-dire une planification pour l'exécution multi-agents. Ici, nous soulignons que notre travail est le premier cas car notre objectif est de produire un emploi de temps pour chaque salle opératoire et pour chaque jour, c'est-à-dire un horaire distribué par (Room-Day-Agent).

L'approche MAP coopératifs adoptée suppose que tous les agents sont pleinement collaboratifs et intéressés par la création conjointe d'un plan distribué menant à des objectifs communs. Pour ce faire, nous avons sélectionné une stratégie de planification parmi les différents niveaux de

coordination possibles, c'est-à-dire spécifier les niveaux d'autonomie ou de coopération nécessaires. De plus, les techniques avancées permettant de résoudre le problème de la planification coopérative entre agents utilisent souvent des méthodes heuristiques. La portée des heuristiques dites locales est plutôt faible car chaque agent perçoit la qualité du plan global selon son propre calendrier. Cela a motivé la centralisation du pouvoir de décision dans le seul Manager-Agent modélisant le gestionnaire du bloc opératoire et l'utilisation d'une "heuristique globale de planification" pour contrôler l'ensemble du mécanisme de répartition des chirurgies pendant la phase de planification. Dans ce qui suit, nous présentons l'architecture du système multi-agents adopté.

Au bas du système de contrôle se trouve la couche physique contenant les ressources humaines (chirurgiens) et le bloc opératoire (salles opératoires). Pour l'aspect logiciel, l'architecture proposée comprend deux couches : la couche d'intelligence artificielle distribuée constituée d'un système multi-agents et la couche médiatrice fournissant des interfaces entre le système multi-agents et la couche physique.

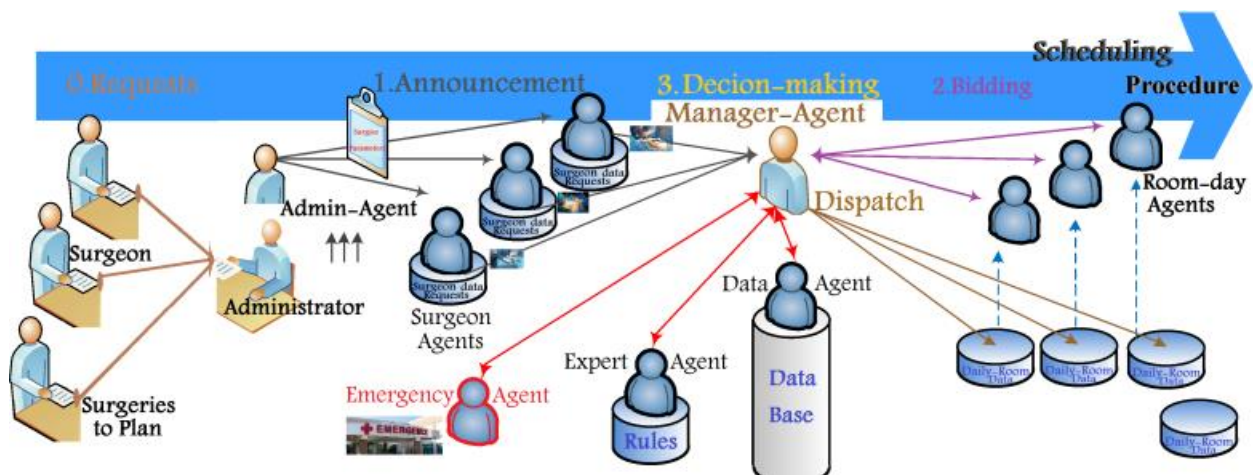


Figure 12: Multi-Agent Planner system for an operating theater management

Le MAS est composé de sept types d'agents, à savoir: Admin-Agent, Manager-Agent, RoomDay-Agent, Surgeon-Agent, Emergency-Agent, Database-Agent et Expert-Agent.

- Emergency-Agent représente le service des urgences; il possède une interface graphique spécifique lui permettant d'annoncer les chirurgies d'urgences.
- Admin-Agent est le lien avec les chirurgiens, à travers lequel les demandes de chirurgies ou d'annulations sont effectuées.

- Manager-Agent (MA) cherche à optimiser la performance globale et la réactivité du bloc opératoire, ses décisions sont basées sur des critères et des règles prédéfinis. (MA) est le seul décideur pour la fonction de planification. Dans les protocoles de communication utilisés tels que (ST) et (CNP), Manager-Agent est le seul initiateur. Tous les RoomDay-Agents sont des participants potentiels. Lorsqu'il reçoit une demande d'insertion d'une chirurgie (une urgence ou pas) dans la planification, il enrichit le dossier de spécification de cette chirurgie, contenant les caractéristiques de la chirurgie demandée, par des données spécifiques supplémentaires obtenues auprès d'Expert-Agent et de Database-Agent. Il lance le protocole (CNP) pour trouver une place pour cette chirurgie. Il analyse les propositions des RoomDay-Agents, il choisit la meilleure proposition et décide de l'attribution de la chirurgie au RoomDay-Agent gagnant.

- Surgeon-Agent représente un chirurgien ou éventuellement un service de chirurgie. Surgeon-Agent communique avec Admin-Agent pour récupérer la liste des demandes du chirurgien qu'il représente. Dans le processus de planification, Surgeon-Agent possédant la liste des demandes de chirurgies à placer, télécharge à partir de la base de données, filtre et stocke les données et les fonctionnalités relatives aux interventions qu'il tentera d'introduire dans la planification (par exemple, "ressources matérielles" spécifiques, durée estimée, conditions requises,). Ceci est fait pour accélérer la gestion à chaque niveau. En effet, les données sont disponibles localement dans sa propre base de données, en plus de leur existence dans la base de données générale. A la fin de la planification, il peut éventuellement contacter Admin-Agent pour l'informer de l'échec de placement d'une intervention.

- RoomDay-Agents (RA) sont le sous-ensemble de base du système de planification. Chaque RoomDay-Agent représente une salle de chirurgie physique un jour donné. Chaque (RA) est responsable de l'établissement de son plan individuel en collaborant avec le Manager-agent. Les (RA)s participent aux négociations du protocole (CNP). Ils utilisent leur propre ordonnanceur local pour compléter ou ajuster leur planning individuel. (RA)s travaillent ensemble pour fournir à (MA) les éléments d'une bonne décision. De plus, les plannings individuels sont mis à jour, si nécessaire, par communication avec Database-Agent. Un système de gestion complet suppose l'existence des moyens de retour de l'information en fin d'opération. Il est également de la responsabilité de (RA) de renvoyer les données utiles à DataBase-Agent et à Expert-Agent.

- DataBase-Agent; est responsable du filtrage, de la classification et du stockage des données dans un format prédéfini et de leur extraction si nécessaire.

- Expert-agent (EA) est responsable du stockage et du cumul des lois et des règles relatives au savoir-faire ou à la juridiction du bloc opératoire et il est évidemment responsable de leur extraction. Il coopère principalement avec le (MA) en lui fournissant les connaissances qui lui permettront de prendre une décision étudiée. Il possède une base de données spécifique dans laquelle les règles et les lois sont cumulées.

La couche intermédiaire établit une table de correspondance entre la couche système multi-agents et la couche physique. Elle contient les données spécifiques de la couche physique nécessaires à une bonne représentation de celle-ci par le système multi-agents. Elle contient également les interfaces (informatiques ou autres) de liaison entre ces deux couches.

11 Stratégie de décision du choix.

La stratégie proposée pour affecter une chirurgie à une place dans le planning de la période considérée est exposée dans ce qui suit. De manière classique, Manager-Agent reçoit une demande pour une intervention chirurgicale avec en pièce jointe une fiche de programmation contenant les spécifications et les contraintes de l'intervention. Il complète la fiche de programmation en récupérant par communication avec Data-Agent, les données permettant de compléter les spécifications de l'intervention à réaliser, à savoir : la liste des ressources matérielles et humaines nécessaires, les contraintes spécifiques, la durée estimée etc. Manager-Agent a une première décision à prendre: Refusez la demande et informez immédiatement l'agent demandeur ou bien acceptez a priori la demande. Dans ce dernier cas, Manager-Agent a une seconde décision à prendre: Choisir la salle d'opération appropriée. S'il n'y a qu'une seule salle qui convient il envoie un message direct à son Room-Agent contenant les spécifications de la chirurgie. Si ce n'est pas le cas, Manager-Agent agit en tant qu'initiateur et il démarre la procédure Contract Net Protocole pour choisir où placer l'intervention qu'il a acceptée à priori. Il envoie un appel d'offres à tous les Room-Agents qui peuvent convenir (diffusion générale). L'appel d'offre inclut une date limite pour recevoir les propositions.

Dans ce qui suit nous exposons la stratégie d'allocation sélective. Les établissements de santé

ont besoin non seulement d'un système d'évaluation des performances fournissant une mesure de performance fiable et facilement compréhensible, mais également de l'utilisation de cette mesure pour optimiser le contrôle du processus. La stratégie de chaque module de gestion vise aussi à générer automatiquement son propre indicateur et spécialement à l'intégrer dans le système de gestion afin d'agir sur le contrôle au moyen de normes et de règles imposées ou acquises par expérience, selon le principe d'un système expert. Ainsi, pour aller dans cette direction et améliorer l'efficacité du processus de sélection par CNP, nous proposons de donner à chaque salle des scores relatives aux capacités et à l'expertise de la salle par type de chirurgie \$ (salle, type). Cette liste peut être initiée par l'administrateur du bloc opératoire. Ensuite, elle évolue automatiquement à travers les retours d'expérience et sera mise à jour par Expert-Agent. Ce score représente une évaluation de la capacité d'une pièce à effectuer un type de chirurgie. Il sera inclus dans les données spécifiques au savoir-faire pour lequel la sauvegarde et la mise à jour sont de la responsabilité de l'agent expert. De plus, nous supposons l'existence d'une règle permettant d'exclure, avant de procéder aux enchères, toutes les salles dont le score de capacité est inférieur à une note de rejet préfixé. Ensuite, l'annonce du message d'appel d'offre ne sera adressée qu'à un sous-ensemble de RA (diffusion limitée). Les RA utilisent les moyens disponibles dans la couche de médiation (module d'estimateur de coûts) pour élaborer les éléments de leurs propositions. Chaque offre représente la proposition individuelle de chaque RoomDay-Agent et sera envoyée à Manager-Agent par un message de réponse. Manager-Agent analyse toutes les propositions reçues. Il a une troisième décision à prendre : Refusez la demande de chirurgie (si aucune offre n'est appropriée) ou garder la demande. Dans les deux cas, il informe l'agent demandeur. Dans le cas où la demande est gardée, MA envoie un avis de gain à RoomDay-Agent qui a gagné en faisant la meilleure offre, celui-ci doit répondre par une acceptation pour que le contrat soit scellé. Conformément aux termes du contrat qu'il a conclu avec Manager-Agent, RoomDay-Agent gagnant utilise les moyens de la couche médiateur pour insérer l'intervention en question dans le planning de la salle correspondante.

11.1 Préférences et priorités

Les équipes de chirurgiens ont des préférences quant aux créneaux horaires à réserver pour leurs interventions. Il est évident que si les chirurgiens imposent le choix de tous les créneaux horaires, la planification n'est pas possible car il y aura certainement beaucoup de collisions dans l'emploi de temps. La méthode de planification est conçue pour un contexte dans lequel les chirurgiens sont totalement coopératifs afin d'atteindre l'objectif commun d'améliorer

l'efficacité globale du bloc opératoire. Cela signifie que toutes les équipes acceptent le résultat optimisé de l'outil de planification, qui peut, pour certaines réservations de créneaux, ne pas correspondre à leur préférence maximale.

Chaque équipe de chirurgiens est associée, en plus de sa demande de temps cible, à une préférence pour chaque créneau horaire. $Pref(j, k_s)$ indique dans $Pref(j, k_s)$ une métrique correspondant au poids de la préférence de la demande d'équipe j de réserver l'intervalle de temps k_s . Néanmoins, cette fonctionnalité nécessite pour un cas réel d'application, que les équipes soient plus attentives dans la définition de leurs préférences. En d'autres termes, la matrice de préférences ne doit pas contenir uniquement des poids (1) et (0), mais des valeurs bien calculés. Cela donne de la flexibilité et permet au processus de planification de s'adoucir davantage et lui donne le degré de liberté nécessaire pour trouver la solution optimale.

En outre, une équipe de chirurgie peut avoir une priorité plus élevée que les autres pour occuper une chambre. Pour pouvoir prendre en compte cette distinction, nous avons défini une matrice contenant dans $Pri(j, n)$ la priorité, donnée par l'administrateur, pour que l'équipe j utilise la salle n . Nous admettons ici que plusieurs équipes peuvent avoir la même priorité pour utiliser une salle donnée.

11.2 Evaluation des scores de capacité

Lors du fonctionnement de la salle opératoire (cas électifs et urgents), afin de produire automatiquement les indicateurs de performance, l'agent expert incrémente les compteurs, il comptabilise l'intervention après son achèvement et enregistre ses paramètres de qualité et de performance. Ces données seront utilisées pour évaluer les indicateurs de capacité de chaque salle à effectuer chaque type de chirurgie. Ainsi, deux de ces indicateurs sont introduits :

- a) Capacité absolue pondérée: si $Ns(j, T)$ est le nombre de chirurgies de type T effectuées par la salle d'opération j , alors $E(j, T)$, la capacité absolue pondérée est calculée comme

$$\text{suit: } E(j, T) = \frac{Ns(j, T)}{\sum_{i=1}^{nr} Ns(i, T)}$$

- b) Capacité relative: $\$ (j, T)$ La capacité relative de la PR j pour le type d'opération T est

$$\text{calculée comme suit: } \$ (j, T) = \frac{E(j, T) - \overline{E(*, T)}}{\max E(*, T) - \min E(*, T)}. \text{ Les salles ayant une capacité}$$

relative positive sont celles qui ont une capacité supérieure à la moyenne pour effectuer ce type de chirurgies.

Dans le cas de l'optimisation multicritères, un facteur partiel similaire à celui de la capacité relative déjà introduite peut-être calculé pour chaque critère. La décision dans ce cas sera basée sur un score qui est une agrégation de tous les facteurs partiels. Par exemple, la fonction de décision peut être basée sur une combinaison linéaire de facteurs partiels.

11.3 Coût virtuel

L'optimisation du taux d'occupation des salles peut nécessiter d'attribuer à une équipe un créneau horaire ne correspondant pas à ses préférences. Cependant, le mécontentement de l'équipe de chirurgiens, pour la réservation d'un créneau horaire ne correspondant pas à sa préférence maximale, doit être pris en compte dans le calcul du coût. Pour introduire le concept de coût virtuel de la réservation d'un créneau horaire, considérons l'exemple suivant:

Soit A l'action correspondant à placer dans le créneau horaire (k_s) une réservation pour une intervention des chirurgiens de l'équipe (j). Soit (p) le poids de cette allocation. Soit $rcost(A)$ le coût réel de fonctionnement. Nous définissons le coût virtuel de A comme suit:

$$\alpha \in [0, 1]$$

$$p = \alpha E(j, k_s) + (1 - \alpha) Pref(j, k_s)$$

$$vcost = rcost + (1 - p) * rcost$$

Cela revient à ajouter un surcoût fictif pondéré correspondant à la non-préférence des chirurgiens. Notez que le logiciel de planification est conçu pour le confort des chirurgiens. Cela nous a amenés à utiliser le critère de minimisation des coûts virtuels comme base de décision.

12 Protocoles de négociation pour la répartition des chirurgies.

12.1 Contract NET Protocol

« Contract NET Protocole » est un protocole de négociation entre agents qui permettra de résoudre le problème de répartition des tâches (chirurgies) entre ressources limitées (salles). Il est lancé par un agent, l'initiateur, qui souhaite déléguer l'exécution de certaines tâches à un ou plusieurs autres agents, les participants. L'initiateur, responsable de cette affaire, cherche à optimiser une fonction objective. Cette fonction est fréquemment exprimée sous forme de minimisation des coûts. Il peut également s'agir d'autres critères que le coût, tels que le délai d'exécution le plus proche, une répartition équitable des tâches etc. Pour une tâche donnée, un nombre quelconque de participants peuvent répondre à un appel d'offres. CNP permet de trouver l'agent le mieux adapté à une tâche par comparaison des propositions soumises par les agents. CNP a été proposé en 1980 par R. G. Smith[260]. En 2002, le protocole a été normalisé par la « Foundation for Intelligent Physical Agents FIPA ». La version normalisée, largement utilisée aujourd'hui, est légèrement modifiée par l'ajout d'actes de communication de rejet et de confirmation afin d'informer les participants du rejet ou de l'acceptation de leur offre. Cette version standard du protocole (FIPA-Contract-Net) est le protocole utilitaire du message ACL (Agent Communication Language). Le déroulement du protocole est schématisé dans les figures suivantes :

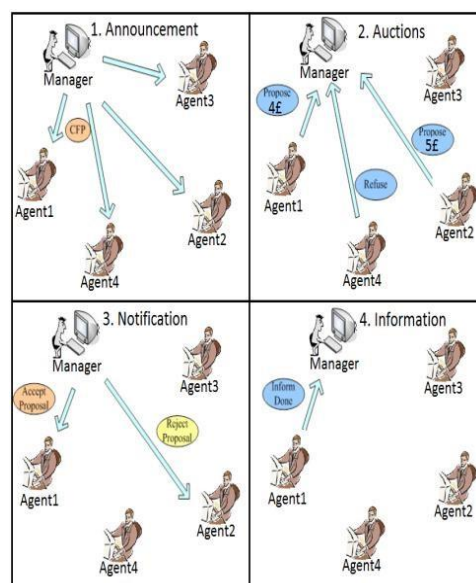


Figure 13: The CNP interaction

Un initiateur lance un appel d'offres qui spécifie les tâches et toute condition supplémentaire relative à son exécution. Les participants qui reçoivent l'appel d'offres sont des contractants potentiels et peuvent soumettre leurs propositions pour des tâches comportant des conditions préalables, telles que le prix, le temps ou toute autre mesure. Alternativement, les agents peuvent ne pas faire de proposition et refuser la tâche. Lorsque la date limite est atteinte, l'initiateur évalue les propositions reçues et sélectionne, éventuellement, un ou des agents pour effectuer la tâche. Le ou les agents sélectionnés recevront une notification d'acceptation et les autres agents recevront des refus. Le participant gagnant s'engage à mener à bien la tâche. Une fois la tâche terminée, le participant envoie le message d'achèvement à l'initiateur, qui peut être une information indiquant que la tâche est terminée et incluant également les résultats de la tâche. En cas d'échec, le message correspondant est également envoyé à l'initiateur.

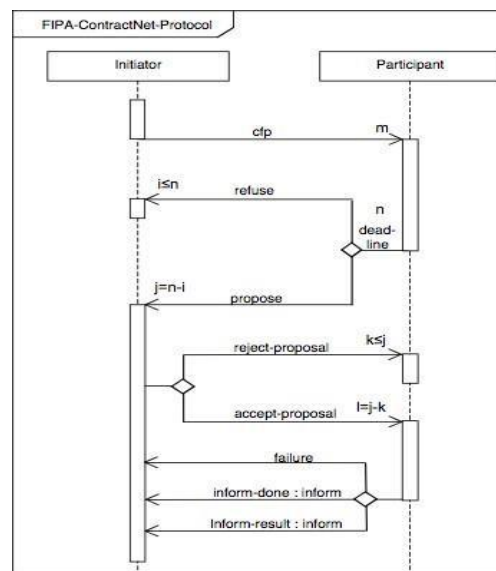


Figure 14: The interaction diagram of FIPA-contract-net

12.2 Applications basées sur CNP en relation avec Bloc opératoire

FIPA Contract Net est devenu (un standard formel) des protocoles d'attribution de tâches. La version de base et ses variantes sont largement utilisées dans différents domaines d'application :

Dans Manufacturing: [Hsieh & Chiang 2009] [261] Les auteurs proposent une plate-forme de résolution de problèmes qui, dans l'architecture système Multi-Agents Holonic, utilise CNP pour sélectionner des holons et planifier ses tâches pour exécuter un ordre de production à moindre coût.

Dans smart Grid: [Goswami & Gupta 2008] [262] Les auteurs proposent deux politiques basées sur le CNP pour la sélection dans des grilles de ressources hétérogènes adéquates.

Dans le système de capteurs distribués: [Kinnebrew & Biswas, 2009] [263] .

Les auteurs présentent une variante de (CNP) pour l'attribution de sous-tâches, qui emploie des courtiers pour limiter la surcharge de communication dans des informations de domaine agrégé en deux phases provenant de groupes d'agents.

Dans les hôpitaux: [U. Deshpande et al, 2003] [264]. Pour faire face à la dégradation des performances de CNP avec l'augmentation du nombre d'agents, l'apprentissage par instance est intégré à CNP pour sélectionner un agent cible. Le système est mis en œuvre pour le partage des ressources entre hôpitaux.

Sur les marchés électroniques : [C. Dellarocas et al, 2000] [265]. Les auteurs présentent une méthodologie pour la conception d'institutions de traitement des exceptions électroniques et d'une solide architecture de marchés d'agents logiciels reposant sur CNP.

Dans le Transport : [Sandholm T., 1993] [266]. L'auteur présente une formalisation du processus de décision d'adjudication et d'attribution des tâches basée sur les coûts marginaux calculés localement.

Dans la Robotique: [Golfarelli et al, 1997] [267]. Les auteurs adoptent une approche CNP pour échanger des tâches entre robots. Tout robot se voit préalablement attribuer des tâches et doit ensuite échanger une partie des tâches pour que chaque robot se retrouve avec des tâches plus appropriées.

Dans la distribution d'énergie: [J. Kodama et al, 2009] [268] Les auteurs proposent une stratégie de restauration du réseau de distribution d'énergie, basée sur (CNP). Les agents représentent des zones individuelles séparées entre elles par des commutateurs. Lorsqu'un accident se produit, les agents coopèrent et négocient par CNP pour décider du rétablissement du service de distribution d'énergie de manière autonome. Un algorithme génétique est utilisé pour que les agents apprennent les paramètres et les règles à utiliser au niveau de la prise de décision.

Dans « Hydraulic dispatch »: [Huang et al., 2011] [269] Les auteurs ont conçu un module fonctionnel multi-agents basé sur CNP destiné à optimiser le contrôle de la répartition des flux dans les réservoirs. Pour améliorer l'efficacité du contrôle, le facteur de capacité et le degré de coopération sont utilisés comme règles au niveau de la prise de décision.

Cette dimension très étendue de l'application du CNP a conduit à la réalisation des grandes plates-formes de développement offrant des bibliothèques riches, une implémentation préalable du CNP facilitant ainsi la réalisation d'utilisations pratiques (ex-JADE). En ce qui concerne l'optimisation de la décision du choix de l'agent gagnant, nous trouvons dans la littérature différents algorithmes qui ont été analysés et expérimentés avec des données réelles ou simulées. Des critères tels que le prix payé, le taux de réussite et l'équilibrage de charge sont utilisés conformément à la politique spécifique à chaque application pratique. Ces règles peuvent également concerner une agrégation de plusieurs critères ou peuvent résulter d'une accumulation de savoir-faire. En d'autres termes, MAS peut être lié via CNP à un système expert.

12.3 « Simulated Trading Protocole »

La procédure de l'heuristique dite Simulated Trading (ST) applique des mécanismes de négociation qui s'apparentent à un marché d'échange (Trading Matching). Dans notre application ST permet d'échanger des interventions chirurgicales entre Room Agents du MAS et ceci sous le contrôle du Manager Agent. Ce (Trading Matching) est réalisé sous un ensemble de contraintes et dans le but d'optimiser la performance et la réactivité. Le mécanisme de négociation est modélisé par un graphique appelé trading graph $TG = (Vs \cup Vb, E)$ dans lequel chaque nœud de vente ou d'achat correspond à une offre de vente ou d'achat émanant d'une

RA. Optionnellement, pour permettre la négociation d'échanges complexes, les offres d'achat et de vente sont classées à différents niveaux de décision successifs.

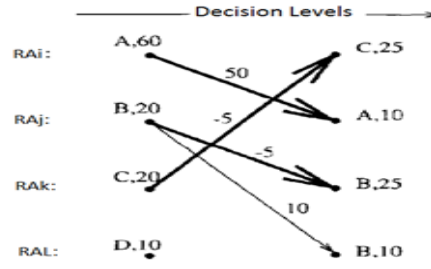


Figure 15: Le Trading Graph et le Trading Matching en gras selon Bachem et al (1996)

RAi: $vs1 = (RA_i, l, -A, 60)$

RAj: $vb1 = (RA_j, l, +A, 10)$ provided $vs2 = (RA_j, l, -B, 20)$.

RAk: $vb2 = (RA_k, l, +B, 25)$ provided $vs3 = (RA_k, l, -C, 20)$ in $[t1, t2]$

RAL: $vb3 = (RA_l, l, +B, 20)$ provided $vs4 = (RA_l, l, -D, 10)$

RAi: $vb4 = (RA_i, l, +C, 25)$ in $[t1, t2]$ provided $vs1 = (RA_i, l, -A, 60)$

MA: $e_1 = (v_{s1}, v_{b1}, A, +50)$; $e_2 = (v_{s2}, v_{b2}, B, -5)$; $e_3 = (v_{s3}, v_{b3}, C, -5)$

Chaque nœud v est soit un nœud d'achat $vb = (RA, l, +ks, \rho^+) \in Vb$ ou un nœud de vente $vs = (RA, l, -ks, \rho^-) \in Vs$ avec RA le nom de l'agent de salle, l indiquant le niveau de décision, Ks la référence de la chirurgie à négocier et ρ le coût. Pour chaque "proposition bipartite (vs, vb, ks)" à vendre et à acheter, nous insérons une arête dirigée $e = (vs, vb, ks, w)$. Chaque arête porte la référence de la chirurgie négociée (ks) et un poids (w) qui est la différence entre le prix de vente et le prix d'achat.

$v_s = (RA_i, l_i, -s_k, \rho^-) \in V_s \Leftrightarrow RA_i$ avec le plan journalier $R_i^{l_i-1}$ mis à jour au niveau (l_i-1) , fait une offre de vente au niveau (l_i) de la chirurgie s_k au prix correspondant au coût d'extraction: $\rho^- = C^-(R_i^{l_i-1}, -s_k) = C(R_i^{l_i-1}) - C(R_i^{l_i-1} - \{s_k\})$

$v_b = (RA_j, l_j, +s_k, \rho^+) \in V_b \Leftrightarrow RA_j$, avec plan journalier $R_j^{l_j-1}$ mis à jour au niveau (l_j-1) , fait une offre d'achat au niveau (l_j) de la chirurgie s_k au prix correspondant au coût d'insertion: $\rho^+ = C^+(R_j^{l_j-1}, +s_k) = C(R_i^{l_i-1} + \{s_k\}) - C(R_i^{l_i-1})$

$e = (v_s, v_b, s_k, w) \Leftrightarrow w(e) = \rho^-(v_s) - \rho^+(v_b) =$ poids d'une arête (e) de v_s à v_b concernant la chirurgie s_k .

Une insertion irréalisable (par exemple, violation de contraintes majeures) peut être interdite en lui attribuant un coût infiniment élevé. Le MA cherche à optimiser son programme, il sélectionne un ensemble cohérent d'échanges qui satisfasse à toutes les contraintes et tels que la somme des poids des arêtes soit positive. L'algorithme (ST) consiste essentiellement en deux phases :

12.3.1 La phase des propositions de vente et d'achat :

A chaque niveau de décision $l_i < l_{max}$, itérativement pour chaque salle le programme simulé nivelé, $R_i^{l_i}$ est examiné. Nous calculons les paramètres qui nous permettent de décider quel type d'action (vente ou achat ou non échange) et concernant quelle chirurgie prendre à ce niveau.

La décision (quelle chirurgie) dépend du gain de coût espéré en choisissant d'échanger cette chirurgie, pour cela, nous attribuons à chaque chirurgie un coefficient de priorité d'incitation basé sur un rapport de cout.

$$\text{Priorité de vendre: } P_{s_h}^{R_i^{l_i}} = \frac{C^-(R_i^{l_i-1}, s_h)}{\sum_{j=1}^{n_i} C^-(R_i^{l_i-1}, j)} \quad \forall s_h \in R_i^{l_i-1}$$

Priorité d'achat: Soit $S = \{s_1, \dots, s_k\}$ le registre des ventes et soit $\{sv(1), \dots, sv(k)\}$ les économies de coûts associées.

$$\text{If } \forall s_h \in S, [sv(s_h) - C^+(R_i^{l_i-1}, s_h)] = \text{cst}$$

$$\text{alors } P_{s_h}^{R_i^{l_i}} = 1 / k. \quad (\text{Equipriorité})$$

$$\text{Else } m = \min_{j=1}^k [sv(s_j) - C^+(R_i^{l_i-1}, s_j)],$$

$$P_{s_h}^{R_i^{l_i}} = \frac{sv(s_h) - C^+(R_i^{l_i-1}, s_h)}{\sum_{j=1}^k [sv(s_j) - C^+(R_i^{l_i-1}, s_j)] - k.m}$$

Endif.

Néanmoins dans cette approche, le coefficient de priorité est basé uniquement sur le critère de coût. En réalité, La décision est souvent multicritère et reflète la politique du bloc opératoire. Ce paramètre peut être amélioré en prenant en compte d'autres critères (par exemple, la préférence d'une salle pour une chirurgie donnée).

En cas d'action de vente, nous ajoutons l'opération à vendre au registre des ventes. En cas d'achat, nous achetons, dans ce même registre, l'opération qui réalise le gain le plus fort. Pour chaque décision de vente ou d'achat, nous ajoutons un nœud au Trading Graph.

Après avoir inséré un nœud d'achat v_b , nous plaçons une arête pondérée (e) allant du nœud de vente v_s au nœud d'achat v_b . TG se construit donc progressivement "niveau par niveau".

Nous avons créé une salle factice qui, à la fin du processus d'achat et de vente, propose d'acheter toutes les interventions chirurgicales mises en vente, mais non saturées par une offre d'achat. Il convient de noter que cette même salle factice propose toutes ses interventions chirurgicales à la vente au début de chaque procédure ST, dans l'espoir que ces interventions chirurgicales seront réintroduites dans le planning.

Le calcul de la phase « vendre et acheter » se fait comme suit:

Initialization

For $i=1$ to nr , $R_i^0 = R_i$, $l_i = 0$, endfor

sell all surgeries of the dummy room:

$nd = card(DR)$,

For $k=1$ to nd

$s_k = DR(k)$, $\rho = dr(k)$,

Add surgery s_k to selling list S , $S = S + \{s_k\}$, $s(k) = \rho$

Add sell node to graph, $v_s = (DR, 0, -s_k, \rho)$

Endfor

Empty DR , $DR = \emptyset$

Sell and buy procedure:

For $i=1$ to nr (iteration on all rooms)

Review of the room situation

Choose (buy or sell or no action)

if (sell action) then

Choose "good" surgery for sell $s_k \in R_i^{l_i}$

$l_i = l_i + 1$

$R_i^{l_i} = R_i^{l_i-1} - \{s_k\}$

Deletion cost $\rho = C(R_i^{l_i-1}) - C(R_i^{l_i} - \{s_k\})$

Add surgery s_k to sell register S , $S = S + \{s_k\}$, $s(k) = \rho$

Add sell node to graph, $v_s = (RA_i, l_i, -s_k, \rho)$

endif (end sell action)

if (buy action) then


```

Search from S, "suitable" surgery to buy  $s_k \notin R_i^{l_i}$ 
if suitable surgery is found then
Mark  $s_k$  as being affected by an offer to purchase,
 $B = B \cup \{s_k\}$ 
 $l_i = l_i + 1$ 
 $R_i^{l_i} = R_i^{l_i-1} + \{s_k\}$ 
Insertion cost,  $\rho = C(R_i^{l_i-1} + \{s_k\}) - C(R_i^{l_i-1})$ 
Computing weight of exchange,  $w = s(k) - \rho$ 
Add buy node to trading graph,  $v_b = (RA_i, l_i, +s_k, \rho)$ 
Add appropriate edges to TG,  $e = (v_s, v_b, s_k, w)$ 
endif ( end buy action)
endfor (end iterations over rooms)

Dummy room buy unsold surgeries:
 $\bar{B} = C_B^S = \{sr / sr \in S \text{ and } sr \notin B\}$ ,  $\bar{n}b = \text{card}(\bar{B})$ ,
For k=1 to  $\bar{n}b$ 
 $s_k = \bar{B}(k)$ ,  $\rho = s(k)$ ,  $dr(k) = \rho$ ,
Add buy node to trading graph,  $v_b = (DR, 1, +s_k, \rho)$ 
Add appropriate edges to trading graph,  $e = (v_s, v_b, s_k, 0)$ 
Endfor ( all unsold surgeries are in dummy room)

```

12.3.2 Phase recherche du « Trading-Matching » marché réalisable et optimal :

$TG = (V_s \cup V_b, E)$ est le graphe de trading constitué pendant la phase vendre et acheter

Il peut être nécessaire de supprimer certaines arêtes et nœuds du graphique de trading pour préserver son admissibilité.

Un graphique de trading est admissible s'il satisfait :

$$\forall v_b \in V_b / \exists v_s \in V_s \text{ with } e = (v_s, v_b, \dots) \in E$$

$$\forall l_1 < l_2 < l_3 / (RA, l_1, \dots), (RA, l_3, \dots) \in V, \exists (RA, l_2, \dots) \in V$$

Cette contrainte implique que chaque nœud d'achat est adjacent à au moins un nœud de vente et que tous les R_i^l doivent évoluer d'une manière continue en fonction des niveaux de décision (contrainte de niveau).

Le cœur de la procédure ST consiste dans la recherche, dans un TG admissible, d'un sous-ensemble de paires de nœuds (v_s, v_b) , avec une condition supplémentaire selon laquelle chaque

nœud est inclus au plus dans ("un et un seul") de ces sous-ensembles de paires. Le sous-ensemble souhaité que nous recherchons se fait par un appariement sous contraintes :

Compte tenu d'un admissible Trading graph $TG (V = V_s \cup V_b, E)$, soit le sous-ensemble $M_e \subset E$, soient les sous-ensemble $M_s \subset V_s$, $M_b \subset V_b$

M_s Nœuds de vente pour lesquels il existe au moins une offre d'achat dans M_e : $M_s = \{v_s \in V_s / \exists v_b \in V_b \text{ avec } e = (v_s, v_b, \dots) \in M_e\}$

M_b nœuds d'achat qui correspondent à une et une seule offre de vente sur M_e : $M_b = \{v_b \in V_b / \exists 1 v_s \in V_s \text{ with } e = (v_s, v_b, \dots) \in M_e\}$

Soit M_V l'ensemble des nœuds saturés: $M_V = M_s \cup M_b$

M_e est un **Trading Matching** si cela remplit la condition:

$[\forall (RA_i, l, k, \dots) \in M_V ; \forall l^* < l, (RA_i, l^*, \dots) \in M_V]$

avec $w(M_e) = \sum w_e(e \in M_e)$, poids de TM M_e

Pour trouver le TM optimisé, la recherche est effectuée par une énumération complète de TG. $TG^*(V^*, E^*)$ est le TG correspondant au TM le plus pondéré TM (M_e^*) est le trading matching recherché. ceci veut dire que TG^* est le sous-ensemble admissible et réalisable de TG qui associe le plus fort poids à M_e^* .

12.3.3 Phase de replanification : mise à jour effective des plannings.

Tant que le processus ST est actif, chaque AR continue à exécuter son programme déjà en cours. En effet, la ST est exécutée à l'aide d'une copie du plan actuel qui serait remplacé par le nouveau plan calculé via la procédure ST uniquement si ST a été exécutée avec succès. C'est-à-dire qu'une correspondance a été trouvée, ce qui conduirait à un nouvel optimum. Ainsi, la réactivité est garantie: en cas d'urgence, MA utilise toujours le plan original actuel et cohérent pour lancer une enchère par CNP. Si une urgence se produit alors que la négociation simulée ST a déjà été activée, la procédure ST doit être interrompue.

13 Cas d'étude

13.1 Algorithme d'affectation des chirurgies d'urgence par CNP.

Pour illustrer l'utilisation du CNP dans le cadre du système de gestion du bloc opératoire, nous présentons dans ce qui suit la description et le développement des messages échangés dans MAS pour le module d'affectation des urgences.

1) Présélection des soumissionnaires : dans le cadre de la stratégie de sélection, cette partie consiste en un échange d'informations éventuel entre Manager-Agent et Expert-Agent pour présélectionner le sous-ensemble des soumissionnaires potentiels adéquats.

2) Annonces : le Manager-Agent annonce par un message chaque intervention chirurgicale d'urgence ; l'annonce de message peut être adressée à toutes les RA (diffusion générale) ou à un sous-ensemble de RA (diffusion limitée). Il ne faut pas oublier que le MA connaît les possibilités de chaque salle d'opération. En outre, il peut communiquer avec Expert-Agent pour décider quels nœuds (RA)s doivent participer aux enchères pour cette opération. Le message d'annonce contient quatre emplacements principaux ; les informations contenues dans ces emplacements sont codées dans un langage commun à tous les nœuds :

La spécification d'éligibilité est une liste de contraintes spécifiques qu'un Room-Agent doit respecter pour participer aux enchères, ce qui limitera les répondants potentiels qui ne respectent pas ces contraintes. S'il n'y a pas de contrainte particulière, ce champ reste vide. Par exemple, plusieurs urgences peuvent être éventuellement attribuées à une (RA) en une journée. La charge peut devenir déséquilibrée, ce qui ralentit le système et amoindrit ses performances. Aussi, les interventions multiples des chirurgies d'urgence sont à éviter. Dans ce cas, nous pouvons utiliser la "spécification d'éligibilité" pour empêcher un AR de participer à l'enchère d'une deuxième urgence.

Le résumé de la tâche est l'emplacement des spécifications de la chirurgie objet de l'annonce en cours. C'est une brève description de la chirurgie à effectuer. Il doit spécifier le type de chirurgie, l'heure de début ou plutôt, l'heure de début au plus tard, la durée estimée et toutes les ressources nécessaires.

Les spécifications contenues dans la proposition indiquent les informations dont Manager-Agent a besoin pour prendre sa décision et faire son choix. Cet emplacement contiendra : la référence du soumissionnaire, le coût de l'insertion de la chirurgie dans le planning en cours et l'heure estimée du début de l'opération. La date d'expiration est une date limite pour recevoir l'acceptation de la proposition. Compte tenu de la nature de l'opération d'urgence à assigner, nous avons décidé qu'un nœud pouvait enchérir à un intervalle de temps déterminé. La synchronisation globale est donc essentielle. Pour cela, tous les nœuds doivent être synchronisés entre eux par rapport à un temps absolu.

To: RA 2, RA 7, RA 9. From: MA Type: Emergency surgery announcement Contract: 000 25/12/2017 Task Abstraction: ophthalmology, start time to rather, start time at the latest, estimated duration, resources... Eligibility Specification: first emergency = true Bid Specification: human resources, estimated start time, estimated insertion cost. Expiration Time: time

Figure 16: Message emergency announcement.

3) Soumission : chaque RA parmi les contractants potentiels reçoit l'annonce de la chirurgie d'urgence faite par l'agent Manager. RA examine sa situation concernant la progression des chirurgies en temps réel. Il recherche l'opportunité d'interrompre son plan en cours et d'insérer cette opération d'urgence tout en respectant les règles de sécurité des patients déjà engagés en salle d'opération et en veillant à la satisfaction de toutes les contraintes associées à cette nouvelle intervention (ressources par exemple). Ensuite, il utilise les informations fournies par MA pour calculer le coût d'insertion de cette opération dans son plan actuel. Avant la date limite, le nœud soumet une offre (Figure 17). Le message d'offre fournit la référence du soumissionnaire, les ressources humaines disponibles que cet agent de salle peut utiliser pour cette chirurgie, le temps estimé pour le début de la chirurgie et une estimation du coût de l'insertion.

To: MA
From: RA 9
Type: BID
Contract: 000 25/12/2017
Node Abstraction:
Surgeons = A or C or H
Anesthesiologists = D and J
Estimated start time = time
Estimated insertion cost = cost

Figure 17:emergency surgery bid.

4) Attribution : Manager-Agent utilise les informations contenues dans les propositions de réponse pour sélectionner le soumissionnaire qui a présenté l'offre optimale en fonction de ses deux objectifs : réduire les coûts et augmenter la qualité des soins de santé du patient. Comme indiqué précédemment, la décision dans ce cas sera basée sur une fonction qui consiste en une agrégation de tous les facteurs partiels élaborés par objectif. Ensuite, MA attribue un contrat à l'agent de salle gagnant (Figure 18). Le message d'attribution spécifie les ressources sélectionnées que l'AR doit utiliser pour effectuer cette opération d'urgence, ainsi que l'heure estimée d'arrivée du patient en salle d'opération.

To: RA 9
From: MA
Type: AWARD
Contract: 000 25/12/2017
Task Specification: Surgeons = C
Anesthesiologists = D and J
Time of arrival = time

Figure 18:Message emergency award.

Pour maintenir la cohérence et la sécurité dans ce processus d'attribution. Nous avons choisi d'autoriser MA à soumettre au maximum une offre à chaque fois. Cela réduit le trafic de messages et permet à chaque autorité de contrôle de soumissionner pour une seule urgence avec un calendrier à jour. Bien sûr, si une autre urgence arrive, MA doit attribuer l'urgence en cours de traitement avant de lancer un nouvel appel d'offres.

Si, pour une raison quelconque, un RA décide de refuser l'attribution d'une urgence. Il envoie un message à MA pour exprimer ce refus. En général, le message doit contenir le motif du refus. Il appartient à la MA de relancer un nouvel appel d'offres tout en excluant cette RA.

De même, une opération d'urgence mise aux enchères par MA ne peut être attribuée qu'à une seule salle. Avant de recevoir toutes les offres, Si MA décide il doit informer les perdants que leurs offres seront rejetées afin d'arrêter le processus d'enchères pour cette tâche.

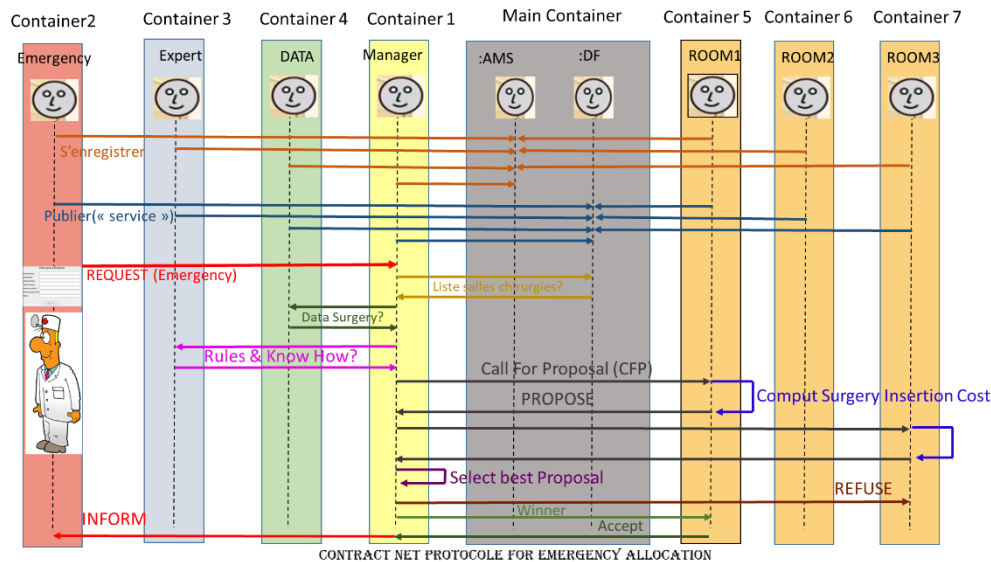


Figure 19: Diagramme de séquence du protocole d'allocation des urgences

13.2 Algorithme d'équilibrage dynamique de la charge entre les salles par ST protocole.

En phase de réalisation, Toutes les salles possèdent chacune un planning individuel valide. Le processus du bloc opératoire est déroulé dans chaque salle conformément à son planning en cours. L'algorithme d'optimisation peut être utilisé à des moments opportuns sur cet ensemble de plannings individuels en cours, dans l'objectif d'améliorer éventuellement certains critères de performance préfixés. Il s'agit souvent de rechercher d'éventuelles modifications pour équilibrer la répartition de la charge restante en intervention sur les salles de chirurgie sans violer indûment les contraintes ou les préférences des chirurgiens. Selon la politique choisie, la demande d'origine peut émaner de l'un des Room-Agents ou venir de Manager-Agent. Mais il appartient exclusivement à Manager-Agent de décider de lancer un ST. Manager-Agent, connaissant la charge de chaque salle, demande à l'agent de la salle la plus chargée de proposer l'une de ses chirurgies à la vente. Room-Agent calcule le coût virtuel d'extraction de chaque une de ses chirurgies. Il choisit la meilleure chirurgie à extraire et la propose à la vente. Le Manager-Agent lance un appel d'offres à "tous" les Room-agents pour leur vendre cette "activité". Chaque Room-Agent calcule le coût d'insertion de cette "activité" en tenant compte de sa charge déjà planifiée. Le Manager-Agent reçoit les offres proposées par les Room-Agents.

Le Manager-Agent décide à qui attribuer cette activité. L'agent Manager met à jour la planification et informe les Surgeon-Agents concernés par cette modification. Manager-Agent réessaie le même mécanisme d'optimisation tant que le critère d'arrêt n'est pas atteint. Le diagramme de séquence du processus d'optimisation est présenté à la figure 20.

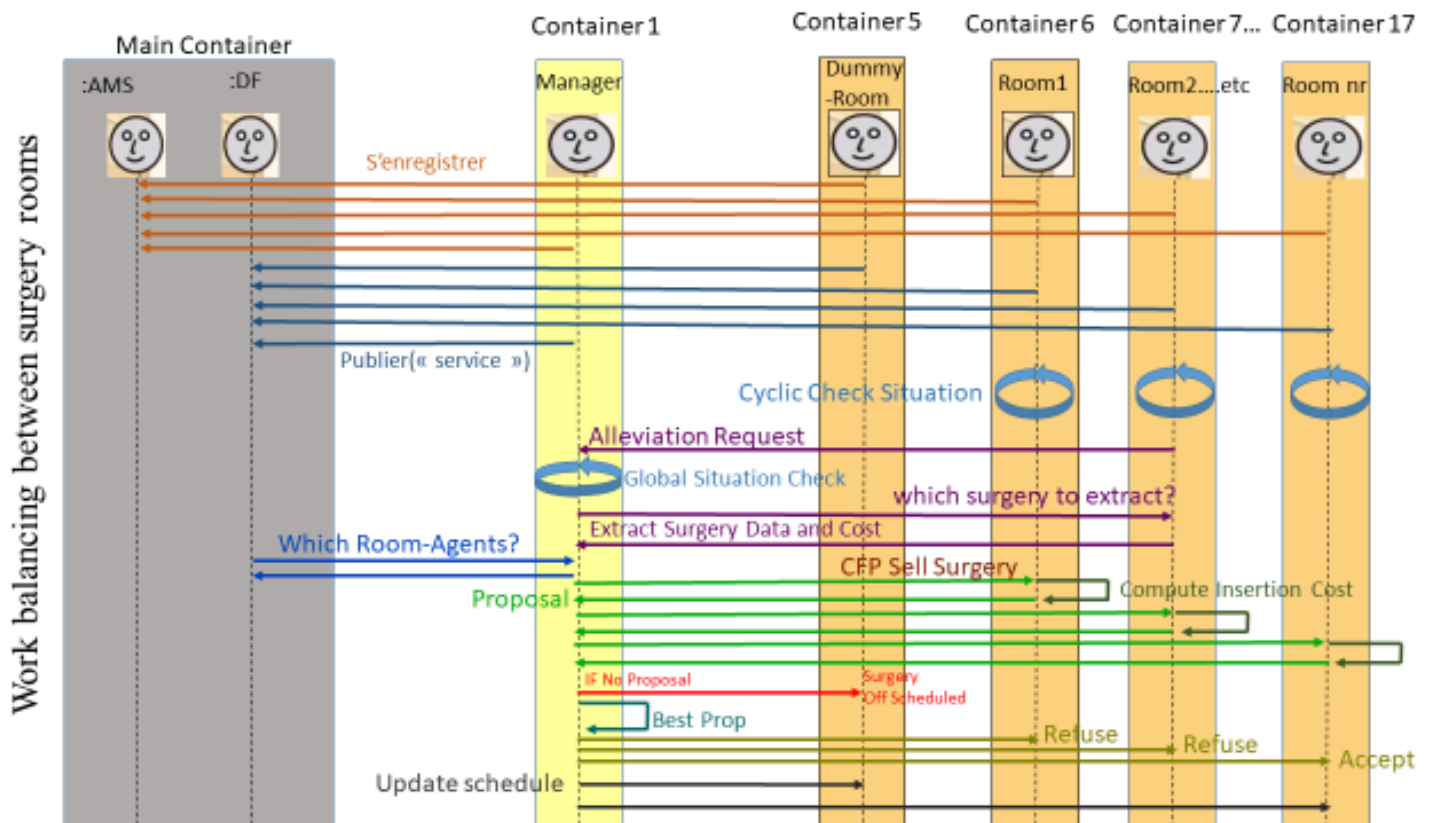


Figure 20: diagramme de séquence équilibrage de la charge

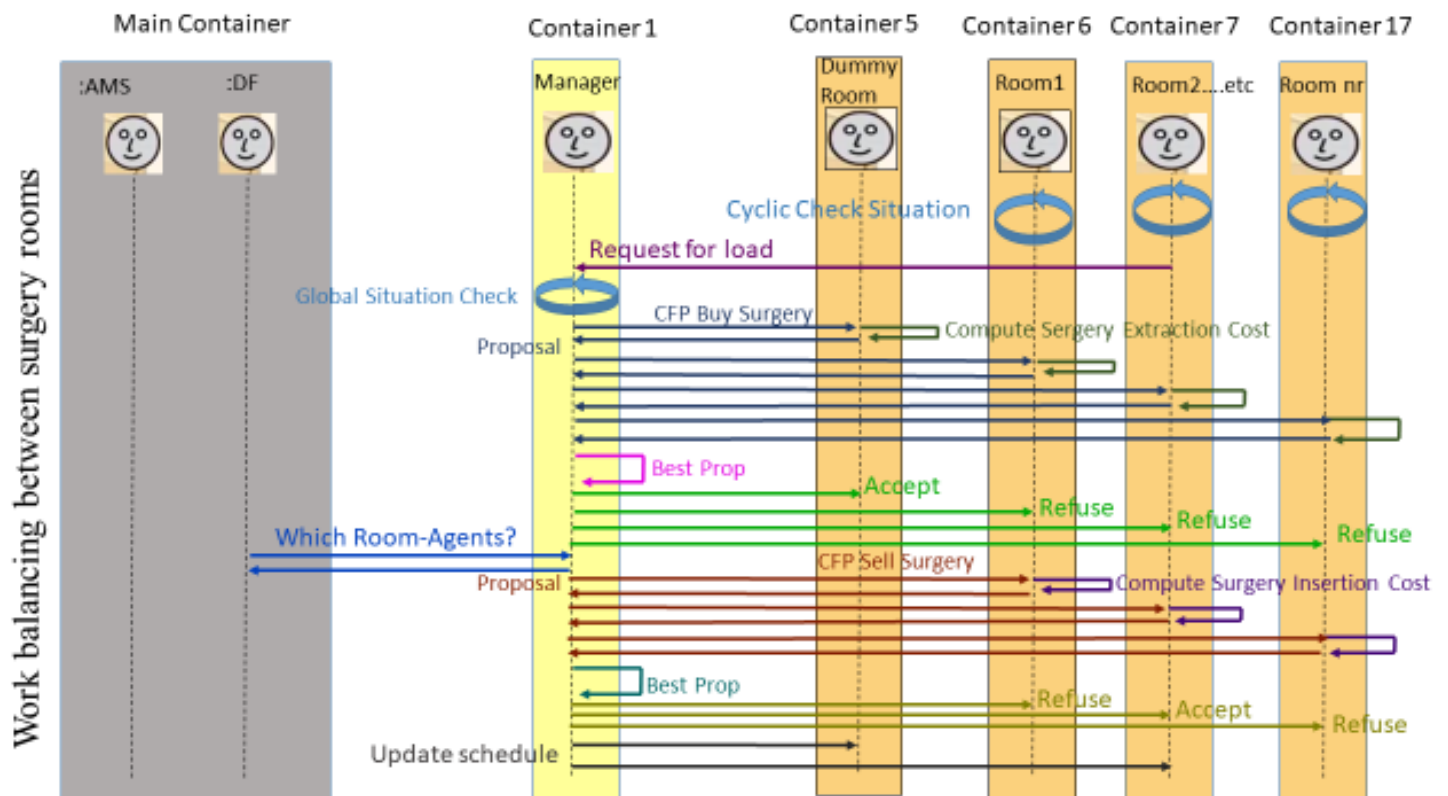


Figure 21:diagramme de séquence équilibrage de la charge

13.3 « Block-scheduling »

13.3.1 Définition du problème

Déterminer une méthode d'allocation de temps équitable entre les groupes de chirurgiens est un problème courant dans les hôpitaux ayant une capacité de temps limitée en salle d'opération. Les responsables de bloc opératoire commencent par déterminer le temps alloué à chaque équipe chirurgicale, en fonction de leur expérience et de leurs compétences, ou en utilisant les formules basées sur l'optimisation des performances globales à partir de la contribution des marges partielles de ces équipes. Une fois que les parts temporelles de chaque groupe ont été calculées, une méthode est nécessaire pour adapter une planification existante ou pour en générer une nouvelle. Dans cette étude, nous proposons une méthodes d'attribution de créneaux horaires, pendant les jours de la semaine, à des groupes chirurgicaux spécifiques.

13.3.2 Programmation opératoire

La programmation du patient est un module de gestion de bloc opératoire situé en amont du processus d'intervention chirurgicale. Il consiste à réserver, à la demande des chirurgiens, les créneaux horaires possibles pour les interventions prévues sur une période conventionnelle d'une semaine. Il existe trois modèles de programmation des patients :

- Open Booking: la programmation est centralisée au niveau du responsable de la salle d'opération. Les réservations sont effectuées dans l'ordre chronologique, au fur et à mesure que les demandes arrivent ou périodiquement. Organiser ce type de planification est simple. Néanmoins, cela peut entraîner des dysfonctionnements liés à la sous-utilisation des ressources ou, au contraire, à de nombreuses heures supplémentaires.
- Block scheduling: consiste à développer, à partir de toutes les demandes des équipes chirurgicales, un programme squelette. Ce programme initial consiste en des réservations de créneaux horaires bien définis, associés chacun à une équipe chirurgicale. Les équipes chirurgicales utilisent ensuite ces créneaux horaires réservés pour planifier leurs interventions électives.
- Modified block scheduling : semblable en principe à la programmation par blocs, mais en utilisant des créneaux horaires à durée réglable, avec possibilité d'extension si nécessaire.

13.3.3 Block-Scheduling algorithm

Dans ce qui suit, nous expliquerons le mécanisme de planification pour créer un nouvel timetabling. La méthodologie est caractérisée par l'existence d'un "décideur" unique (Agent-Manager), qui contrôle le mécanisme et décide itérativement de la configuration des créneaux horaires. Agent-Manager reçoit (itérativement) une demande de réservation d'un Agent-Surgeon. Agent-Manager enrichit la demande par les informations obtenues auprès d'Agent-Expert, relatives aux préférences, aux contraintes et au type de salle. Il lance un appel d'offres (CNP) aux Agents-Room, qui peuvent participer à cette négociation. Chaque Agent-Room calcule le coût virtuel de chacun de ces créneaux horaires encore disponibles et qui peuvent convenir et sélectionne le meilleur pour répondre à Agent-Manager en indiquant le coût virtuel correspondant. Agent Manager analyse les réponses reçues. Il décide de choisir celui qui propose le coût virtuel le plus faible et qui respecte les contraintes relatives au nombre de chirurgiens pouvant être présents en parallèle. Il informe les Agents-Room de sa décision et

demande au gagnant d'inclure cette réservation. À la fin d'un tour pour traiter une réservation, Agent-Manager reçoit une nouvelle demande du suivant Agent-Surgeon. Il procède de la même manière pour trouver un emplacement dans le planning. Les itérations de remplissage des réservations se terminent lorsque la liste des demandes reçues est vide (toutes les demandes ont été planifiées) et lorsque des demandes non planifiées ne peuvent pas être satisfaites.

13.3.4 Algorithme d'optimisation

Cet algorithme traite un calendrier existant pour trouver des créneaux horaires acceptables pour l'insertion d'une ou plusieurs réservations. Lorsque Manager-Agent ne parvient pas à placer une réservation soumise dans un cycle régulier, cet algorithme est utilisé pour tenter de placer une réservation, en remplaçant un autre avec une priorité moindre.

Agent-Manager essaie de placer, de manière itérative, les demandes non satisfaites. Pour chaque demande, l'algorithme analyse les réservations dans le timetabling en cours. Il répertorie tous les créneaux pouvant convenir et qui sont déjà occupés par des réservations mais qui sont moins prioritaires. Il sélectionne celui qui présente le coût virtuel le plus élevé. Il le remplace par celui qu'il cherche à placer. La demande délogée entre dans la liste des demandes non planifiées. L'algorithme s'arrête quand aucun remplacement n'est possible.

13.3.5 Performance metrics

Le logiciel de planification par blocs est conçu pour optimiser le taux d'occupation des salles de chirurgie tout en mettant l'accent sur la "commodité du chirurgien" dans chaque décision. Pour mesurer la performance de la méthode proposée, nous créons des indicateurs calculés automatiquement :

- 1) The satisfaction rate.

$$SI(j) = \frac{\sum_{ks=1}^{Nslot} S(j, ks) * Pref(j, ks) * d(ks)}{t_j}$$

- 2) The performance rate.

$$PI(j) = \frac{\sum_{ks=1}^{Nslot} S(j, ks) * d(ks)}{t_j}$$

3) The Occupation rate.

$$OI(j) = \frac{\sum_{ks=1}^{Nslot} S(j, ks) * d(ks)}{\sum_{ks=1}^{Nslot} d(ks)}$$

With:

$S(j, ks) = 1$ if j occupe ks , 0 Elsewhere

$d(ks)$ duration of ks

$Nslot = 12 * 12$ total number of timeslots

13.3.6 Formulation du problème MILP

Pour créer une version d'essai du problème et présenter la formulation correspondante, nous avons, avant d'établir la fonction objective, suivi des étapes et introduit un ensemble de restrictions afin de rendre le problème soluble. Nous avons utilisé des affectations d'objectifs pour chaque groupe chirurgical comme données préétablies et avons formulé quelques hypothèses sur les types de salles d'opération.

13.3.6.1 Définition des variables de décisions :

Pour cette version d'essai, il existe douze salles d'opération dans cet hôpital, chacune basée sur un exemple d'un horaire hebdomadaire particulier. Il y a 6 jours ouvrables par semaine, ainsi que neuf équipes chirurgicales qui seront affectées au programme principal. Cela nous donne les variables de décision, x_{ijk} , où :

$x_{ijk} = OR$ number type $(i) \in \{1, \dots, ntype\}$

assigned to the surgical team $(j) \in \{1, \dots, nteam\}$

on the shift $(k) \in \{1, \dots, nshift\}$

Le « i » indique le type de salle d'opération qui différenciera ceux qui sont exclusivement spécialisés dans l'exécution de certains types d'interventions chirurgicales.

Le "j" indique le groupe chirurgical (voir les données du test).

L'index k indique la référence d'un créneau horaire de travail. Il y a 12 quarts de travail : un pour AM et un pour PM du lundi au samedi (k allant de 1 à 12).

13.3.6.2 Fonction objective :

L'optimisation choisie consiste à minimiser la différence réduite et standardisée entre les heures demandées et les heures effectivement allouées et ceci pour toutes les équipes chirurgicales pour la semaine prévue. Nous avons inclus dans la fonction objective un « terme

de formulation » pour introduire des poids de pénalité pour les équipes du samedi et du vendredi, afin de limiter notre modèle d'attribution d'heures de travail non appréciées aux équipes de fin de semaine et de vendredi. Le problème d'optimisation consistera à minimiser la fonction suivante :

$$F = \Delta + \alpha \partial$$

$$\Delta = \sum_{j=1}^{j=nteam} \frac{\max(0, t_j - \sum_{i=1}^{ntype} \sum_{k=1}^{nshift} d_{ik} x_{ijk})}{t_j}$$

$$\partial = \sum_{j=1}^{j=nteam} \frac{\sum_{i=1}^{ntype} \sum_{k=9}^{12} d_{ik} x_{ijk}}{t_j}$$

Avec,

t_j Est le nombre total d'heures demandées par l'équipe chirurgicale "j",

d_{ik} Est le nombre cumulé d'heures d'interventions avec personnel dans OR type i pendant le quart de travail k.

Le nombre d'heures requis par les différents groupes chirurgicaux étant très variable, le choix de la fonction objective assure une certaine équité entre les équipes chirurgicales en minimisant la différence réduite normée plutôt que la différence absolue.

13.3.6.3 Contraintes :

1. À n'importe quel quart de travail k, et pour n'importe quel type de salle d'opération, le nombre total de salles d'opération prévues ne doit pas dépasser le nombre total de salles disponibles de ce type.

$$\forall k, \forall i, \quad \sum_j x_{ijk} \leq R_i$$

2. La somme des ORs de tous types alloués à l'équipe j à chaque quart de travail doit être inférieure au nombre total de médecins dans cette équipe sur ce quart de travail (S_{jk}).

$$\forall j, \forall k, \quad \sum_i x_{ijk} \leq S_{jk}$$

Pour notre exemple d'essai, nous considérons un bloc opératoire avec douze salles de chirurgie et huit types de salle d'opération. Dans ces salles d'opération, neuf équipes opèrent et sont formées avec des chirurgiens Sj .

Pour tenir compte des temps d'interruption possibles entre les interventions, le nombre d'heures effectives dans chaque quart de travail a été retouché. Ainsi, le quart de travail AM est réduit de cinq heures à 4,5 heures et le quart de travail PM est réduit de 3 heures à 2,25 heures effectives et ce pour chaque jour ouvrable du lundi au samedi. Cela donne une capacité hebdomadaire de 12 salles d'opération totalisant 486 heures d'ouverture disponibles (comparativement à la demande hebdomadaire cible de 566 heures).

13.3.6.4 Résultats de la simulation:

En utilisant la formulation présentée et en effectuant une simulation avec les données sélectionnées pour cet exemple d'essai, le calendrier obtenu répond à nos attentes, il n'y a pas de chevauchement des quarts de travail, et les deux ORs spécialisés fournissent l'équipe de chirurgie qu'ils sont qualifiés pour servir. De plus, nous avons obtenu les résultats suivants : le total, pour tous les groupes chirurgicaux des heures hebdomadaires allouées, est de 479,25 heures pour un total de 566 heures demandées. Le taux d'utilisation (temps de travail effectif alloué / capacité maximale en heures) est de 78,3 %. Nous avons développé un format d'horaire, avec les jours de la semaine répartis en lignes alors que les ORs (avec leur type de code couleur) en colonnes et les work-shifts d'interventions associées à chaque équipe (en code couleur) dans le corps de l'horaire.

13.3.7 Test expérimental

Tableau 6: cahier de charge

	Specialty	Target operating-time	Rooms
Team E	General Surgery	TE = 191 hours	Type 1= all – OR (11, 10)
Team H	Otolaryngology	TN = 30 hours	Type 1 + Pref(R7)
Team C	Ophthalmology	TU = 40 hours	Type 2 = OR 10
Team D	Gynecology	TW = 30 hours	Type 1 + Pref(OR9)
Team G	Urology	TS = 18 hours	Type 1 + Pref(OR2)
Team B	Pediatric Surgery	TP = 62 hours	Type 1 + Pref(R8, R12)
Team F	vascular, cardiac, thorax	TF = 121 hours	Type 3 = R11 + Pref(R1, R3)
Team A	Digestive	TA = 60 hours	Type 1
Team I	Neurosurgery	TI = 14 hours	Type 1 + Pref(OR8)

Tableau 7: planning résultat

MAS planner	Specialty	Target operating-time	Planned operating-time	Ratio
Team E	General Surgery	TE = 191 hours	TE = 164.25 hours	85.9 %
Team H	Otolaryngology	TN = 30 hours	TN = 24.75 hours	82.5 %
Team C	Ophthalmology	TU = 40 hours	TU = 33.75 hours	84.3 %
Team D	Gynecology	TW = 30 hours	TW = 24.75 hours	82.5 %
Team G	Urology	TS = 18 hours	TS = 13.5 hours	75 %
Team B	Pediatric Surgery	TP = 62 hours	TP = 56.25 hours	90.7 %
Team F	vascular, cardiac, thorax	TF = 121 hours	TF = 101.25 hours	83.6 %
Team A	Digestive	TA = 60 hours	TA = 49.5 hours	82.5 %
Team I	Neurosurgery	TI = 14 hours	TI = 11.25 hours	80.3 %
All		T = 566 hours	T = 479.25 hours	84.6 %

Tableau 8:Block scheduling par MILP

MILP		OR 1	OR 2	OR 3	OR 4	OR 5	OR 6	OR 7	OR 8	OR 9	OR1 0	OR1 1	OR1 2
MON	A M	E	E	E	E	E	E	E	B	B	C	F	G
	P M	A	E	E	E	A	H	A	B	G	C	F	A
TUES	A M	A	A	E	E	E	E	E	I	H	C	F	H
	P M	E	I	H	H	B	G	D	D	D	C	F	D
WED	A M	E	E	E	E	F	F	F	F	F	C	F	A
	P M	E	E	F	F	F	F	I	H	B	C	F	B
THUR S	A M	A	E	F	F	F	F	F	A	A	C	F	B
	P M	F	F	F	F	F	F	I	H	B	C	F	B
FRI	A M	E	E	E	E	E	E	E	E	E	C	F	E
	P M	A	E	E	E	E	E	I	B	B	C	F	G
SAT	A M	E	E	E	E	H	B	B	D	D		F	D
	P M	A	E	E	E	E	A	A	B	A		F	D

Tableau 9:Block scheduling par MAS

MAS planner		OR1 0	OR1 1	OR 1	OR 3	OR 4	OR 5	OR 6	OR 2	OR 7	OR 8	OR1 2	OR 9
				Pre f					pref	pref	pref	pref	pref
MON	A M	C	F	F	E	E	E	E	G	H	B	E	D
	P M	C	F	F	F	E	E	A	G	H	B	A	D
TUES	A M	C	F	F	E	E	E	E	A	H	I	B	D
	P M	C	F	F	F	E	E	A	G	A	I	B	D
WED	A M	C	F	F	E	E	E	E	E	H	B	A	A
	P M	C	F	F	F	E	E	A	G	A	I	B	D
THUR S	A M	C	F	F	F	E	E	E	E	H	B	B	A
	P M	C	F	F	E	E	A	A	G	H	I	B	D
FRI	A M	C	F	F	E	E	E	E	E	A	B	B	D
	P M	C	F	F	F	E	E	A	A	H	B	B	D
SAT	A M		F	F	F	E	E	E	E	E	B	B	E
	P M		F	F	F	E	E	E	E	E	B	A	A

14 Conclusion

Les approches d'optimisation conventionnelles des problèmes de planification et d'ordonnancement des interventions chirurgicales en bloc opératoire, dont la plupart relève de la recherche opérationnelle, ne peuvent pas tenir compte simultanément de toutes les contraintes de ressources humaines et matérielles et aboutissent donc à des solutions sous-optimales.

Concernant les fonctions de *planification statique* : Les modèles exacts transforment les contraintes en équations et cherchent la solution optimale en résolvant l'ensemble du système d'équations. Plus nous ajoutons de contraintes, plus le système sera compliqué et il sera difficile de trouver l'optimum. Dans MAS, les contraintes deviennent des règles à respecter. Leur nombre n'affecte pas la difficulté de trouver la solution optimale. En outre, MAS trouve la solution globale optimale en décidant, de manière itérative, du meilleur emplacement pour chaque "réservation individuelle". Ainsi, MAS traite une réservation à la fois, ce qui simplifie grandement la recherche de la solution optimale. Tout cela nous permet de conclure que l'approche MAS est bien meilleure pour la planification du bloc opératoire, car elle peut facilement prendre en charge un large éventail de contraintes.

Concernant les fonctions de *planification dynamique* : l'approche proposée basée sur l'intelligence artificielle distribuée dans un système de ressources multi-agents apporte une réponse appropriée au problème de révision en temps réel de la planification des blocs opératoires où les perturbations et aléas sont fréquents.

15 Conclusion générale

Le travail présenté dans ce manuscrit s'intéresse à la planification des interventions chirurgicales au sein des blocs opératoires hospitaliers.

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous avons introduit l'organisation des systèmes hospitaliers en soulignant la complexité inhérente à ces systèmes. Nous avons présenté les éléments économiques et sociaux justifiant l'intérêt particulier porté pour le secteur du bloc opératoire. Nous avons abordé les principales problématiques organisationnelles des blocs opératoires afin de mettre l'accent sur la complexité de la gestion de son processus. La programmation opératoire est au cœur de cette gestion, elle permet de préciser le lieu et le moment des interventions. La complexité du processus d'élaboration des programmes opératoires fait l'unanimité dans le monde de la recherche. Nous avons décrit les diverses stratégies utilisées pour la construction du programme opératoire de ce secteur hautement déterminant dans un hôpital[270]. La réflexion sur ces problématiques et sur les principaux enjeux d'amélioration visait un positionnement de nos travaux de recherche.

Pour cerner le besoin du « client » de notre étude et définir ainsi les objectifs de notre thèse, des audits ont été réalisés avec les cadres de gestion du bloc opératoire de deux hôpitaux, en France et au Liban [271]. Ces audits, nous ont permis de conclure à l'existence des lacunes sévères dans les pratiques actuelles. Malgré l'existence d'un squelette de planning *block scheduling* dans le CHU libanais, l'élaboration de la planification et de l'ordonnancements est effectuée en se basant sur la seule expérience du cadre de gestion du bloc, même si le programme opératoire est amendé et validé par le conseil de bloc formé de chirurgiens au jour j-2 de la période. L'outil utilisé pour l'élaboration du programme opératoire est juste un moyen intelligent de saisie du planning. Intelligent, dans le sens où il vérifie la validité du choix effectué par le cadre gestionnaire.

Le plus grand besoin exprimé est celui d'une aide à la décision, en temps quasi réel pour la gestion des interventions en situations d'urgence, proposant une planification et une affectation en fonction du type de pathologie, de la gravité de l'état du patient et du degré d'urgence de l'intervention. Cette affectation doit être précédée et accompagnée par la vérification de disponibilité sur place de toutes les ressources humaines et matérielles nécessaires au déroulement en toute sécurité de l'intervention. Le cadre de gestion a aussi besoin d'un moyen

automatique qui « corrige » les plannings du programme opératoire prévisionnel correspondant au temps restant pour absorber les perturbations engendrées par cette intervention imprévue. Toutes ces décisions et actions sont réalisées actuellement manuellement, sous pression, et nécessitent une multitude d'appels téléphoniques à l'ensemble des acteurs impliqués, par cette intervention chirurgicale d'urgence et par celles pré planifiées mais qui seront décalées.

De ce qui a précédé a émergé l'objectif de cette thèse : proposer une méthodologie de planification et d'aide à la conduite du processus du bloc opératoire dont l'intérêt principale est de permettre la planification prédictive la plus convenable tenant compte de toutes contraintes ou préférences exprimées mais aussi une planification suffisamment maniable pour gérer automatique les urgences et les imprévus afin d'améliorer la réactivité du processus.

Dans le deuxième chapitre, nous avons passé en vue les différentes approches concernant la problématique de planification et d'ordonnancement des interventions chirurgicales. Nous avons détaillé les travaux concernant les principaux problèmes liés à chaque sous-fonction de gestion du bloc opératoire à savoir: Dimensionnement des ressources ; Mise des patients au programme de chirurgie ; Planification des chirurgies ; Ordonnancement des interventions ; Gestion des ressources humaines et Evaluation de la performance. Cette aperçue nous a permis de constater l'hétérogénéité des objectifs, des méthodes de résolution et l'étendue des contraintes à prendre en compte. Pour bien cerner les approches conventionnelles concernant les deux problématiques de la gestion des interventions chirurgicales électives à savoir la planification prédictive et l'ordonnancement. La suite du chapitre 2 a été consacré à une analyse comparative suivi d'une synthèse des travaux et des publications apparues pendant les vingt dernières années. Le but initial de cet état d'art était de cibler la démarche d'amélioration qui serait à engager pour atteindre l'objectif de la thèse. Nous avons constaté que la complexité et la lourdeur des modèles existants souvent basés sur la recherche opérationnelle et surtout l'explosion combinatoire des contraintes rendent impossible de trouver l'optimum pour des tailles d'instances réalistes. Cela nous a décidé pour notre étude à rompre avec la stratégie classique d'amélioration continue. Nous avons privilégié une approche IAD pour rechercher des solutions par une logique programmée plutôt que par les résolutions calculées des approches traditionnelles.

Nous proposons une approche IAD et une démarche d'optimisation en termes d'un nouveau concept celui de la **meilleure convenance** de l'affectation des interventions chirurgicales. Notre

méthode visant la planification efficiente des interventions électives et la prise en charge rapide des urgences se pose sur le paradigme Système Multi-Agents couplé à un système expert des connaissances permettant ainsi la génération dynamique et réactive des planifications. Dans partie de notre travail nous avons publié [272], [273], [270]

Le troisième chapitre concerne un examen détaillé de la technologie MAS et ses méthodes utilisées pour concevoir notre approche par logique programmée fondée sur des agents planificateurs. Donc comment ces méthodologies peuvent-elles être articulées pour réaliser les diverses fonctions de planifications et contribuer à la construction d'un système de gestion intégral du processus du bloc opératoire ?

MAS a un comportement d'ensemble programmé visant à satisfaire les acteurs du bloc opératoire manager, gestionnaire, chirurgiens, anesthésistes, et patients en termes de convenance qui inclue conjointement les dimensions sociale, économique et technique.

L'approche de planification réactive est effectuée suite à une interaction dynamique et flexible entre l'agent manager et les agents chirurgiens d'un côté et les agents de salles de l'autre côté. Cette négociation permet de se coordonner afin de couvrir l'intégralité des interventions à planifier. Nous avons donc présenté dans ce chapitre les protocoles de négociation utilisés [272], [274].

En plus de la nouvelle approche adoptée pour solutionner la problématique de gestion du bloc opératoire, nous nous distinguons par rapport aux travaux existants par le fait d'avoir considéré un champ ouvert de contraintes. En effet chaque contrainte est une condition logique programmée à plus ou moins respecter tandis que dans les méthodes de résolution, une contrainte est une inéquation ferme qui vient grossir le système des inéquations à résoudre dans sa totalité. Il est évident que question temps de calcul et souplesse on peut reprendre l'expression bien connue « il n'y pas photo ».

Le chapitre 4 du mémoire,

1. Propose un modèle d'architecture fondée sur l'hybridation du contrôle permettant de gérer l'intégralité du processus du bloc opératoire de chirurgies. Cette partie concerne une construction de l'architecture de contrôle hybride. Ce contrôle est hybride en ce sens que l'architecture est composée de deux niveaux (global avec "contrôle hiérarchique" et local avec "un pilotage coopératif"). L'objectif est double: optimiser la performance globale du processus "opérationnel" et augmenter sa réactivité aux perturbations. Dans cette partie nous avons publié [275], [271]
2. Propose un système multi-agents pour le contrôle et la gestion d'un ensemble distribué de salles d'opération constituant le bloc opératoire des chirurgies. Un modèle à base de sept types d'agents a été construit. Ce modèle nous permet non seulement d'avoir une certaine systématisation de plusieurs pratiques dans l'enchaînement des étapes (architecture hybride de contrôle) du processus du bloc opératoire mais aussi une meilleure coordination entre les étapes avec une prise en compte des préférences des chirurgiens. Le modèle est mis en œuvre pour formaliser les modules de base du système de gestion à savoir : le block scheduling, la planification statique, la planification dynamique, l'affectation des urgences. Dans cette partie nous avons publié [270], [274], [273].

16 Perspectives

Ce travail ouvre des perspectives d'une mutation de la recherche dans ce domaine. Pendant une vingtaine d'années, les tableaux de commandes des machines industrielles ont été réalisés avec de la logique câblée. Chaque condition ou relation est un composant et plusieurs fils de connexions. Puis apparaissent les automates avec leur logique programmée, chaque condition ou relation est une ligne dans un programme informatique. Concernant les possibilités, la rapidité, la fiabilité, la précision, l'efficacité et surtout la souplesse « il n'y a pas photo » entre les deux technologies. Pendant une vingtaine d'année les chercheurs dans le domaine du processus du bloc opératoire n'ont pas manqué d'ingéniosité pour résoudre les systèmes d'inéquations complexes modélisant les contraintes en minimisant ou maximisant des fonctions objectives. La littérature de cette approche est tellement abondante qu'on ne trouve presque plus un espace d'amélioration. Avec l'approche IAD, chaque contrainte, règle ou préférence est une connaissance cumulée, la solution convenable émerge de l'interaction entre les agents du système modélisant le processus de planification. Plus cette connaissance est riche plus la solution est convenable. C'est une évolution de l'ère de la recherche opérationnelle vers celle de l'intelligence artificielle et de l'ingénierie de la connaissance. C'est une opportunité de passage des colonies de fourmis aux colonies des agents intelligents.

En tant que perspective nous pensons que cette approche IAD et ce modèle MAS peut apporter les solutions convenables pour des problématiques ressemblantes de planification dans d'autres domaines comme par exemple celui de la distribution de l'énergie dans un smart grid . Ainsi en marge de nos travaux sur la planification de bloc opératoire, nous avons utilisé un modèle MAS et des mécanismes de planification très proche de ceux du bloc opératoire pour la création et l'optimisation d'un calendrier d'alimentation électrique tout en prenant en compte un large éventail de contraintes ou de préférences. Dans cette partie de notre travail nous avons publié [276]

En perspective pour le domaine du bloc opératoire, nous situons le développement d'une maquette de démonstration pour évaluer et valider l'application de cette approche sur des instances hebdomadaires réelles d'intervention chirurgicales. Le vrai outil utilisable viendrait

ultérieurement. Il doit être doté d'une solide et vaste base de données des règles et des connaissances formant la base de processus d'aide à la décision. Il doit intégrer des moyens de prise de décision multicritères et une conception automatique des indicateurs de performance du bloc opératoire mais aussi de l'outil lui-même. Les interfaces doivent être conviviales et ergonomiques facilitant une acceptation de l'outil sur le terrain. Cet outil respire par la connaissance donc il est impératif d'intégrer tous les passerelles d'accès aux sources d'informations pour bénéficier des flux informationnels. Chacun des thèmes évoqué forme à lui seul le sujet d'une thèse de recherche. Nous pouvant juste espéré de ne pas attendre vingt ans avant d'obtenir cet outil.

Enfin une dernière idée de perspective dans le domaine du bloc opératoire, à l'attention de Dr Sandos Chaaban l'une des pionniers de ce domaine et qui nous a honoré d'être dans le jury de notre thèse : Study of the "activeness" concept in a Physical Internet context and real-time supervision of the operating theater process.

The final word



Avoid doing studies that are not useful to us and that satisfy only their authors. Do something that helps us when we are overwhelmed, those are human lives that are concerned.

**Operating theater manager
American University Hospital of Lebanon**

- [1] 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-sante-en-.html>.
- [2] « L'hôpital face à de nouveaux défis, La démographie médicale La réduction du temps de travail à l'hôpital Les urgences médicales Les infections nosocomiales. La politique hospitalière. Politiques publiques - repères - vie-publique.fr », 2015. sur: <https://www.vie-publique.fr/politiques-publiques/politique-hospitaliere/nouveaux-defis-hopital/>.
- [3] S. Hammami, S. Khraja, A. Hadj Alouan, P. Ladet, et E. Macron, « Approche pour la construction d'un plan directeur flexible d'allocation des plages horaires pour la programmation opératoire », *Actes de la Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers GISEH04, Mons, Belgique, Septembre.*, 2004.
- [4] E. Minvielle, « Gérer la Singularité à grande échelle », Thèse de doctorat en sciences de gestion, école polytechnique, Paris, 1996.
- [5] B. Denton, J. Viapiano, et A. Vogl, « Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty », *Health Care Manag. Sci.*, vol. 10, n° 1, p. 13-24, févr. 2007.
- [6] A. Macario, T. S. Vitez, B. Dunn, et T. McDonald, « Where are the costs in perioperative care? Analysis of hospital costs and charges for inpatient surgical care », *Anesthesiology*, vol. 83, n° 6, p. 1138-1144, déc. 1995.
- [7] M. Revel, G. Nicolas, C. Bara, M. O. Moreau, D. Nicolle, et M. Duret, « Synthèse des travaux du groupe sur l'implantation et l'organisation des plateaux techniques », p. 35, 2003.
- [8] H. Fei, « Vers un outil d'aide à la planification et à l'ordonnancement des blocs opératoires », Thèse de Doctorats, Facultés Universitaires Catholiques de Mons (Belgique) et Université de Technologie de Troyes (France), 2006.
- [9] Beaubau et Thomson, « IRDES Institut de recherche et documentation en économie de la santé : Lettre d'information, novembre 2002 ». [En ligne]. Disponible sur:

- [10] S. CHAABANE, « Gestion prédictive des Blocs Opératoires », Informatique et Systèmes Coopératifs pour l'Entreprise, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2004.
- [11] S. Kharraja, « Outils d'aide à la planification et l'ordonnancement des plateaux médico-techniques », Saint-Etienne : Université Jean-Monnet, 2003.
- [12] B. Besombes, L. Trilling, et A. Guinet, « Conduite du changement dans le cadre du regroupement de plateaux médicotéchniques. Apport de la modélisation d'entreprise », *J. Eur. Systèmes Autom.*, vol. 38, n° 6, p. 691-723.
- [13] S. Massip, « Analyse du développement de la chirurgie ambulatoire au CHU de Toulouse », p. 115, 2001.
- [14] (Jean) CASTEX, C. (Jean) / préf, S. (Didier) / préf, L. (Alain) / dir, T. (Dominique) / dir, et DEJEAN (Dominique), *Gestion et organisation des blocs opératoires dans les hôpitaux et cliniques. Recueil des bonnes pratiques organisationnelles observées*. Paris: Berger-Levrault, 2006.
- [15] A. Jebali, « Vers un outil d'aide à la planification et à l'ordonnancement des ressources dans les services de soins », Thèse de Doctorats, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2004.
- [16] J. M. Magerlein et J. B. Martin, « Surgical demand scheduling: a review. », *Health Serv. Res.*, vol. 13, n° 4, p. 418-433, 1978.
- [17] P. Patterson, *What makes a well-oiled scheduling system?*, vol. 12. 1996.
- [18] S. N. Ogulata et R. Erol, « A Hierarchical Multiple Criteria Mathematical Programming Approach for Scheduling General Surgery Operations in Large Hospitals », *J. Med. Syst.*, vol. 27, n° 3, p. 259-270, juin 2003.
- [19] « Une tentative d'unification et de résolution des problèmes de modélisation et d'optimisation dans les systèmes hospitaliers . Application au nouvel hôpital Estaing », Thèse de Doctorats informatique, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, France, 2010.
- [20] A. Jebali, A. B. Hadj Alouane, et P. Ladet, « Operating rooms scheduling », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 99, n° 1-2, p. 52-62, 2005.

- [21] J. T. Blake et M. W. Carter, « Surgical process scheduling: a structured review », *J. Soc. Health Syst.*, vol. 5, n° 3, p. 17-30, 1997b.
- [22] D. Rossi-Turck, « Comment garantir la qualité et la sécurité au bloc opératoire par une programmation et une logistique innovante », *Santé Systémique*, vol. 6, p. 179–196., 2002.
- [23] P. Patterson, « Is an 80% to 85% utilization a realistic target for ORs? », *OR Manager*, vol. 13, n° 5, p. 1, 10-13, mai 1997.
- [24] « Operating Room Scheduling - Przasnyski - 1986 - AORN Journal - Wiley Online Library ». [En ligne]. Disponible sur: <https://aornjournal.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1016/S0001-2092%2807%2965204-1>. [Consulté le: 07-juill-2019].
- [25] M. H. Kennedy, « Bin-packing, knapsack and Chance-Constrained Application to operating room scheduling . Doctoral dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY. », 1992.
- [26] J. T. Blake et M. W. Carter, « Surgical process management: a conceptual framework », *Surg. Serv. Manag.*, vol. 3, n° 9, p. 31–37, 1997a.
- [27] Kontak-Forsyth, M. and Grant, et A.E., « OR booking policy: development and implementation », *Can. Nurs. J.*, vol. 13, n° 1.
- [28] V. Malhotra, « Nuts and bolts of OR management », *52nd Annu. Refresh. Cours Lect. Clin. Updat. Basic Sci. Rev. Annu. Meet. Am. Soc. Anesthesiol. Oct.*, p. 13-17, 2001.
- [29] N. H. Saadani, A. Guinet, et S. Chaabane, « Ordonnancement des blocs opératoires », *Conférence Francoph. Modélisation Simul. Maroc*.
- [30] S. Kharraja, F. Albert, et S. CHAABANE, « ‘Blocs opératoires publics: application de la stratégie block scheduling », *Modélisation Simul. MOSIM*, 2006.
- [31] J. N. D. Gupta, « Two-Stage, Hybrid Flowshop Scheduling Problem », *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 39, n° 4, p. 359-364, avr. 1988.
- [32] R. Ruiz et J. A. V. Rodríguez, « The hybrid flow shop scheduling problem », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 205, p. 1-18, 2010.
- [33] I. Ribas, R. Leisten, et J. M. Framiñan, « Review: Review and Classification of Hybrid Flow Shop Scheduling Problems from a Production System and a Solutions Procedure Perspective », *Comput Oper Res*, vol. 37, n° 8, p. 1439–1454, août 2010.

- [34] N. Lafon et S. Landry, « Gérer plus efficacement les stocks du bloc opératoire à partir de la programmation des interventions chirurgicales », *Gest. Hosp.*, n° 405, avr. 2001.
- [35] V. Augusto, X. Xie, et V. Perdomo, « Operating theatre scheduling using Lagrangian relaxation », *Eur. J. Ind. Eng.*, vol. 2, n° 2, p. 172-189, janv. 2008.
- [36] A. Macario, « Are your operating rooms ‘efficient’? », *OR Manager*, vol. 23, n° 12, déc. 2007.
- [37] M. Lamiri, F. Grimaud, et X. Xie, « Optimization methods for a stochastic surgery planning problem », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 120, n° 2, p. 400-410, 2009.
- [38] E. W. Hans, G. Wullink, M. van Houdenhoven, et G. Kazemier, « Robust surgery loading », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 185, n° 3, p. 1038-1050, 2008.
- [39] A. Testi et E. Tanfani, « Tactical and operational decisions for operating room planning: Efficiency and welfare implications », *Health Care Manag. Sci.*, vol. 12, n° 4, p. 363-373, 2009.
- [40] J. M. Van Oostrum, M. Van Houdenhoven, J. L. Hurink, E. W. Hans, G. Wullink, et Kazemier, « A master surgical scheduling approach for cyclic scheduling in operating room departments | SpringerLink », *Spectr.*, vol. 30, p. 355-374, 2008.
- [41] S. Hammami, « Aide a la decision dans le pilotage des flux materiels et patients d’un plateau medico-technique », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [42] M. Lamiri, X. Xie, A. Dolgui, et F. Grimaud, *A stochastic model for operating Room planning with elective and emergency demand for surgery*, vol. 185. 2008.
- [43] V. Augusto, X. Xie, et V. Perdomo, « Operating Theatre Scheduling with Patient Recovery in Both Operating Rooms and Recovery Beds », *Comput Ind Eng*, vol. 58, n° 2, p. 231–238, mars 2010.
- [44] Gille Florence, « Organisation et performance du bloc opératoire », Thèse de Doctorats, Ecole des Hautes Etudes en santé Publique, 2008.
- [45] C. Romeyer et I. Bongiovanni, « Les systèmes d’information hospitaliers, vecteurs de changement organisationnel : vers l’émergence d’un système d’information traçant l’activité », p. 9.

- [46] S. D. Lapierre, C. Batson, et S. McCaskey, « Improving on-time performance in health care organizations: a case study », *Health Care Manag. Sci.*, vol. 2, n° 1, p. 27-34, mars 1999.
- [47] M. González-Martínez, J. Borges, J. Navarro, et N. J. Rodríguez, « An Automatic Resource Scheduling System (ARSS) », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 33, p. 295-298, oct. 1997.
- [48] I. H. Wright, C. Kooperberg, B. A. Bonar, et G. Bashein, « Statistical modeling to predict elective surgery time. Comparison with a computer scheduling system and surgeon-provided estimates », *Anesthesiology*, vol. 85, n° 6, p. 1235-1245, déc. 1996.
- [49] A. Thomas, T. Klein, H. El Haouzi, et S. Belmoktar, « Architecture de systèmes contrôlés par la produit pour un environnement de juste à temps - PDF », MOSIM 08, Paris, France.
- [50] D. McFarlane, S. Sarma, J. L. Chirn, C. Y. Wong, et K. Ashton, « Auto ID systems and intelligent manufacturing control », *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 16, n° 4, p. 365-376, juin 2003.
- [51] « The Ottawa Report on Reference Models for Manufacturing Standards, ISO TC184/SC5/WG1 N51, Version 1.1. », *Int. Organ. Stand.* 1986.
- [52] S. Bousbia et D. Trentesaux, *Self-organization in distributed manufacturing control: State-of-the-art and future trends*, vol. 5. 2002.
- [53] L. Zaffalon et P. Berguet, « Programmation concurrente et temps réel en ADA 95 », *Collect. Inform. Presse Polytech. Univ. Romandes*, 1995.
- [54] A. J. Davenport et J. C. Beck, « A survey of techniques for scheduling with uncertainty », *Tech. Rep. IBM Ilog*, 2000.
- [55] D. Trentesaux, « Les systèmes de pilotage hétérarchiques : innovations réelles ou modèles stériles ? », *J. Eur. Systèmes Autom. JESA*, vol. 41, n° 9-10, p. 1165-1202, 2007.
- [56] H. Brussel, J. Wyls, P. Valckenaers, L. Bongaerts, et P. Peeters, *Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA*, vol. 37. 1998.
- [57] C. Artigues, J.-C. Billaut, et C. Esswein, « Maximization of solution flexibility for robust shop scheduling », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 165, n° 2, p. 314-328, sept. 2005.

- [58] J. Balasubramanian et I. E. Grossmann, « Scheduling optimization under uncertainty—an alternative approach », *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, n° 4, p. 469-490, avr. 2003.
- [59] A. D. Yimer et K. Demirli, « Fuzzy scheduling of job orders in a two-stage flowshop with batch-processing machines », *Int. J. Approx. Reason.*, vol. 50, n° 1, p. 117-137, janv. 2009.
- [60] O. Cardin, « Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production – Application à un système flexible de production », p. 151.
- [61] T. Klein et A. Thomas, « An emulation-based execution control system evaluation tool Application to a furniture manufacturing group », *Int. J. Simul. Process Model.*, p. Accepted paper, 2009.
- [62] A. Thomas et P. Charpentier, « Reducing simulation models for scheduling manufacturing facilities », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 161, p. 111-125, 2005.
- [63] L. Puigjaner et D. Ruiz, « On-line fault diagnosis system support for reactive scheduling in multipurpose batch chemical plants », *Comput. Amp Chem. Eng.*
- [64] K. B. Kanakamedala, G. Reklaitis, et V. Venkatasubramanian, *Reactive schedule modification in multipurpose batch chemical plants*, vol. 33. 1994.
- [65] J. Roslöf, I. Harjunkoski, J. Björkqvist, S. Karlsson, et T. Westerlund, « An MILP-based reordering algorithm for complex industrial scheduling and rescheduling », *Comput. Chem. Eng.*, vol. 25, n° 4, p. 821-828, mai 2001.
- [66] D. Trentesaux, « Distributed control of production systems », *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 22, n° 7, p. 971-978, oct. 2009.
- [67] V. Marik et D. McFarlane, « Industrial adoption of agent-based technologies », *IEEE Intell. Syst.*, vol. 20, n° 1, p. 27-35, janv. 2005.
- [68] D. Veeramani, B. Bhargava, et M. M. Barash, « Information system architecture for heterarchical control of large FMSs », *Comput. Integr. Manuf. Syst.*, vol. 6, n° 2, p. 76-92, mai 1993.
- [69] F. Ounnar et P. Pujo, « Isoarchic and Multi-criteria Control of Supply Chain Network », in *Artificial Intelligence Techniques for Networked Manufacturing Enterprises Management*, L. Benyoucef et B. Grabot, Éd. Springer-Verlag, 2010, p. Chap 6.

- [70] C. Pach, « ORCA : architecture hybride pour le contrôle de la myopie dans le cadre du pilotage des systèmes flexibles de production », déc. 2013.
- [71] G. Zambrano, C. Pach, N. Aissani, T. Berger, et D. Trentesaux, « An approach for temporal myopia reduction in Heterarchical Control Architectures », in *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2011, p. 1767-1772.
- [72] F. Guerriero et R. Guido, « Operational research in the management of the operating theatre: a survey », *Health Care Manag. Sci.*, vol. 14, n° 1, p. 89-114, mars 2011.
- [73] R. L. Jackson, « The business of surgery. Managing the OR as a profit center requires more than just IT. It requires a profit-making mindset, too », *Health Manag. Technol.*, vol. 23, n° 7, p. 20-22, juill. 2002.
- [74] B. Cardoen, E. Demeulemeester, et J. Beliën, « Operating room planning and scheduling: A literature review », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 201, n° 3, p. 921-932, mars 2010.
- [75] J. H. May, W. E. Spangler, D. P. Strum, et L. G. Vargas, « The surgical scheduling problem: Current research and future opportunities. Production and Operations Management », vol. 20, n° 3, p. 392-405, mai 2011.
- [76] I. J. B. F. Adan et J. M. H. Vissers, « Patient mix optimisation in hospital admission planning: a case study », *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, avr. 2002.
- [77] J. T. Blake et M. W. Carter, « A goal programming approach to strategic resource allocation in acute care hospitals », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 140, n° 3, p. 541-561, août 2002.
- [78] A. Testi, E. Tanfani, et G. Torre, « A three-phase approach for operating theatre schedules », *Health Care Manag. Sci.*, vol. 10, n° 2, p. 163-172, juin 2007.
- [79] R. E. Wachtel et F. Dexter, « Tactical increases in operating room block time for capacity planning should not be based on utilization », *Anesth. Analg.*, vol. 106, n° 1, p. 215-226, table of contents, janv. 2008.
- [80] J. Beliën et E. Demeulemeester, « Building cyclic master surgery schedules with leveled resulting bed occupancy », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 176, n° 2, p. 1185-1204, janv. 2007.

- [81] J. Beliën et E. Demeulemeester, « A branch-and-price approach for integrating nurse and surgery scheduling », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 189, n° 3, p. 652-668, sept. 2008.
- [82] H. Fei, C. Chu, et N. Meskens, « Solving a tactical operating room planning problem by a column-generation-based heuristic procedure with four criteria », *Ann. Oper. Res.*, vol. 166, n° 1, p. 91, août 2008.
- [83] I. Marques, M. E. Captivo, et M. Vaz Pato, « An integer programming approach to elective surgery scheduling », *Spectr.*, vol. 34, n° 2, p. 407-427, avr. 2012.
- [84] I. Ozkarahan, « Allocation of Surgeries to Operating Rooms by Goal Programming », *J. Med. Syst.*, vol. 24, n° 6, p. 339-378, déc. 2000.
- [85] E. W. Hans, M. van Houdenhoven, et P. J. H. Hulshof, « A Framework for Healthcare Planning and Control », in *Handbook of Healthcare System Scheduling*, R. Hall, Éd. Boston, MA: Springer US, 2012, p. 303-320.
- [86] A. Riise et E. K. Burke, « Local search for the surgery admission planning problem », *J. Heuristics*, vol. 17, p. 389-414, 2011.
- [87] B. Cardoen, E. Demeulemeester, et J. Beliën, « Optimizing a multiple objective surgical case sequencing problem », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 119, n° 2, p. 354-366, juin 2009.
- [88] C. Van Huele et M. Vanhoucke, « Analysis of the integration of the physician rostering problem and the surgery scheduling problem », *J. Med. Syst.*, vol. 38, n° 6, p. 43, juin 2014.
- [89] B. Vijayakumar, P. J. Parikh, R. Scott, A. Barnes, et J. Gallimore, « A dual bin-packing approach to scheduling surgical cases at a publicly-funded hospital », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 224, n° 3, p. 583-591, févr. 2013.
- [90] D. Min et Y. Yih, « Scheduling elective surgery under uncertainty and downstream capacity constraints », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 206, n° 3, p. 642-652, nov. 2010.
- [91] M. Lamiri, F. Grimaud, et X. Xie, « Optimization methods for a stochastic surgery planning problem », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 120, n° 2, p. 400-410, août 2009.
- [92] J. T. van Essen, J. L. Hurink, W. Hartholt, et B. J. van den Akker, « Decision support system for the operating room

- rescheduling problem », *Health Care Manag. Sci.*, vol. 15, n° 4, p. 355-372, déc. 2012.
- [93] B. Roland, C. Di Martinelly, F. Riane, et Y. Pochet, « Scheduling an operating theatre under human resource constraints », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 58, n° 2, p. 212-220, mars 2010.
- [94] A. A. Weinbroum, P. Ekstein, et T. Ezri, « Efficiency of the operating room suite », *Am. J. Surg.*, vol. 185, n° 3, p. 244-250, mars 2003.
- [95] H. Fei, N. Meskens, et C. Chu, « A planning and scheduling problem for an operating theatre using an open scheduling strategy », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 58, n° 2, p. 221-230, mars 2010.
- [96] M. Lamiri, J. Dreao, et X. Xie, « Operating Room Planning with Random Surgery Times », in *2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2007, p. 521-526.
- [97] M. Lamiri, X. Xie, et S. Zhang, « Column generation approach to operating theater planning with elective and emergency patients », *IIE Trans.*, vol. 40, n° 9, p. 838-852, juill. 2008.
- [98] F. Dexter, A. Macario, et R. D. Traub, « Which algorithm for scheduling add-on elective cases maximizes operating room utilization? Use of bin packing algorithms and fuzzy constraints in operating room management », *Anesthesiology*, vol. 91, n° 5, p. 1491-1500, nov. 1999.
- [99] Y. Liu, C. Chu, et K. Wang, « A new heuristic algorithm for the operating room scheduling problem », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 61, n° 3, p. 865-871, oct. 2011.
- [100] G. Somayeh, S. Mohammad Mehdi, P. Shadpour, et A. Atighehchian, « Operating Room Scheduling in Teaching Hospitals », janv. 2012.
- [101] S. Hossein Hashemi Doulabi, L.-M. Rousseau, et G. Pesant, *A Constraint Programming-Based Column Generation Approach for Operating Room Planning and Scheduling*. 2014.
- [102] R. M'Hallah et A. H. Al-Roomi, « The planning and scheduling of operating rooms: A simulation approach », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 78, p. 235-248, déc. 2014.
- [103] I. Marques, M. E. Captivo, et M. Vaz Pato, « Scheduling elective surgeries in a Portuguese hospital using a genetic heuristic », *Oper. Res. Health Care*, vol. 3, n° 2, p. 59-72, juin 2014.

- [104]N. Meskens, D. Duvivier, et A. Hanset, « Multi-objective operating room scheduling considering desiderata of the surgical team », *Decis. Support Syst.*, vol. 55, n° 2, p. 650-659, mai 2013.
- [105]D.-N. Pham et A. Klinkert, « Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 185, n° 3, p. 1011-1025, mars 2008.
- [106]Z. Zhao et X. Li, « Scheduling elective surgeries with sequence-dependent setup times to multiple operating rooms using constraint programming », *Oper. Res. Health Care*, vol. 3, n° 3, p. 160-167, sept. 2014.
- [107]B. Zheng, O. N. M. Panton, et T. A. Al-Tayeb, « Operative length independently affected by surgical team size: data from 2 Canadian hospitals », *Can. J. Surg.*, vol. 55, n° 6, p. 371-376, déc. 2012.
- [108]M. A. Cassera, B. Zheng, D. V. Martinec, C. M. Dunst, et L. L. Swanström, « Surgical time independently affected by surgical team size », *Am. J. Surg.*, vol. 198, n° 2, p. 216-222, août 2009.
- [109]W. R. Chitwood *et al.*, « Robotic surgical training in an academic institution », *Ann. Surg.*, vol. 234, n° 4, p. 475-484; discussion 484-486, oct. 2001.
- [110]P. C. Giulianotti *et al.*, « Robotics in general surgery: personal experience in a large community hospital », *Arch. Surg. Chic. Ill* 1960, vol. 138, n° 7, p. 777-784, juill. 2003.
- [111]D. J. Power et R. Sharda, « Model-driven decision support systems: Concepts and research directions », *Decis. Support Syst.*, vol. 43, n° 3, p. 1044-1061, avr. 2007.
- [112]K. A. Powers *et al.*, « Simulated laparoscopic operating room crisis: An approach to enhance the surgical team performance », *Surg. Endosc.*, vol. 22, n° 4, p. 885-900, avr. 2008.
- [113]S. H. Parker, S. Yule, R. Flin, et A. McKinley, « Surgeons' leadership in the operating room: an observational study », *Am. J. Surg.*, vol. 204, n° 3, p. 347-354, sept. 2012.
- [114]M. Bridges et D. L. Diamond, « The financial impact of teaching surgical residents in the operating room », *Am. J. Surg.*, vol. 177, n° 1, p. 28-32, janv. 1999.
- [115]A. T. Ludwig, L. Inampudi, M. A. O'Donnell, K. J. Kreder, R. D. Williams, et B. R. Konety, « Two-surgeon versus single-surgeon radical cystectomy and urinary diversion: impact on

- patient outcomes and costs », *Urology*, vol. 65, n° 3, p. 488-492, mars 2005.
- [116] M. S. Akturk et T. Ilhan, « Single CNC machine scheduling with controllable processing times to minimize total weighted tardiness », *Comput. Oper. Res.*, vol. 38, n° 4, p. 771-781, avr. 2011.
- [117] E. DEMEULEMEESTER, B. D. REYCK, et W. HERROELEN, « The discrete time/resource trade-off problem in project networks: a branch-and-bound approach », *IIE Trans.*, vol. 32, n° 11, p. 1059-1069, nov. 2000.
- [118] C.-T. Tseng, C.-J. Liao, et K.-L. Huang, « Minimizing total tardiness on a single machine with controllable processing times », *Comput. Oper. Res.*, vol. 36, n° 6, p. 1852-1858, juin 2009.
- [119] B. Dodin et A. A. Elimam, « Audit scheduling with overlapping activities and sequence-dependent setup costs », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 97, n° 1, p. 22-33, févr. 1997.
- [120] A. Drexl, « Scheduling of Project Networks by Job Assignment », *Manag. Sci.*, vol. 37, n° 12, p. 1590-1602, déc. 1991.
- [121] V. Valls, Á. Pérez, et S. Quintanilla, « Skilled workforce scheduling in Service Centres », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 193, n° 3, p. 791-804, mars 2009.
- [122] Y. Kara, C. Özgüven, N. Yalçın, et Y. Atasagun, « Balancing straight and U-shaped assembly lines with resource dependent task times », *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, n° 21, p. 6387-6405, nov. 2011.
- [123] S. P. Devi, K. S. Rao, et S. S. Sangeetha, « Prediction of surgery times and scheduling of operation theaters in ophthalmology department », *J. Med. Syst.*, vol. 36, n° 2, p. 415-430, avr. 2012.
- [124] M. E. Bruni, P. Beraldi, et D. Conforti, « A stochastic programming approach for operating theatre scheduling under uncertainty », *IMA J. Manag. Math.*, vol. 26, n° 1, p. 99-119, janv. 2015.
- [125] B. Addis, G. Carello, A. Grosso, et E. Tanfani, « Operating room scheduling and rescheduling: a rolling horizon approach », *Flex. Serv. Manuf. J.*, vol. 28, janv. 2015.
- [126] P. Cappanera, F. Visintin, et C. Banditori, « Addressing Conflicting Stakeholders' Priorities in Surgical Scheduling by Goal Programming. », *Flex. Serv. Manuf. J.*, vol. 30, janv. 2017.

- [127]B. T. Denton, A. J. Miller, H. J. Balasubramanian, et T. R. Huschka, « Optimal Allocation of Surgery Blocks to Operating Rooms Under Uncertainty », *Oper. Res.*, vol. 58, n° 4-part-1, p. 802-816, mars 2010.
- [128]S. Rachuba et B. Werners, « A robust approach for scheduling in hospitals using multiple objectives », *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 65, p. 546-556, mars 2014.
- [129]Y. Wang, J. Tang, et R. Fung, « A column-generation-based heuristic algorithm for solving operating theater planning problem under stochastic demand and surgery cancellation risk », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 158, p. 28–36, déc. 2014.
- [130]P. Landa, R. Aringhieri, P. Soriano, E. Tanfani, et A. Testi, « A hybrid optimization algorithm for surgeries scheduling », *Oper. Res. Health Care*, vol. 8, p. 103-114, mars 2016.
- [131]D. Conforti, F. Guerriero, et R. Guido, « 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)*, 2010, p. 1-5.
- [132]E. Marcon, K. Said, et S. Gerard, « 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)*, 2001, p. 675-680 vol.1.
- [133]E. Marcon, S. Kharraja, et G. Simonnet, « The operating theatre planning by the follow-up of the risk of no realization », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 85, n° 1, p. 83-90, juill. 2003.
- [134]L. Dekhici et B. Khaled, « Operating Theatre scheduling under constraints », *J. Appl. Sci.*, vol. 14, n° 10, p. 1380-1388, juin 2010.
- [135]G. X. Huang *et al.*, « Surgical Scheduling Based on Hybrid Flow-Shop Scheduling », *Applied Mechanics and Materials*, 2012. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scientific.net/AMM.201-202.1004>. [Consulté le: 13-juill-2019].
- [136]W. Yu, M. Yunhui, Z. Huabo, et T. Jiafu, « A particle swarm optimization algorithm on the surgery scheduling problem with downstream process », in *2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2013, p. 850-855.

- [137]S. Lee et Y. Yih, « Reducing patient-flow delays in surgical suites through determining start-times of surgical cases », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 238, n° 2, p. 620-629, oct. 2014.
- [138]A. Guinet et S. CHAABANE, « Operating theatre planning », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 85, n° 1, p. 69-81, juill. 2003.
- [139]H. W. Kuhn, « The Hungarian Method for the Assignment Problem », in *50 Years of Integer Programming*, 2010.
- [140]A. Jebali, A. B. Hadj Alouane, et P. Ladet, « Operating rooms scheduling », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 99, n° 1-2, p. 52-62, janv. 2006.
- [141]J. Framinan, R. Leisten, et C. Rajendran, « Different initial sequences for the heuristic of Nawaz, Ensore and Ham to minimize makespan, idle time or flowtime in the static permutation flowshop sequencing problem », *Int. J. Prod. Res. - INT J PROD RES*, vol. 41, p. 121-148, janv. 2003.
- [142]V. Perdomo, V. Augusto, et X. Xie, « Operating Theatre Scheduling Using Lagrangian Relaxation », présenté à *European Journal of Industrial Engineering - EUR J IND ENG*, 2006, vol. 2, p. 1234-1239.
- [143]S.-C. Kim, I. Horowitz, K. K. Young, et T. A. Buckley, « Analysis of capacity management of the intensive care unit in a hospital », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 115, n° 1, p. 36-46, mai 1999.
- [144]K. Seung-Chul, H. Ira, Y. Karl K, et B. Thomas A, « Flexible bed allocation and performance in the intensive care unit », *J. Oper. Manag.*, vol. 18, n° 4, p. 427-443, juin 2000.
- [145]S.-C. Kim et I. Horowitz, « Scheduling hospital services: the efficacy of elective-surgery quotas », *Omega*, vol. 5, n° 30, p. 335-346, 2002.
- [146]N. Smolski, E. Marcon, S. Chaabane, B. Luquet, et J. Viale, « Impact des stratégies de brancardage sur l'occupation de la SSPI: étude par simulation », *44ème Congrès Natl. D'Anesthésie Réanimation*, p. 19-22, 2002.
- [147]V. N. Hsu, R. de Matta, et C.-Y. Lee, « Scheduling patients in an ambulatory surgical center », *Nav. Res. Logist. NRL*, vol. 50, n° 3, p. 218-238, 2003.
- [148]B. Roland, C. D. Martinelly, et F. Riane, « Operating Theatre Optimization : A Resource-Constrained Based Solving Approach »,

- in 2006 *International Conference on Service Systems and Service Management*, 2006, vol. 1, p. 443-448.
- [149] S. Chaabane, N. Meskens, A. Guinet, et M. Laurent, « Comparaison des performances des politiques de programmation opératoire », *Logistique Manag.*, vol. 15, n° 1, p. 17-26, janv. 2007.
- [150] E. Erdem, X. Qu, et J. Shi, « Rescheduling of Elective Patients Upon the Arrival of Emergency Patients », *Decis Support Syst*, vol. 54, n° 1, p. 551–563, déc. 2012.
- [151] I. Ozkarahan, « Allocation of surgical procedures to operating rooms. », *J. Med. Syst.*, vol. 19, n° 4, p. 333-352, août 1995.
- [152] Y. Gerchak, D. Gupta, et M. Henig, « Reservation Planning for Elective Surgery Under Uncertain Demand for Emergency Surgery », *Manag. Sci.*, vol. 42, n° 3, p. 321-334, mars 1996.
- [153] W. S. Lovejoy et Y. Li, « Hospital Operating Room Capacity Expansion », *Manag. Sci.*, vol. 48, n° 11, p. 1369-1387, 2002.
- [154] P. C. Kuo, R. A. Schroeder, S. Mahaffey, et R. R. Bollinger, « Optimization of operating room allocation using linear programming techniques », *J. Am. Coll. Surg.*, vol. 197, n° 6, p. 889-895, déc. 2003.
- [155] H. Fei, C. Chu, A. Artiba, et N. Meskens, « Planification des interventions sur une semaine dans un bloc opératoire », *6ème Congrès Société Fr. Rech. Opérationnelle D'Aide À Décision ROADEF'05*, p. 359–374, 2005.
- [156] F. Dexter, J. T. Blake, D. H. Penning, B. Sloan, P. Chung, et D. A. Lubarsky, « Use of linear programming to estimate impact of changes in a hospital's operating room time allocation on perioperative variable costs », *Anesthesiology*, vol. 96, n° 3, p. 718-724, mars 2002.
- [157] H. Fei, C. Chu, et A. Artiba, « A memetic algorithm for Operating room scheduling », présenté à International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, 2004.
- [158] R. Velasquez et T. Melo, « A Set Packing Approach for Scheduling Elective Surgical Procedures », 2005, vol. 2005, p. 425-430.
- [159] J. Beliën, E. Demeulemeester, et B. Cardoen, « A decision support system for cyclic master surgery scheduling with multiple objectives », *J. Sched.*, vol. 12, p. 147-161, 2008.

- [160]I. Marques, M. Captivo, et M. Pato, « An integer programming approach to elective surgery scheduling », *Spectr.*, vol. 34, avr. 2012.
- [161]F. Dexter et J. Ledolter, « Managing risk and expected financial return from selective expansion of operating room capacity: mean-variance analysis of a hospital's portfolio of surgeons », *Anesth. Analg.*, vol. 97, n° 1, p. 190-195, table of contents, juill. 2003.
- [162]F. Dexter, J. Ledolter, et R. E. Wachtel, « Tactical decision making for selective expansion of operating room resources incorporating financial criteria and uncertainty in subspecialties' future workloads », *Anesth. Analg.*, vol. 100, n° 5, p. 1425-1432, table of contents, mai 2005.
- [163]F. Dexter, « A strategy to decide whether to move the last case of the day in an operating room to another empty operating room to decrease overtime labor costs », *Anesth. Analg.*, vol. 91, n° 4, p. 925-928, oct. 2000.
- [164]A. Sciomachen, E. Tanfani, et A. Testi, « Simulation models for optimal schedules of operating theatres », *Int. J. Simul.*, vol. 6, nov. 2005.
- [165]E. Marcon et F. Dexter, « Impact of surgical sequencing on post anesthesia care unit staffing », *Health Care Manag. Sci.*, vol. 9, p. 87-98, mars 2006.
- [166]A. Bouguerra, C. Sauvey, et N. Sauer, « Mathematical model for maximizing operating rooms utilization », *IFAC-Pap.*, vol. 48, n° 3, p. 118-123, janv. 2015.
- [167]J. Beliën, E. Demeulemeester, et B. Cardoen, « Visualizing the demand for various resources as a function of the master surgery schedule: a case study », *J. Med. Syst.*, vol. 30, n° 5, p. 343-350, oct. 2006.
- [168]P. Santibáñez, M. Begen, et D. Atkins, « Surgical block scheduling in a system of hospitals: an application to resource and wait list management in a British Columbia health authority », *Health Care Manag. Sci.*, vol. 10, n° 3, p. 269-282, sept. 2007.
- [169]M. Arenas, A. Bilbao, R. Caballero, T. Gómez, M. V. Rodríguez, et F. Ruiz, « Analysis via goal programming of the minimum achievable stay in surgical waiting lists », *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 53, n° 4, p. 387-396, avr. 2002.

- [170]J. E. Everett, « A decision support simulation model for the management of an elective surgery waiting system », *Health Care Manag. Sci.*, vol. 5, n° 2, p. 89-95, avr. 2002.
- [171]K.-H. Krempels et A. Panchenko, « An Approach for Automated Surgery Scheduling », p. 26.
- [172]Y. Y. Tan, T. E. Mekkawy, Q. Peng, et L. Oppenheimer, « MATHEMATICAL PROGRAMMING FOR THE SCHEDULING OF ELECTIVE PATIENTS IN THE OPERATING ROOM DEPARTMENT », 2011.
- [173]G. Wullink, M. Van Houdenhoven, E. W. Hans, J. M. van Oostrum, M. van der Lans, et G. Kazemier, « Closing emergency operating rooms improves efficiency », *J. Med. Syst.*, vol. 31, n° 6, p. 543-546, déc. 2007.
- [174]J. T. van Essen, E. W. Hans, J. L. Hurink, et A. Oversberg, « Minimizing the waiting time for emergency surgery », *Oper. Res. Health Care*, vol. 1, n° 2, p. 34-44, juin 2012.
- [175]R. Guido et D. Conforti, « A hybrid genetic approach for solving an integrated multi-objective operating room planning and scheduling problem », *Comput. Oper. Res.*, vol. 87, p. 270-282, nov. 2017.
- [176]F. Dexter et R. D. Traub, « How to schedule elective surgical cases into specific operating rooms to maximize the efficiency of use of operating room time. », *Anesth. Analg.*, vol. 94, n° 4, p. 933-942, 2002.
- [177]J. T. Blake, J. Donald, et S. Ball, « Mount Sinai hospital uses integer programming to allocate operating room time », *Interfaces*, vol. 32, p. 63-73, janv. 2002.
- [178]V. Augusto, X. Xie, et V. Perdomo, « Operating theatre scheduling with patient recovery in both operating rooms and recovery beds », *Comput. Ind. Eng.*, vol. 58, n° 5, p. 231-238, 2010.
- [179]A. Guinet et S. Chaabane, « Operating theatre planning », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 85, p. 69-81, févr. 2003.
- [180]H. Fei, C. Chu, N. Meskens, et D. Duvivier, « Ordonnancement journalier dans un bloc opératoire pour la stratégie d'"open scheduling" », présenté à GISEH'06, 2006.
- [181]M. R. Amin-Naseri et A. Afshari, « A hybrid genetic algorithm for integrated process planning and scheduling problem with

- precedence constraints », *Int. J. Adv. Manuf. Technol. - INT J ADV MANUF TECHNOL*, vol. 59, mars 2012.
- [182]J. B. Jun, S. H. Jacobson, et J. R. Swisher, « Application of discrete-event simulation in health care clinics: A survey », *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 50, n° 2, p. 109-123, févr. 1999.
- [183]P. R. Harper, « A Framework for Operational Modelling of Hospital Resources », *Health Care Manag. Sci.*, vol. 5, p. 165-173, 2002.
- [184]P. T. VanBerkel et J. T. Blake, « A comprehensive simulation for wait time reduction and capacity planning applied in general surgery », *Health Care Manag. Sci.*, vol. 10, n° 4, p. 373-385, déc. 2007.
- [185]E. Taillard, « Benchmarks for basic scheduling problems », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 64, n° 2, p. 278-285, janv. 1993.
- [186]E. Vallada, R. Ruiz, et J. M. Framinan, « New hard benchmark for flowshop scheduling problems minimising makespan », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 240, n° 3, p. 666-677, févr. 2015.
- [187]R. Valente *et al.*, « A model to prioritize access to elective surgery on the basis of clinical urgency and waiting time », *BMC Health Serv. Res.*, vol. 9, p. 1, janv. 2009.
- [188]W. J. Bolosky, J. R. Douceu, D. Ely, et M. Theimer, « Feasibility of a serverless distributed file system deployed on an existing set of desktop PCs », *Proc SIGMETRICS'2000 St. Clara CA 2000*.
- [189]A. Daknou, « Architecture distribuée à base d'agents pour optimiser la prise en charge des patients dans les services d'urgence en milieu hospitalier », juill. 2011.
- [190]N. Ben Hajji, « Système multi-agents de pilotage réactif des parcours patients au sein des systèmes hospitaliers », Université de Lorraine, France, 2017.
- [191]S. McArthur *et al.*, « Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications – Part II: Technologies, Standards and Tools for Building Multi-Agent Systems », *Power Syst. IEEE Trans. On*, vol. 22, p. 1753-1759, déc. 2007.
- [192]A. Saleem, N. Honeth, et L. Nordström, « A case study of multi-agent interoperability in IEC 61850 environments », in *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, 2010, p. 1-8.

- [193]A. Drogoul, « De la simulation multi-agents a la resolution collective de problemes : une etude de l'emergence de structures d'organisation dans les systemes multi-agents », 1993.
- [194]A. Cardon, « Les systemes adaptatifs a architecture d'agents dynamiques : Une approche de la conscience artificielle », *LIP6*, 1998.
- [195]F. Lesage, « Interpretation adaptative du discours dans une situation multiparticipants : modelisation par agents », Universite du Havre, 2000.
- [196]S. Russell et P. Norvig, « Artificial Intelligence: A Modern Approach », *Prentice-Hall*, 1995.
- [197]O. GIOVANNADIMARZOSERUGEND, S. MARIE-PIERREGLEIZE, et S. ANTHONYKARAGEORGO, « Self-organization in multi-agent systems », 2006.
- [198]S. Hassas, « Systèmes complexes à base de multi-agents situés. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Re-cherches. University Claude Bernard Lyon. », University Claude Bernard Lyon, 2003.
- [199]F. Bousquet et C. Le Page, « Multi-agent simulations and ecosystem management: a review », *Ecol. Model.*, vol. 176, n° 3, p. 313-332, sept. 2004.
- [200]B. Beaufils et P. Mathieu, « Organisation et applications des SMA », in *undef*, Mandiau, René, G.-L. Strugeon, Emmanuelle, Péninou, et André, Éd. Hermès, 2002, p. 77–91.
- [201]J. P. Müller et M. Pischel, « An architecture for dynamically interacting agents », *Int. J. Coop. Inf. Syst.*, vol. 03, n° 01, p. 25-45, mars 1994.
- [202]S. Bussmann et Y. Demazeau, « An agent model combining reactive and cognitive capabilities », 1994, p. 2095-2102 vol.3.
- [203]H. Fakham, A. Ahmidi, F. Colas, et X. Guillaud, « Multi-agent system for distributed voltage regulation of wind generators connected to distribution network », in *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, 2010, p. 1-6.
- [204]M. Wooldridge et G. Weiss, « Multi-Agent Systems », *MIT Press*, 1999.
- [205]J. Ferber, « Multi-agent systems - an introduction to distributed artificial intelligence », 1999.

- [206]« The Foundation for Intelligent Physical Agents ». [En ligne].
Disponible sur: <http://www.fipa.org/>.
- [207]K. Sycara, A. Pannu, M. Williamson, D. D. Zeng, et K. Decker,
« Distributed Intelligent Agents », *IEEE Expert*, vol. 11, p. 36-46,
janv. 1997.
- [208]T. Finin, R. Fritzson, D. P. McKay, et R. Mcentire, *KQML As An
Agent Communication Language*. 1994.
- [209]« Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) », 2012
Accessed Sept. 10 2012 Online Available Httpwwwfipaorg.
- [210]« FIPA SL Content Language Specification, Foundation For
Intelligent Physical Agents Std », *SC00 061G 2002*.
- [211]« FIPA Agent Management Specification, Foundation For
Intelligent Physical Agents Std. SC00 023K », 2004.
- [212]B. Horling et V. Lesser, « A Survey of Multi-agent
Organizational Paradigms », *Knowl. Eng. Rev.*, vol. 19, p. 281-316,
déc. 2004.
- [213]J. van Dongen, J. M. van de Mortel-Fronczak, et J. E. Rooda,
« Heterarchical control of a lithoshop ».
- [214]N. A. Duffle, R. S. Piper, B. J. Humphrey, et J. E. Hartwick,
« Hierarchical and NonHierarchical Manufacturing Cell Control
with Dynamic Part-Oriented Scheduling », vol. Proc. of the 14th
North American Mfg. Research Conf., Minneapolis, May, p.
504-507, 1986.
- [215]« FIPA Request Interaction Protocol Specification, Foundation
for Intelligent Physical Agents Std. XC00 026F », 2001.
- [216]« FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification,
Foundation for Intelligent Physical Agents Std. SC00 029H »,
2002.
- [217]G. B. Sheblé, *Computational Auction Mechanisms for
Restructured Power Industry Operation*. Springer US, 1999.
- [218]« FIPA English Auction Interaction Protocol Specification,
Foundation for Intelligent Physical Agents Std. XC00 031F », p.
2001.
- [219]« FIPA Dutch Auction Interaction Protocol Specification,
Foundation for Intelligent Physical Agents Std. XC00 032F », p.
2001.

- [220]L. M. Ausubel et P. Milgrom, « The Lovely but Lonely Vickrey Auction », in *Combinatorial Auctions*, P. Cramton, Y. Shoham, et R. Steinberg, Éd. The MIT Press, 2005, p. 17-40.
- [221]A. L. Motto, F. D. Galiana, A. J. Conejo, et M. Huneault, « On walrasian equilibrium for pool-based electricity markets », *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, n° 3, p. 774-781, août 2002.
- [222]M. Esmaeili, M.-B. Aryanezhad, et P. Zeephongsekul, « A game theory approach in seller–buyer supply chain », *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 195, n° 2, p. 442-448, juin 2009.
- [223]C. J. Ury, C. V. Johnson, et J. A. Meldrem, « Teaching a heuristic approach to information retrieval », *Res. Strateg.*, vol. 15, n° 1, p. 39-47, déc. 1997.
- [224]S.-L. Huang et C.-Y. Lin, « The search for potentially interesting products in an e-marketplace: An agent-to-agent argumentation approach », *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, n° 6, p. 4468-4478, juin 2010.
- [225]J. Pitt, L. Kamara, M. Sergot, et A. Artikis, « Voting in Multi-Agent Systems », *Comput. J.*, vol. 49, n° 2, p. 156-170, mars 2006.
- [226]« FIPA Brokering Interaction Protocol Specification, Foundation For Intelligent Physical Agents Std. SC00 033H », 2002.
- [227]« Comparison of agent-based modeling software », *Wikipedia*. 05-août-2019.
- [228]R. Patil *et al.*, « The DARPA Knowledge Sharing Effort: Progress Report », *Proc. Third Int. Conf. Princ. Knowl. Represent. Reason.*, août 1992.
- [229]« Object Management Group. 95-11-03: Common Facilities RFP3 Final Draft », *Available [Httpwwwomgorgdocs199595-11-03ps](http://www.omg.org/docs1995/95-11-03ps)*, 1995.
- [230]« Foundation for Intelligent Physical Agents. Specifications », vol. <http://www.fipa.org>, 1997.
- [231]C. Carrascosa, J. Bajo, V. Julian, J. M. Corchado, et V. Botti, « Hybrid multi-agent architecture as a real-time problem-solving model », *Expert Syst. Appl.*, vol. 34, n° 1, p. 2-17, janv. 2008.
- [232]K. Warwick, A. Ekwue, R. Aggarwal, et W. Laycock, « Artificial intelligence techniques in power systems [Book Review] », *IEE Rev.*, vol. 44, n° 3, p. 111-111, mai 1998.

- [233]M. Shahidehpour, *Communication and Control in Electric Power Systems : Applications of Parallel and Distributed Processing*. 2003.
- [234]I. A. Ferguson, « Touring Machines: autonomous agents with attitudes », *Computer*, vol. 25, n° 5, p. 51-55, mai 1992.
- [235]K. Fischer, J. P. Müller, et M. Pischel, « A pragmatic BDI architecture », in *Intelligent Agents II Agent Theories, Architectures, and Languages*, 1996, p. 203-218.
- [236]D. P. Buse et Q. H. Wu, *IP Network-based Multi-agent Systems for Industrial Automation: Information Management, Condition Monitoring and Control of Power Systems*. London: Springer-Verlag, 2007.
- [237]Weiming Shen, « Distributed manufacturing scheduling using intelligent agents », *IEEE Intell. Syst.*, vol. 17, n° 1, p. 88-94, janv. 2002.
- [238]H. Chen, « An Intelligent Broker Architecture for Context-Aware Systems », févr. 2003.
- [239]M. Klusch et K. Sycara, « Brokering and Matchmaking for Coordination of Agent Societies: A Survey », in *Coordination of Internet Agents: Models, Technologies, and Applications*, A. Omicini, F. Zambonelli, M. Klusch, et R. Tolksdorf, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001, p. 197-224.
- [240]R. W. Brennan et D. H. Norrie, « Metrics for evaluating distributed manufacturing control systems », *Comput. Ind.*, vol. 51, n° 2, p. 225-235, juin 2003.
- [241]S. D. Parsons, P. Gmytrasiewicz, et M. J. Wooldridge, Éd., *Game Theory and Decision Theory in Agent-Based Systems*. Springer US, 2002.
- [242]P. Kruchten, « The Rational Unified Process: An Introduction, Second Edition, 2nd edition », vol. Addison-Wesley Longman, 2000.
- [243]S. A. DeLoach, « Engineering Organization-Based Multiagent Systems », in *Software Engineering for Multi-Agent Systems IV*, vol. 3914, A. Garcia, R. Choren, C. Lucena, P. Giorgini, T. Holvoet, et A. Romanovsky, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, p. 109-125.
- [244]S. Bussmann et D.-B. Ag, « An Agent-Oriented Architecture for Holonic Manufacturing Control », p. 12, 1998.

- [245]W. Shen et D. H. Norrie, « Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey », *Knowl. Inf. Syst.*, vol. 1, n° 2, p. 129-156, mai 1999.
- [246]Z. Jiang, « Agent-Based Control Framework for Distributed Energy Resources Microgrids », in *2006 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology*, 2006, p. 646-652.
- [247]R. F. Babiceanu et F. F. Chen, « Development and Applications of Holonic Manufacturing Systems: A Survey », *J. Intell. Manuf.*, vol. 17, n° 1, p. 111-131, févr. 2006.
- [248]M. Pipattanasomporn et S. Rahman, « Intelligent distributed autonomous power systems (IDAPS) and their impact on critical electrical loads », 2005, p. 9 pp.
- [249]M. Pipattanasomporn, H. Feroze, et S. Rahman, « Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation », in *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 2009, p. 1-8.
- [250]A. Jonsson et M. Rovatsos, « Scaling Up Multiagent Planning: A Best-Response Approach », in *ICAPS*, 2011.
- [251]E. Serrano, J. Such, J. Botía, et A. García-Fornes, « Strategies for avoiding preference profiling in agent-based e-commerce environments », *Appl. Intell.*, vol. 40, p. 1-16, juin 2013.
- [252]D. Borrajo, « Multi-agent Planning by Plan Reuse », in *Proceedings of the 2013 International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, Richland, SC, 2013, p. 1141–1142.
- [253]S. Maliah, G. Shani, et R. Stern, « Privacy Preserving Landmark Detection », in *ECAI*, 2014.
- [254]J. Cox et E. Durfee, « Efficient and distributable methods for solving the multiagent plan coordination problem », *Multiagent Grid Syst.*, vol. 5, p. 373-408, déc. 2009.
- [255]M. E. desJardins, E. H. Durfee, M. J. Wolverton, et C. L. Ortiz, « A Survey of Research in Distributed, Continual Planning », *AI Mag.*, vol. 20(4), p. 13-22, 1999.
- [256]P. D. O'Brien et R. C. Nicol, « FIPA — Towards a Standard for Software Agents », *BT Technol. J.*, vol. 16, n° 3, p. 51-59, juill. 1998.

- [257]F. Bellifemine, A. Poggi, et G. Rimassa, « JADE: A FIPA2000 Compliant Agent Development Environment », in *Proceedings of the Fifth International Conference on Autonomous Agents*, New York, NY, USA, 2001, p. 216–217.
- [258]K. Fischer, J. P. Müller, M. Pischel, et D. Schier, « A Model for Cooperative Transportation Scheduling », in *ICMAS*, 1995.
- [259]A. Bachem, W. Hochstättler, et M. Malich, « The simulated trading heuristic for solving vehicle routing problems », *Discrete Appl. Math.*, vol. 65, n° 1, p. 47-72, mars 1996.
- [260]Smith, « The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver », *IEEE Trans. Comput.*, vol. C-29, n° 12, p. 1104-1113, déc. 1980.
- [261]F.-S. Hsieh et C. Y. Chiang, « Workflow Planning in Holonic Manufacturing Systems with Extended Contract Net Protocol », in *Next-Generation Applied Intelligence*, 2009, p. 701-710.
- [262]K. Goswami et A. Gupta, « Resource Selection in Grids Using Contract Net », 2008, p. 105-109.
- [263]J. Kinnebrew et G. Biswas, « Efficient Allocation of Hierarchically-Decomposable Tasks in a Sensor Web Contract Net », 2009, p. 225-232.
- [264]U. Deshpande, A. Gupta, et A. Basu, « Performance Improvement of the Contract Net Protocol Using Instance Based Learning », in *Distributed Computing - IWDC 2003*, 2003, p. 290-299.
- [265]C. Dellarocas, M. Klein, et J. A. Rodríguez-Aguilar, « An exception-handling architecture for open electronic marketplaces of contract net software agents », in *EC*, 2000.
- [266]T. Sandholm, « An Implementation of the Contract Net Protocol Based on Marginal Cost Calculations », in *AAAI*, 1993.
- [267]M. Golfarelli, D. Maio, et S. Rizzi, « A Task-Swap Negotiation Protocol Based on the Contract Net Paradigm », févr. 1970.
- [268]J. Kodama, T. Hamagami, H. Shinji, T. Tanabe, T. Funabashi, et H. Hirata, « Multi-agent based Autonomous Power Distribution Network Restoration by using Contract Net Protocol », *Electr. Eng. Jpn.*, vol. 166, p. 56-63, janv. 2007.
- [269]W. Huang, X. Zhang, et X. Wei, « An Improved Contract Net Protocol with Multi-Agent for Reservoir Flood Control Dispatch », *J. Water Resour. Prot.*, vol. 3, n° 10, p. 735-746, oct. 2011.

- [270]B. Saleh, E. Abdellah, C. Lina, O. Barakat, et B. Ghazi,
« Operating Room Management System: Patient Programming. », *MATEC Web Conf.*, vol. 281, p. 05004, janv. 2019.
- [271]B. B. Saleh, A. E. Moudni, M. Hajjar, et O. Barakat, « An Entire Operating Theater Management System », *J. Mech. Civ. Eng. IOSRJMCE*, p. 12.
- [272]B. B. Saleh, A. E. Moudni, M. Hajjar, et O. Barakat, « A Cooperative Control Model Foroperating Theaterscheduling », in *2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 2018, p. 302-308.
- [273]B. Bou Saleh, A. El Moudni, M. Hajjar, et O. Barakat, « A Multi-Agent Architecture for Dynamic Scheduling of Emergencies in Operating Theater », in *Intelligent Systems and Applications*, 2019, p. 1256-1272.
- [274]B. B. Saleh, A. E. Moudni, M. Hajjar, et O. Barakat,
« Distributed Artificial Intelligence to support the progression of the operating theater process », *J. Comput. Eng. IOSRJCE*, p. 12.
- [275]B. B. Saleh, A. E. Moudni, M. Hajjar, O. Barakat, et G. B. Saleh,
« Towards an Integral Operating Room Management System », in *2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 2018, p. 433-439.
- [276]B. Bou Saleh, G. Bou Saleh, M. Hajjar, A. El Moudni, et O. Barakat, « Multi-agents Planner for Assistance in Conducting Energy Sharing Processes », in *Proceedings of the 8th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT'18), Vol.1*, 2020, p. 449-462.