



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Système multi-agents de pilotage réactif des parcours patients au sein des systèmes hospitaliers

THÈSE

Soutenue le 24 novembre 2017

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

(Mention Automatique, Traitement du signal et des images, Génie informatique)

par

Noura BENHAJJI

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	Lionel AMODEO	Professeur des Universités Université de Technologie de Troyes
	Yacine OUZROUT	Professeur des Universités IUT Lumières - Université Lyon 2
<i>Examineurs :</i>	Salima HASSAS	Professeur des Universités Université Claude Bernard Lyon 1
	Thibaud MONTEIRO	Professeur des Universités INSA Lyon
<i>Directeurs de Thèse :</i>	Didier Anciaux	Maître de conférences (HDR) Université de Lorraine
	Daniel Roy	Maître de conférences ENIM - Université de Lorraine

À mes parents

À ma sœur

Aux familles BENHAJJI et AKKA

À mes amis

À tous ceux qui m'ont soutenue

Remerciements

Au terme de cette thèse de doctorat, j'exprime ma profonde gratitude à Messieurs **Didier ANCIAUX**, Maître de conférences (HDR) à l'Université de Lorraine et **Daniel ROY**, Maître de conférences à L'ENIM - Université de Lorraine, mes directeurs de thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour la confiance qu'ils m'ont accordée, pour le temps qu'ils m'ont consacré afin me préparer au métier d'enseignant-chercheur, pour l'accompagnement scientifique et humain qu'ils m'ont apporté et surtout le soutien moral pour aller de l'avant durant la dernière année.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à Messieurs **Lionel AMODEO**, Professeur à l'Université Technologique de Troyes, et **Yacine OUZROUT**, Professeur à l'IUT Lumières – Université Lyon 2, de m'avoir fait l'honneur d'évaluer mes travaux en leurs qualité de rapporteurs malgré leurs occupations.

Mes sincères remerciements s'adressent à Madame **Salima HASSAS**, Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1, et Monsieur **Thibaud MONTEIRO**, Professeur à l'INSA de Lyon, pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse autant que rapporteurs.

Mes remerciements vont également pour tous les membres du LGIPM pour les moments de convivialité que nous avons partagés.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Introduction générale.....	1
I. Contexte	1
I. Problématique.....	2
II. Approche proposée	2
III. Plan de la thèse	3
Chapitre I : Étude bibliographique	5
I. Introduction.....	6
II. Les systèmes hospitaliers.....	7
1. Introduction.....	7
2. Caractéristiques.....	8
3. Conclusions.....	15
III. Systèmes de pilotage	16
1. Définitions.....	16
2. Performances d'un système de pilotage.....	18
3. Approches de pilotage à court terme.....	18
4. Typologie des architecture de pilotage	20
5. Conclusions.....	22
IV. Agents et systèmes multi-agents ; applications aux systèmes hospitaliers	23
1. Introduction.....	23
2. Agents et systèmes multi-agents	23
3. Interactions entre agents.....	29
4. Organisation des systèmes multi-agents	36
5. Systèmes multi-agents : applications aux systèmes hospitaliers	39

6. Conclusions.....	44
V. Méthodes de recherche opérationnelle et leurs applications aux systèmes hospitaliers .	45
1. Introduction.....	45
2. Recherche opérationnelle : applications aux systèmes hospitaliers.....	46
3. Conclusions.....	53
VI. Synthèse : positionnement de nos travaux de recherches	53
Chapitre II : Modélisation	56
I. Introduction.....	57
II. Parcours de soins	58
1. Introduction.....	58
2. Définitions.....	58
3. Modélisation du parcours de soins.....	59
3. Conclusions.....	61
III. Modèle mathématique	62
1. Introduction.....	62
2. Notations	62
3. Variables de décision	63
4. Fonctions objectifs	64
5. Contraintes	65
6. Classe de complexité.....	66
7. Conclusions.....	68
IV. Modèles UML	70
1. Introduction.....	70
2. Vue logique.....	71
3. Vue des processus	74
4. Conclusions.....	74
V. Synthèse.....	74

Chapitre III : Système multi-agents proposé.....	76
I. Introduction.....	77
II. Architecture	77
1. Introduction.....	77
2. Approche centrée patient	78
3. Architecture hétérarchique	79
4. Conclusions.....	80
III. Description des agents.....	81
1. Introduction.....	81
2. Agent central « Agent Patient ».....	81
3. Agents auxiliaires « ressources partagées ».....	82
4. Conclusions.....	84
IV. Pilotage réactif	85
1. Introduction.....	85
1. Les perturbations.....	85
2. Protocoles d'interaction entre agents	86
3. Exemples d'Illustration	94
4. Conclusions.....	99
V. Synthèse.....	100
Chapitre IV : Expérimentations.....	102
I. Introduction.....	103
II. Environnement de développement	103
1. Introduction.....	103
2. Langage de programmation	104
3. Plateforme de développement du système multi-agents	104
4. Conclusions.....	105
III. Données	105

IV. Planification initiale	110
1. Introduction.....	110
2. Paramétrage du Recuit simulé proposé.....	110
3. Conclusions.....	112
V. Expérimentations.....	112
1. Introduction.....	112
2. Instances de test	113
3. Scénario de simulation	114
4. Étude de performance	115
5. Conclusions.....	122
VI. Synthèse	123
Conclusion générale	125
I. Conclusions	125
II. Perspectives	126
Annexe 1 : Modélisation UML	128
Annexe 2 : Données	a
Annexe 3 : Recuit simulé	a
1. Généralités	a
2. Paramètres.....	b
Bibliographie.....	a

Liste des figures

Figure 1 : Le Système de santé (Université Numérique Thématique en Economie et Gestion)	8
Figure 2 : Illustration de la notion de système multi-agents (Ferber,1995)	28
Figure 3 : Types de relations entre les actions des agents	30
Figure 4 : Modèle BRAIN	37
Figure 5 : Modèle AALAADIN	38
Figure 6 : Comparaison des modèles par rapport à la modélisation, l'analyse et l'implémentation	39
Figure 7 : Domaines d'application de la RO dans le domaine de la santé (Brailsford, 2011)	47
Figure 8 : Parcours de soins du patient	60
Figure 9 : Schéma 4+1 vues	70
Figure 10 : Exemple d'une classe Patient	71
Figure 11 : Classe Acteur	73
Figure 12 : Classe Ressource	73
Figure 13 : Architecture du système multi-agents centré-patient du pilotage réactif du processus patient	80
Figure 14 : Diagramme d'activité de l'« Agent Patient »	82
Figure 15 : Diagramme d'activité du méta-agent « Acteur »	83
Figure 16 : Diagramme d'activité du méta-agent « Service »	84
Figure 17 : Protocole de coordination proposé	91
Figure 18 : Protocole de négociation proposé	92
Figure 19 : FIPA Contract Net Protocol (Fipa, 2002)	94
Figure 20 : Chronogramme des messages échangés entre les agents pour gérer un parcours de patient non électif – protocole de coordination -	96
Figure 21 : Chronogramme des messages échangés entre les agents pour gérer le parcours d'un patient électif – protocole de négociation -	98
Figure 22 : Évolution de la fonction objectif avec « PILPAP »	115
Figure 23 : Planification actuelle VS « PILPAP » : taux d'activités de soins affectées pendant les horaires d'ouverture	118
Figure 24 : Planification actuelle VS « PILPAP » : taux d'activités de soins affectées hors horaires d'ouverture	119
Figure 25 : planification actuelle VS « PILPAP » : taux de charge du personnel hospitalier	119
Figure 26 : Planification actuelle VS « PILPAP » : taux d'utilisation des ressources	120

Figure 27 : Flexibilité du système « PILPAP » : taux d'activités de soins non affectées.....	121
Figure 28 : Diagramme de classes : Consultation	128
Figure 29 : Diagramme de classes : Chirurgie	129
Figure 30 : Diagramme de classe : Hospitalisation.....	130
Figure 31 : Diagramme d'activité général.....	a
Figure 32 : Table Patient	a
Figure 33 : Table Acteur	b
Figure 34 : Table Activités de soins.....	c
Figure 35 : Table Planification.....	d

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales spécificités des systèmes hospitaliers par rapport aux systèmes industriels [Rodier 2010].....	12
Tableau 2 : Agents cognitifs vs réactifs (Reichgelt, 1991)	27
Tableau 3 : Types d'interactions entre agents (Ferber, 1995)	30
Tableau 4 : Degrés de coordination (Lesser, 1998).....	33
Tableau 5 : Temps de calcul pour différentes instances.....	67
Tableau 6 : Instances basées sur des données réelles de l'hôpital Robert Pax.....	68
Tableau 7 : Classification des principaux actes de langage de KQML et FIPA ACL (Jouvin, 2003).....	88
Tableau 8 : Performatives ACL-FIPA	89
Tableau 9 : Groupes d'actes de communication primitifs (FIPA ACL)	90
Tableau 10 : Règles de pilotage propre à « PILPAP ».....	100
Tableau 11 : Ressources humaines et matérielles de l'hôpital Robert Pax	107
Tableau 12 : Plages d'ouverture des salles d'opération du bloc opératoire de l'hôpital Robert Pax	108
Tableau 13 : Plages d'ouverture des services de consultations de l'hôpital Robert Pax.....	109
Tableau 14 : Charge du planning initial jour par jour	114
Tableau 15 : Paramètres de simulation	114
Tableau 16 : Paramètres des dix instances de test.....	117

Introduction générale

I. Contexte

Le secteur hospitalier est en pleine transformation. En effet, l'assainissement des finances publiques a entraîné des réformes dans ce secteur. Les administrateurs des établissements de santé doivent gérer des ressources hospitalières limitées nécessitant des décisions qui peuvent s'avérer importantes. De plus, ils doivent faire face à un accroissement continu des exigences des patients, des demandes de soins, de l'évolution des pathologies ainsi qu'à l'explosion des coûts de soins. Il est alors inévitable de recourir à des améliorations des activités de la logistique hospitalière pour une meilleure gestion budgétaire et pour une meilleure qualité de service. C'est pourquoi la Haute Autorité de Santé (HAS) exige aujourd'hui des certifications permettant d'évaluer le fonctionnement des établissements de soins. Il s'agit des certifications V2012 et V2014.

Notre collaborateur, le Centre Hospitalier de Sarreguemines – hôpital Robert Pax, se mobilise pour obtenir la certification V2014 après avoir obtenu la V2012 en octobre 2013. Dans cette perspective, il est amené à adopter les cinq orientations stratégiques introduites par la HAS pour la certification V2014 (Santé, Juillet 2013), qui se résument à :

1. Renforcer la capacité de la certification à maîtriser les risques.
2. Renforcer l'effet de la certification sur le management de l'établissement et des secteurs d'activité.
3. Rendre continue la démarche d'amélioration de la qualité des établissements.
4. Poursuivre le développement des approches centrées sur le patient.
5. Valoriser les établissements dans le cadre de la certification.

Nous nous intéressons principalement dans ce travail à la quatrième directive, et des effets induits peuvent améliorer les directives deux et trois.

C'est dans cette optique que la communauté d'agglomération de Sarreguemines et la Région de Lorraine ont initié une collaboration avec les professionnels du secteur hospitalier, les gestionnaires du Centre Hospitalier (CH) Robert Pax à Sarreguemines, et des chercheurs en logistique hospitalière du Laboratoire de Génie Industriel et Production de Metz (LGPIM).

Mon sujet de thèse intitulé : « Système multi-agents de pilotage réactif du processus patient au sein des systèmes hospitaliers : Cas de Robert Pax » fait partie de cette collaboration.

Une deuxième thèse de Mme Afef BOUGUERRA est intégrée dans cette collaboration qui consiste en un outil d'aide à la décision pour l'optimisation des blocs opératoires qui peut être intégré dans notre système de pilotage.

I. Problématique

Nos travaux de recherche sont un support pour les gestionnaires de l'hôpital Robert Pax (et plus généralement de tout centre de santé) afin de développer des approches centrées sur le patient pour gérer le parcours patient dans sa globalité.

Les gestionnaires des établissements de soins sont soumis à la triple contrainte : coût, délai et qualité. Ils doivent répondre aux demandes accrues des soins et satisfaire des clients de plus en plus avertis des progrès scientifiques en respectant un certain nombre de contraintes financières et législatives. De plus, le milieu hospitalier est caractérisé par son aspect dynamique et incertain. D'où la nécessité de revoir les pratiques organisationnelles afin d'assurer une meilleure prise en charge en utilisant les ressources allouées d'une manière optimale. Un deuxième challenge que les gestionnaires doivent relever est de centrer le parcours de santé autour du patient.

L'objectif de nos travaux est de proposer un système de pilotage des parcours patients. Ce système doit (1) **planifier** et **ordonnancer** les parcours des patients ; (2) **réagir** face aux perturbations à savoir les aléas et les incertitudes afin de réajuster la planification initiale ; (3) être **centré sur le patient**.

II. Approche proposée

En vue de développer de telles approches, nous nous sommes inspirés des approches centrées sur le produit, issues du domaine industriel.

Les approches de pilotage par le produit ont été proposées pour répondre aux exigences croissantes de gestion des produits dans un environnement de plus en plus incertain (Najid, 2001) (Pannequin & Thomas, 2012). Ces approches ont permis d'améliorer le fonctionnement en améliorant plusieurs indicateurs de performance : performances financières (Berland & De Rangé, 2013) et non financières (Cauvin & Neunreuther, 2009). Les systèmes de production de soins centrés patients peuvent être assimilés aux systèmes de production de biens centrés produits (Pannequin & Thomas, 2008) (Wang, 2004) (Wong, 2002). Cependant, il ne faut pas perdre de vue la présence du facteur humain, dans le cas des services de soins, qui est une

spécificité principale de ces derniers. Cette spécificité est à l'origine de leur caractère complexe, aléatoire et imprévisible.

Ainsi, l'alternative que nous proposons consiste à utiliser une approche centrée patient et basée sur les agents permettant de minimiser les délais d'attente, ainsi que la durée de séjour, et par conséquent les coûts des soins, tout en assurant un soin de qualité pour l'ensemble des patients et une meilleure gestion des ressources hospitalières.

Par ailleurs, les approches de pilotage, que ce soit dans le milieu industriel ou hospitalier, sont majoritairement des modèles mathématiques (Kusters, 1996) (Beliën, 2009) (Blake, 2002) et des modèles de simulation (Centeno, 2001) (Sobolev, 2008) (Blasak, 2003) utilisant une approche de gestion centrée sur une ou plusieurs ressources considérées comme critiques (Augusto, 2010). Les propriétés des agents comme l'autonomie, la communication et la proactivité n'ont pas été explorées comme approche de pilotage dans le cadre hospitalier. C'est pourquoi il nous a paru intéressant d'opter pour une approche centrée patient basée sur le paradigme multi-agents. Nous proposons alors, un **système multi-agents de pilotage réactif dynamique et distribué centré patient du parcours patient au sein des systèmes hospitaliers**.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés à la conception d'un outil d'aide à la décision, nommé « PILPAP » (PILotage du Parcours Patient) pour gérer les parcours des patients. Ce système a deux objectifs principaux :

- Planifier et ordonnancer les parcours des patients en proposant une planification optimisée des parcours patients ;
- Réagir en cas de perturbation en proposant de nouvelles solutions.

Les objectifs sous-jacents se résument à la réduction des délais de prise en charge des patients et l'amélioration du rendement du personnel hospitalier et par conséquent une meilleure qualité de prise en charge.

III. Plan de la thèse

Le présent mémoire décrit nos travaux de recherches selon l'organisation suivante :

Dans le premier chapitre, nous menons une étude bibliographique en commençant par une analyse des systèmes de santé français avec leurs spécificités et caractéristiques en mettant l'accent sur les différences et les similitudes avec les systèmes de production de biens.

Un état de l'art sur le paradigme agent et les systèmes multi-agents ainsi que leur application dans le domaine de la santé est présenté dans la deuxième partie. Nous discutons dans la troisième partie les méthodes de recherche opérationnelle les plus utilisées pour répondre aux problématiques de la gestion des parcours patients à savoir le dimensionnement, la planification et l'ordonnancement.

Dans le deuxième chapitre, nous détaillons la conception et la modélisation de notre système d'aide à la décision. Tout d'abord, nous proposons un modèle des parcours de soins possibles qui est la brique de base de notre modélisation. Ensuite, nous détaillons le modèle mathématique non-linéaire en nombre entier qui modélise les parcours des patients. De plus, la modélisation opérationnelle et organisationnelle du système est présentée sous forme de diagrammes UML.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le système de pilotage que nous proposons en discutant l'architecture choisie et en détaillant le comportement des agents qui le composent. Nous consacrons la deuxième partie à la description détaillée des spécifications du système proposé. À savoir les protocoles d'interaction (communication, coordination et négociation) ainsi que quelques scénarios de perturbations pour illustrer le comportement du système.

Quant au dernier chapitre, il est consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats des simulations, que nous avons menées, afin de valider notre proposition.

Chapitre I : Étude bibliographique

I. Introduction

La santé est une question qui préoccupe particulièrement la société puisque la qualité de vie des citoyens en dépend. Toutefois, les systèmes de santé font face à plusieurs contraintes notamment législatives et budgétaires. En effet, la demande de soins s'est de plus en plus fortement accrue et, partout, les dépenses de santé explosent dans un contexte où le patient exige une meilleure qualité des soins prodigués. Les dirigeants des systèmes hospitaliers doivent alors de ce fait intégrer toutes ces contraintes et revoir leurs processus et leurs modes organisationnels. Or, l'optimisation des systèmes de santé tant du point de vue temporel qu'économique nécessite des compétences en génie industriel qui ne relèvent pas forcément du domaine hospitalier. C'est ainsi que les chercheurs universitaires se sont intéressés aux problématiques liées au domaine de la santé, à savoir les systèmes d'information, le dossier médical numérique, le dimensionnement des ressources hospitalières et les outils d'aide à la décision.

Ce premier chapitre est dédié à une revue de la littérature dédiée à ces questions. Il se décompose en trois parties :

- les systèmes hospitaliers qui représentent le cadre général dans lequel nos travaux de recherche ont été menés. Nous y rappelons les définitions liées au système hospitalier. Nous y détaillons les spécificités des systèmes hospitaliers par rapport aux systèmes de production ainsi que la complexité qui leurs est associée. Nous terminons cette partie par des conclusions et discussions ;
- les agents et systèmes multi-agents et applications aux systèmes hospitaliers. Nous y rappellerons la notion d'agent et de système multi-agents sur laquelle nous nous sommes basées dans le présent travail. Par la suite, nous traitons dans le détail les différents types de relations qui peuvent exister entre des agents (interaction et coopération). Nous exposons ensuite des travaux de recherches qui ont été menés dans le domaine de la santé et qui s'appuient sur le paradigme Agent. Nous terminons cette partie par des conclusions et discussions ;
- les méthodes de recherche opérationnelle et leurs applications au sein des systèmes hospitaliers. Nous exposerons ici des méthodes de recherche opérationnelle utilisées pour résoudre des problèmes liés au domaine de la santé.

Nous concluons cette revue de littérature par une synthèse nous permettant de situer le positionnement de nos travaux de recherche.

II. Les systèmes hospitaliers

1. Introduction

Depuis deux décennies, le système de santé, et plus particulièrement le système de production des soins, est sujet à une transformation sans précédent. En effet, les établissements hospitaliers, publics ou privés, ont été confrontés à plusieurs réformes à savoir :

- le programme hôpital 2007 (Ministère de la Santé, de la Famille et des Personnes Handicapées, 2002) et 2012 (Ministère de la Santé et des Sports, 2010);
- la nouvelle tarification à l'activité.

De plus, les systèmes hospitaliers sont sujets à :

- la croissance des demandes de soins ;
- l'accroissement continu des exigences des patients ;
- l'évolution des pathologies ;
- l'explosion des coûts des soins.

Dans ce contexte, les établissements de santé sont soumis à une double contrainte. D'une part, assurer une gestion optimale des ressources hospitalières par nature limitées et d'autre part, assurer une qualité de soins avec les moindres coûts. Il est alors inévitable de recourir à des améliorations dans l'organisation des activités hospitalières.

Avant de poursuivre, il nous faut préalablement apporter des clarifications nous permettant de différencier les notions de : « *système hospitalier* », « *système de soins* » et « *système de santé* ».

En effet, selon la terminologie de l'OMS (OMS), le « *système de santé* » correspond à l'ensemble des éléments qui déterminent l'état de santé d'une population. Sa finalité est l'amélioration de la santé de la population. Dans une vision plus large (Figure 1), il est composé de différents sous-systèmes ; social, juridique, politique, culturel, etc.

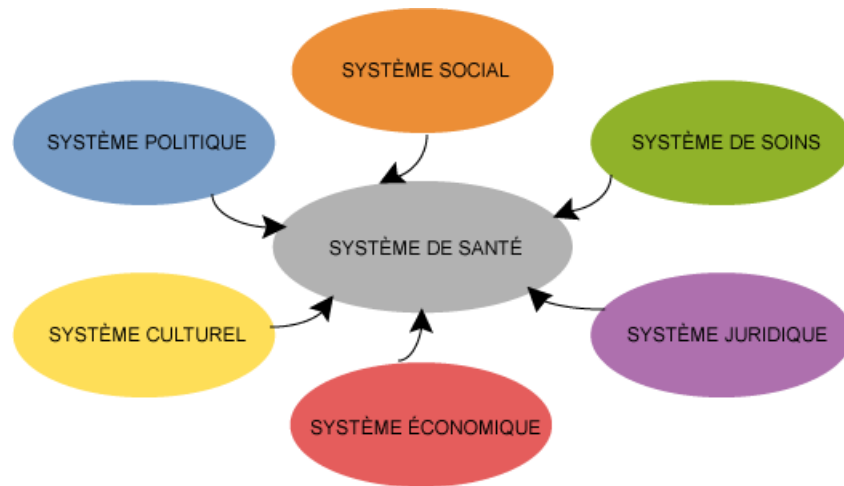


Figure 1 : Le Système de santé (Université Numérique Thématique en Economie et Gestion)

Il apparaît ainsi que le « *système de soins* » est l'un des composants du « *système de santé* ». Il correspond à l'ensemble des services fournissant des prestations de soins à la population dans le but d'améliorer la santé de celle-ci. Cependant, dans l'usage courant, le terme « *système de santé* » est utilisé dans un sens plus restrictif qui est synonyme de « *système de soins* ».

Dans cette première partie, nous abordons, dans un premier temps, les systèmes hospitaliers et en particulier l'évolution de l'organisation du système de santé français. Dans un deuxième temps, nous traitons des enjeux de cette organisation complexe. Nous nous focaliserons ensuite sur les activités et les flux hospitaliers et plus précisément, sur les flux des patients.

2. Caractéristiques

2.1. Définitions

L'Association Française d'Ingénierie Système (AFIS) définit un système comme étant « *un ensemble d'éléments en interaction entre eux et avec l'environnement, intégrés pour rendre à son environnement les services correspondants à sa finalité* ». (AFIS, 2015)

L'hôpital est défini par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) comme suit : « *l'hôpital est l'élément d'une organisation de caractère médical et social dont la fonction consiste à assurer à la population des soins médicaux complets, curatifs et préventifs, et dont les services extérieurs irradient jusqu'à la cellule familiale considérée dans son milieu* ». (Bridgman, 2015)

Ainsi, l'hôpital peut être considéré comme un système selon plusieurs points de vue : système physique de constructions, système d'interaction entre plusieurs acteurs de différents domaines, système logistique complexe et enfin système d'information.

Dans cet univers notionnel, l'OMS définit le « *système hospitalier* » comme « *toutes les activités, officielles ou non, qui portent sur les services de santé, mis à la disposition d'une population, et sur l'utilisation de ses services par la population* ». D'une façon générale, un système hospitalier désigne l'ensemble des établissements de soin.

2.2. Système hospitalier français

Dans le système hospitalier français, un système hospitalier est caractérisé par la cohabitation d'établissements ayant des statuts juridiques différents, avec différents modes d'organisation, de gestion et de financement. Nous pouvons de plus y distinguer des établissements publics ou privés —dont certains sont à but non lucratif.

Durant les deux dernières décennies, le système hospitalier français s'est engagé dans une démarche de réorganisation. Plusieurs réformes gouvernementales ont été mises en place pour améliorer l'efficience du système hospitalier. Il s'agit des Plans Hôpital 2007 et 2012, Rapport Larcher et de la loi Hôpital, Patient, Santé et Territoire (HPST).

- Les Plans Hôpital 2007 et 2012 visent particulièrement la diminution des dépenses de santé qui sont en augmentation continue depuis vingt ans. Deux principales mesures ont été apportées par le Plan Hôpital 2007 (Ministère de la Santé, de la Famille et des Personnes Handicapées, 2002). *La nouvelle gouvernance hospitalière*, avec l'amélioration de la concertation entre direction et praticiens dans la prise de décision au niveau stratégique, ainsi que la création de pôles d'activité.
- *La tarification à l'activité*, qui permet de lier les moyens d'un établissement à son activité.
- Le Plan Hôpital 2012 (Ministère de la Santé et des Sports, 2010) succède au Plan Hôpital 2007. Ce plan vise à poursuivre la dynamique d'investissement et de modernisation des établissements hospitaliers français. Les cinq principaux objectifs de ce plan sont les suivants :
 - Le maintien du niveau d'investissement concernant les établissements de santé publics et privés ;

- L'accompagnement de recompositions hospitalières, de regroupements de plateaux techniques, ainsi que les recompositions internes ;
- Le soutien des opérations répondant aux critères d'efficience ;
- Le développement des systèmes d'information hospitaliers ;
- La mise aux normes de sécurité à caractère exceptionnel.
- De plus, en 2008, le rapport Larcher a préconisé plusieurs mesures (Larcher, 2008) :
 - Le regroupement des hôpitaux dans des Communautés Hospitalières de Territoire (CHT) ;
 - Le renforcement de la gouvernance exercée par le directeur de l'hôpital aux pouvoirs étendus ;
 - L'évolution du statut des praticiens hospitaliers. Une rémunération supplémentaire est prévue en fonction de leur activité ;
 - L'incitation pour les établissements privés a participé aux missions de service public.
- La loi HPST constitue le prolongement du rapport Larcher. Les principales mesures de cette loi sont les suivantes :
 - Organisation régionale de la santé ;
 - Gouvernance des hôpitaux ;
 - Accès aux soins ;
 - Prévention et santé publique ;
 - Ordres professionnels ;
 - Intégration du nouveau cadre d'ESPIC (Établissements de Santé Privés d'Intérêt Collectif).

Récemment, La ministre des Affaires sociales et de la Santé, Marisol Touraine a présenté la Stratégie Nationale de Santé (SNS). Elle définit un cadre pour l'action publique afin de combattre les inégalités de santé et d'accès aux soins et d'adapter le système de santé au développement des maladies chroniques. La SNS est centrée autour de trois axes :

- Priorité à la prévention de la médecine curative ;
- Organisation des soins autour du patient ;
- Renforcement de la démocratie sanitaire.

Toutes ces réformes s'orientent clairement vers une forme de gestion économique en plaçant le patient et les professionnels de santé au cœur des systèmes hospitaliers.

2.3.Spécificités

La situation des systèmes de soins au cours des dernières années peut être assimilée à celle des systèmes de production des biens des années quatre-vingt.

L'hôpital peut être considéré comme une entreprise de services multi-produits, soumis à des contraintes de ressources (humaines et matérielles) à capacité finie et qui a pour objectif d'assurer une meilleure qualité des soins dans les meilleurs délais et avec les moindres coûts.

Les gestionnaires des établissements de santé ont recouru alors à des méthodes de gestion issues du domaine industriel qui ont fait leurs preuves. Dans ce sillage, les chercheurs ont proposé des outils d'aide à la décision en vue d'améliorer d'une manière efficace et efficiente la planification et l'organisation des activités de soins. Toutefois, ces solutions peuvent difficilement être mises en œuvre. Ceci est dû au fait que la prise de décision est fortement cloisonnée entre les parties prenantes (direction, personnel médical et paramédical, personnel administratif) et doit être équilibré. En outre, le personnel médical veut garder son autonomie dans le processus de prise en charge du patient. Bien que les praticiens gèrent le processus clinique et les infirmiers celui des soins infirmiers, le cadre de santé essaye de gérer tant bien que mal le processus de prise en charge dans sa globalité.

Certes, plusieurs similitudes existent entre les systèmes de productions de soins et les systèmes de productions de biens. Cependant, les systèmes hospitaliers présentent des spécificités liées à leur complexité. Rodier, synthétise les principales spécificités différenciant les systèmes industriels des systèmes hospitaliers dans le tableau suivant (Sophie Rodier, 2010) :

Tableau 1 : Principales spécificités des systèmes hospitaliers par rapport aux systèmes industriels [Rodier 2010]

	Systèmes industriels	Systèmes hospitaliers
Évolution de la gamme opératoire (ou du traitement du patient)	La gamme opératoire (<i>liste ordonnée des opérations à effectuer pour amener le produit à son état final</i>) est généralement connue a priori et respectée.	Le traitement du patient peut évoluer en fonction de son état, mais également de la disponibilité des ressources à l'instant t.
Nombre de ressource(s) humaine(s) par activité	Rarement plus de 1 à 2 ressources humaines par poste pour une même activité.	Jusqu'à 8 ressources humaines pour une même activité (ex. : activité chirurgicale) avec des règles de gestion complexes en termes de priorité et de préemption.
Personnalisation des ressources humaines	Deux opérateurs de caractéristiques (compétences, etc.) identiques sont généralement considérés comme « interchangeables ».	Notion de ressource personnalisée particulièrement importante (ex. : suivi d'un patient par le même médecin)
Complexité de la gestion des files d'attente	Les files d'attente sont principalement gérées par des règles connues (First In First Out, Last In First Out...).	Les files d'attente sont générées par des règles connues et par des règles de gestion plus complexes liées au patient et à l'état du système.
Évolution des plannings de fonctionnement	Les plannings de fonctionnement sont généralement fixés a priori pour les ressources matérielles et humaines et respectés.	Les plannings de fonctionnement sont généralement fixés a priori, mais dans de nombreux cas c'est le patient qui détermine la fin de traitement par les

		ressources, et non l'inverse.
L'importance des secteurs (zones géographiques) d'intervention des ressources	Si des secteurs (ou zones) sont définis, ils représentent la plupart du temps une partition géographique fixe.	Les secteurs représentent en général une décomposition du système avec des chevauchements possibles. Les secteurs sont variables et peuvent dépendre du croisement de plusieurs éléments (planning, fonction des ressources...).
Déplacement des ressources humaines	Les déplacements entre postes de travail sont rarement modélisés de manière fine et n'ont, la plupart du temps que peu d'incidence sur le fonctionnement du système.	Les déplacements sont fréquents, soumis à des règles bien spécifiques (sens de circulation...) et peuvent avoir une réelle incidence sur le fonctionnement du système.
Déplacement des clients / patients	Le produit traité ne peut pas se déplacer indépendamment des ressources matérielles (ex. : tapis roulant) ou humaines.	Le patient peut se déplacer dans les systèmes indépendamment ou non des ressources matérielles et humaines.

2.4.Complexité

Il est commun dans la littérature de qualifier le système hospitalier de complexe (I. Franchistéguy, J. M. Larrasquet, 1999) (M. Pham, 2002) (Marcon, 2004) (Marcon, Guinet, & Tahon, 2008) (Roussy, 2016).

Selon Roussy, cette complexité est liée à la complexité de l'activité de soins et des processus de prise en charge des patients (Roussy, 2016). L'auteur a distingué trois propriétés distinctes. Premièrement, le caractère incertain de l'évolution du processus de soins. Deuxièmement, la variabilité du processus de prise en charge due aux caractéristiques du patient, aux conditions de l'environnement et aussi aux modes d'organisation du travail. Troisièmement, le caractère

de production à grande échelle du processus de prise en charge qui résulte du nombre élevé des admissions. Franchistéguy *et al.*, ont lié la complexité du système hospitalier au caractère humain de son support physique qui est le patient (I. Franchistéguy, J. M. Larrasquet, 1999). En effet, la maîtrise et l'anticipation des réactions sont une tâche difficile, voire impossible.

Quant à Pham, directrice générale de l'hôpital Barthélemy Durand, elle a associé la complexité des établissements de soins à plusieurs causes à savoir la multiplicité des missions, la hiérarchisation, le cloisonnement, la diversité des métiers et l'hétérogénéité des équipements et des installations (M. Pham, 2002).

Pour Marcon *et al.*, la complexité des systèmes de production de soins est davantage liée à leur structure interne (leurs missions, leurs métiers, leurs systèmes de décision) qu'aux relations qu'ils entretiennent avec leur environnement externe (institutionnel, législatif ou social) (Marcon *et al.*, 2008).

Ainsi, une première synthèse nous permet de résumer la complexité du système hospitalier comme suit (Marcon *et al.*, 2008) :

- **Complexité des missions :**

La mission principale des systèmes de production de soins est la prise en charge des patients. Elle structure les différents processus principaux (l'accueil aux urgences, le diagnostic, les soins) impliquant de nombreux services (unités de soins, plateaux techniques, services de consultation, blocs opératoires, etc.) ainsi que des processus de soutien (les services administratifs et financiers, les services logistiques et techniques, les pharmacies). Ces missions concernant une multitude de processus ont une forte interaction.

- **Complexité des métiers :**

La réalisation de ces missions, évoquées auparavant, nécessite la collaboration de plusieurs métiers différents de par leur nature. Les établissements de soins regroupent des professionnels venant de divers corps de métier, et couvrant, entre autres, les métiers médicaux, paramédicaux, biomédicaux, administratifs, financiers, la restauration, la maintenance, etc. L'ensemble de ces acteurs amplifie leurs interactions. À cette diversité s'ajoute l'implication des professionnels de santé dans l'exercice des responsabilités organisationnelles, et ce, bien au-delà des fonctions de soins. En effet, le projet de la nouvelle gouvernance de l'hôpital définit les conditions de la décentralisation d'une gouvernance, partagée entre un directeur délégué, représentant du corps administratif, et

un coordinateur médical, représentant du corps médical. Tous les deux disposent d'une autonomie dans la formalisation des objectifs et la gestion des moyens qui leur sont alloués.

- **Complexité liée à la prise de décision :**

De par leur formation juridique, économique ou de gestion administrative, les cadres administratifs des établissements hospitaliers privilégient des approches légales et comptables en s'appuyant sur des objectifs quantitatifs stratégiques. Contrairement aux professionnels de santé qui privilégient les objectifs qualitatifs de notoriété vis-à-vis des patients de plus en plus exigeants. L'une des faiblesses du management des systèmes hospitaliers est l'absence d'une ligne hiérarchique claire et unique entre le sommet décisionnel et les centres opérationnels (Marcon *et al.*, 2008). Le corps administratif gère la logistique, les services techniques et les autres activités de support comme l'hôtellerie et la blanchisserie, mais n'a pas ou peu de pouvoir sur les centres opérationnels de soins qui disposent d'une indépendance dans leur choix d'intervention.

- **Complexité liée à l'environnement :**

Le système hospitalier est en transformation continue pour s'adapter, voire anticiper l'évolution de son environnement technologique, scientifique, démographique, social, économique, politique et institutionnel.

3. Conclusions

En résumé, dans le contexte actuel, les tutelles incitent les systèmes hospitaliers à engager de profondes mutations dans leurs modes organisationnels, et ce, fondamentalement dans l'objectif de maîtriser les dépenses de santé dans un contexte où les ressources médicales et paramédicales se font de plus en plus rares et où la demande de soins est en hausse continue —tout cela s'envisageant dans une relation renouvelée entre le patient « client » et le praticien « fournisseur de services ».

Les établissements de santé doivent alors intégrer ces nouvelles orientations et remettre en cause leur fonctionnement et leur organisation. À cette fin, ils ont initié des collaborations avec les universitaires du domaine du génie industriel pour répondre à des problématiques telles que : le dimensionnement des infrastructures, le diagnostic et l'amélioration continue, la planification et l'ordonnancement des activités de soins.

Certes, il existe plusieurs similitudes entre un système industriel et un système hospitalier, mais ce dernier a ses propres caractéristiques ou spécificités qui font de lui l'un des systèmes les plus complexe et divers qui soient.

Sa complexité réside particulièrement dans le fait que plusieurs acteurs de différents corps de métier collaborent pour assurer la principale mission qui est la meilleure prise en charge possible du patient. Aussi ne perdrons-nous pas de vue la nécessité de différencier le personnel soignant (praticiens et personnel paramédical), le personnel administratif et le personnel d'appui. Cette diversité des corps de métier pouvant créer des tensions croissantes entre logiques professionnelles et économiques. Ce à quoi s'ajoute la segmentation de la structure hiérarchique entre le sommet stratégique administratif et les centres opérationnels médicaux.

En outre, le caractère aléatoire et imprévisible des parcours de soins ajoute une complexité supplémentaire et qui n'est pas des moindres à la gestion de systèmes de productions patients. Ce qui nécessite une augmentation de la flexibilité pour gérer plusieurs parcours patients et le système de contrôle doit être réactif face aux perturbations.

Cette complexité nous conduit à mettre en place un système de pilotage et de contrôle des parcours patients capable d'exploiter au mieux les ressources hospitalières pour prendre en charge le maximum de patients dans les plus brefs délais et avec le moindre coût et réagir efficacement face aux perturbations.

Nous discutons dans ce qui suit les systèmes de pilotage.

III. Systèmes de pilotage

Tout système de production doit être piloté pour atteindre des objectifs de productions. Ce terme est cependant vague et peut admettre de multiples acceptations, définitions et mises en œuvre. Ce chapitre vise à cerner précisément le concept et en déduire ce qui pourrait être le mieux adapté à notre problématique spécifique.

1. Définitions

L'ISO (International Standard Organization) définit le pilotage de la production comme suit :
« *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)

Quant à Trenteseaux *et al.*, ils définissent le pilotage comme :

« 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) ».

De cette définition, nous notons qu'un système de pilotage ne se contente pas de réguler un système autour d'une consigne mais il va jusqu'à la mise en place des mécanismes d'amélioration.

Les principales fonctions d'un système de pilotage se résument comme suit :

- **Planification**

Cette fonction permet de générer les plans de production en utilisant les données du système d'information selon des objectifs et des données externes du système. Ces décisions s'inscrivent dans le cadre des décisions stratégiques de l'entreprise.

- **Ordonnancement**

L'une des fonctions les plus importantes dans un système de pilotage, nous citons l'ordonnancement. En effet, cette fonction touche différentes activités de l'entreprise comme la production, la maintenance, l'approvisionnement et la gestion des stocks. De plus, elle présente une dimension prévisionnelle et dynamique. Par conséquent, nous distinguons deux types d'ordonnancement :

- *Ordonnancement prévisionnel* : Qui est la suite de la planification et qui se fait en off-ligne (i.e. avant de commencer la production)
- *Ordonnancement dynamique* : Ce type d'ordonnancement tient compte des incertitudes de l'environnement et s'adapte aux données perçues en temps réel. En fait, la probabilité qu'un ordonnancement prévisionnel se déroule comme prévu est faible.

- **Conduite**

La fonction de conduite assure la flexibilité au quotidien pour absorber les fluctuations du système. Elle correspond au niveau décisionnel pour la mise en œuvre des tâches ordonnancées.

- **Commande**

Cette fonction permet de lancer les commandes en agissant sur le système physique/ Elle correspond globalement à la commande des équipements et automatismes de production.

2. Performances d'un système de pilotage

Un système de pilotage doit répondre aux critères de performances suivants :

- *Auto-organisation*

Un système de pilotage doit être capable de trouver la meilleure organisation pour améliorer ses performances. Il s'agit d'un changement décidé de manière autonome pour pallier aux évolutions de l'environnement (Bousbia & Trenteseaux, 2002).

- *Adaptation*

Un système de pilotage doit être capable de changer sa trajectoire pour faire face aux fluctuations de son environnement afin d'atteindre ses objectifs.

- *Optimisation*

Un système de pilotage doit contrôler le système de production afin de réaliser ses fonctions tout en optimisant certains critères pour améliorer les performances du système de production.

- *Réactivité*

Un système de pilotage doit être réactif. Zaffalon et Berguet définissent la réactivité d'un système comme suit : « Un système réactif agit continuellement et instantanément à des événements ou stimuli, qu'ils soient externes ou internes. » (Zaffalon & Gerguet, 1995).

Ainsi, le système de pilotage doit réagir en temps-réel pour prendre ou proposer des décisions pour maintenir son niveau de performance.

3. Approches de pilotage à court terme

Nous parlons d'un ordonnancement dynamique quand ce dernier est construit au fur à mesure que le système de production évolue. Ce type d'ordonnancement prend en considération les événements imprévus, les données incertaines et l'incomplétude de l'information.

Plusieurs classifications des approches de pilotage ont été proposées selon la considération de l'incertitude.

Nous citons la classification de Suresh et Chaudhuri qui classent les approches réactives selon l'outil utilisé : approches conventionnelles, approches à base de connaissances et approches distribuées (Suresh & Chaudhuri, 1993).

Devenport et *al.*, quant à eux, ils ont classé les approches de pilotage selon leur degré de réactivité. Ils distinguent deux approches : réactive et proactive (Davenport et *al.*, 2000).

3.1.Approches proactives

« 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).

Dans cette approche, lors de la réalisation de l'ordonnancement initial, les événements futurs sont pris en considération pour que cet ordonnancement soit robuste. En effet, l'ordonnancement reste valide quelque soient les événements futurs.

Nous signalons que les méthodes à population sont les plus utilisés pour générer une solution proactive.

L'approche proactive suppose qu'une partie des données du problème d'ordonnancement est parfaitement connue. Or ce n'est pas toujours le cas. Pour pallier à cette limite, les approches réactives ont été développées.

3.2.Approches réactives

« 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).

Les approches réactives sont adaptées aux problèmes évolutifs. En effet, ces méthodes prennent en considération les variations significatives telles que la variation de durée, de dates de début et/ou de fin, des arrivées de nouvelles tâches, etc.

Le point faible des approches réactives c'est que les performances de l'ordonnancement obtenu sont relativement faibles car ils ne sont connus qu'une fois réalisé.

3.3.Approches hybrides

Dans la littérature, nous distinguons deux approches :

- **Approches prédictives-réactives**

Ce type d'approche pallie les inconvénients des approches réactives. En effet, les approches prédictives-réactives sont basées sur un ordonnancement déterministe sans tenir en compte les futurs événements. Les futures décisions sont guidées par cet ordonnancement et s'adaptent en temps réel pour réagir face aux perturbations. Dans ce cas, l'ordonnancement est remplacé par un autre, voire modifié, soit recalculé à partir des nouvelles données. Nous parlons alors de ré-ordonnancement.

- **Approches proactives-réactives**

Dans ces approches, la résolution se fait en deux étapes distinctes. La première pour construire un ordonnancement prévisionnel robuste qui prend en considération l'aspect incertain de l'environnement via un algorithme *hors-ligne*.

La deuxième étape consiste à adapter le premier ordonnancement en fonction de l'état du système à un instant donné en utilisant un algorithme *dynamique*.

Dans ce qui suit, nous nous focalisons sur l'ordonnancement dynamique.

4. Typologie des architecture de pilotage

Les systèmes de pilotage s'organisent selon plusieurs architectures. Nous détaillons ces architectures dans ce qui suit.

4.1.Architecture centralisée

Le système de pilotage est constitué d'une seule entité décisionnelle qui contrôle et pilote les autres unités de production de façon totalement centralisé. Cette entité est dotée d'un ou plusieurs mécanismes de prise de décision pour superviser la production, synchroniser et coordonner les différentes ressources et gérer en temps-réel les imprévus qui peuvent survenir. Dans ce genre d'architecture, quand les perturbations sont très importantes, un nouvel ordonnancement doit être calculé.

Cette architecture est adaptée aux petits systèmes de production où le ré-ordonnancement peut-être fait manuellement.

4.2. Architecture hiérarchisée

Les systèmes de production complexes sont souvent décomposés en sous-systèmes par fonctions (approvisionnement, ateliers, logistique aval) ou par horizons (court, moyen et long terme).

Dans une architecture hiérarchisée, une entité de niveau supérieur coordonne et fixe un cadre de décision (objectifs et contraintes) pour les niveaux inférieurs. Ces derniers délèguent ainsi un certain degré d'autonomie de décision. En revanche, ils doivent remonter au niveau supérieur des informations sur les résultats obtenus.

Chaque entité va donc gérer un certain nombre d'aléas à son niveau.

En comparaison à l'architecture centralisée, ce modèle permet de limiter l'impact des perturbations. Cependant, il n'existe pas de liaisons transversales entre les différents sous-systèmes.

L'approche multi-agents, l'approche holonique et les approches bioniques sont les approches de pilotage hiérarchisées.

- **Approche multi-agents**

Un système de pilotage multi-agents est constitué d'un ensemble d'agents autonomes qui coopèrent pour prendre des décisions relatives au pilotage.

Querrec *et al.*, ont proposé un modèle générique pour les systèmes de pilotage de production (Querrec *et al.*). Dans ce modèle. Chaque entité du système est représentée par un agent autonome qui peut prendre des décisions localement. L'agent est composé de deux parties : une partie opérative et une partie de contrôle. Il perçoit et agit sur son environnement via des messages.

- **Approche holonique**

Le concept d'« holon » a été introduit par Koestler pour décrire les entités de base dans des phénomènes sociaux (Koestler, 1967).

Selon Koestler, un holon est un composant-modèle à deux faces : une face qui regarde en bas pour donner des directives aux entités de bas niveau et l'autre face regarde en haut pour faire partie d'un autre holon.

Ce concept a été adapté par Van Brussel *et al.*, dans les systèmes de production où un holon correspond à une entité autonome et coopérative dédiée à la transformation, au transport, au stockage et/ou à la gestion de gestion des objets physiques ou informationnels (Van Brussel *et al.* , 1998).

- **Approche Bionique**

Ces approches essaient de reproduire des phénomènes naturels pour la modélisation des systèmes de production comme la colonie de fourmis (Sowadago, 2011).

4.3.Architecture coordonnée

Dans ce type de structure, les entités du même niveau de pilotage peuvent interagir entre elles. Cette architecture augmente la capacité de décision dans chacun de ces niveaux pour avoir une résolution locale. En effet, la coopération entre les différentes entités permet d'optimiser la réponse et mieux réagir localement en cas de perturbations.

4.4.Architecture distribuée

Cette architecture pallie au manque de communication et la circulation de l'information entre les différents niveaux de l'architecture coordonnée. L'objectif est de répartir la capacité de décision sur un ensemble de centres de pilotage.

4.5.Architecture distribuée supervisée

Cette structure permet une intercommunication des systèmes de pilotage de différents niveaux. Elle est caractérisée par la coopération entre les entités du même niveau supérieur. Ces entités commandent ou corrigent une décision prise pour satisfaire les objectifs globaux puisqu'elles ont une vision plus large de l'environnement.

4.6.Architecture décentralisée

Dans cette architecture, toutes les entités sont au même niveau fonctionnel, ce qui la différencie de l'architecture distribuée. Aucun centre de pilotage de niveau hiérarchique supérieur n'est défini. Les différentes entités doivent s'auto-organiser pour assurer une gestion cohérente.

Cette typologie d'architecture de systèmes de pilotage reste très peu utilisée compte tenu des problèmes de synchronisation entre les contrôleurs locaux.

5. Conclusions

Dans cette partie, nous avons présenté les systèmes de pilotage en général ainsi que les approches de modélisation des systèmes de pilotage selon le type de fonction d'ordonnement.

À l'issue de cette étude bibliographique, nous concluons qu'un système de pilotage doté d'une fonction d'ordonnancement dynamique permet une prise de décision rapide et efficace pour un pilotage temps-réel, ce qui correspond aux caractéristiques de notre problématique.

Nous avons discuté les différentes architectures des systèmes de pilotage. L'architecture distribuée pallie au manque de communication entre les entités de différents niveaux de décision et permet de répartir la décision dans chacun de ces niveaux. Ainsi, une résolution locale « moins complexe » permet d'émerger une solution globale souhaitée.

L'approche multi-agents semble être bien adaptée pour une approche distribuée car ce sont les approches les plus abouties dans la résolution des problèmes distribués et complexes.

Nous discutons dans la partie suivante la notion d'agents, de systèmes multi-agents ainsi que leurs applications dans le domaine de la santé.

IV. Agents et systèmes multi-agents ; applications aux systèmes hospitaliers

1. Introduction

Le paradigme multi-agents a été largement utilisé pour modéliser et concevoir des systèmes de production de soins. Leurs caractéristiques, que nous allons détailler par la suite, font qu'ils sont appropriés pour la modélisation de tels systèmes complexes, composés de plusieurs acteurs issus de multiples disciplines.

Cette partie présente un état de l'art sur les Systèmes Multi-Agents (SMA) et leurs applications aux systèmes hospitaliers. Dans un premier temps, nous donnons un aperçu sur la notion d'Agent, ses caractéristiques et ses types. Par la suite nous détaillons les typologies des organisations existantes et présentons différents modes de communication. Nous terminons cette partie par une présentation des applications des SMA dans le domaine de la santé.

2. Agents et systèmes multi-agents

Depuis trois décennies, les systèmes multi-agents constituent une extension et un prolongement de la notion d'objet. En effet, la modélisation basée sur agents permet de modéliser des systèmes complexes, distribués, ouverts, adaptables et autonomes. Les

systèmes multi-agents ont été largement utilisés par les chercheurs et les industriels. Il est nécessaire alors d'introduire les définitions et les notions générales d'agent. Cependant les définitions diffèrent dans la littérature selon les auteurs et leur discipline. Nous utiliserons par la suite, la définition la plus répandue dans la communauté française.

3. Notion d'agent

Avant de définir un système multi-agents, il est primordial de définir son composant de base : l'« agent ».

Dans la littérature, la définition la plus communément utilisée par la communauté française et la définition de Ferber (Ferber, 1999) :

« On appelle un agent une entité informatique qui :

- se trouve dans un système informatique ouvert comprenant un ensemble d'applications, de réseaux, et de systèmes hétérogènes ;
- peut communiquer avec d'autres agents ;
- est mue par un ensemble d'objectifs propres ;
- possède des ressources propres ;
- ne dispose que d'une représentation partielle des autres agents ;
- à un comportement tendant à satisfaire ses objectifs, en tenant compte d'une part des ressources et des compétences dont elle dispose, et d'autre part de ses propres représentations et des communications qu'elle reçoit. »

De cette définition découle le caractère autonome des agents qui ont pour but de satisfaire leurs objectifs en utilisant efficacement les compétences et les ressources dont ils disposent.

Nous citons également la définition proposée par Wooldridge, Jennings et Sycara (Nicholas R Jennings, Sycara, & Wooldridge, 1998) : « Un agent est un système informatique, situé dans son environnement, et qui agit de façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu. »

D'autres chercheurs, qui se réclamaient de l'approche « multi-agents », sont partis de l'interaction entre les agents, en premier lieu, pour en déduire, dans un second lieu, la structure des agents. L'intérêt des systèmes multi-agents est représenté par l'action collective et dans la capacité à articuler l'individuel au collectif. Cette notion de collectivité met en évidence les structures d'interactions (coopération, coordination, négociation, etc.) tout comme les organisations (hiérarchie, rôles, etc.).

Notre étude bibliographique relève que Demazeau et Müller (Demazeau & Müller, 1990) ont considéré un agent comme une entité intelligente, qui agit rationnellement ou intentionnellement, en fonction de ses buts et ses connaissances. Alors que Ferber a qualifié l'agent d'entité réelle ou abstraite capable d'agir sur son environnement et sur elle-même. Sycara, Wooldridge et Jennings ont défini un agent en terme mental en faisant référence aux notions de croyances, de connaissances et des objectifs par rapport à lui-même et des autres agents, etc.

Ainsi il existe dans la littérature plusieurs définitions acceptées du terme « agent ». Chacune de ces définitions est adaptée à un contexte précis. De l'ensemble de ces définitions, nous dégagons les propriétés suivantes communément admises pour un agent :

- **Autonomie**

L'autonomie est le fondement du paradigme multi-agents. Un agent peut agir sans aucune intervention extérieure d'un humain ou d'un autre agent. Cette notion d'autonomie différencie l'agent d'un objet. Ce dernier est doté de méthodes qui doivent être invoquées pour être exécutées. L'invocation des méthodes pour les objets est remplacée par la négociation pour les agents.

- **Réactivité**

La réactivité d'un agent réside dans le fait qu'il peut adapter son comportement en fonction de l'évolution de son environnement. Un agent est capable de percevoir des changements dans son environnement et réagir en un temps limité.

- **Proactivité**

Un agent ne se limite pas à réagir au changement de son environnement, il est aussi capable de prendre des initiatives. En effet, des buts sont attribués à l'agent pour qu'il mette tout en œuvre afin de les satisfaire.

- **Sociabilité**

Un agent est une entité sociale. Il est capable d'interagir avec des humains ou d'autres agents artificiels. Il doit tenir compte des autres agents qui peuvent l'aider à atteindre ses objectifs ou qui sont susceptibles de le perturber.

Ces propriétés font la force d'un agent et le différencient d'un objet au sens informatique du terme.

2.2.Agent cognitif vs agent réactif

Nous distinguons deux familles d'agents dans la littérature : cognitif et réactif. Un agent cognitif a une représentation explicite de croyances, de buts, de modèles des autres agents, etc., contrairement à un agent réactif.

Les agents cognitifs sont généralement intentionnels. En effet, ils disposent de plans explicites, ainsi que d'une base de connaissances avec plusieurs informations liées à la gestion des interactions avec les autres agents et leurs domaines d'expertise, ce qui leur permet d'atteindre les buts qui leur ont été fixés. Dans ce contexte, les notions de coordination et de négociation pour résoudre les conflits émergent.

Contrairement aux agents cognitifs, les agents réactifs ne sont pas ‘‘intelligents’’ si nous les considérons individuellement. Ils ne sont pas capables de réagir à des changements de leur environnement. Leur comportement est alors régi par leur relation à leur entourage, et ce, sans une représentation des autres agents ni de leur environnement. Cependant, les agents réactifs ont la capacité de résoudre des problèmes complexes en s'intéressant à la modélisation d'un système d'agent plutôt qu'à la modélisation de l'agent (Hassas, 2003). La fourmilière, la termitière, la ruche d'abeilles et d'autres sont des exemples de systèmes à base d'agents réactifs dans le domaine biologique.

D'après Ferber (Ferber, 1995), un agent cognitif a les caractéristiques suivantes :

- **Savoir-faire** : déclaration des compétences et des connaissances d'un agent ;
- **Croyance** : ensemble de connaissances qu'un agent a de lui-même et des autres agents ;
- **Contrôle** : un agent possède des buts, des intentions, des plans et des tâches ;
- **Expertise** : ensemble de connaissances sur la résolution d'un problème donné. Cette connaissance peut être sous forme de base de règles ou autre ;
- **Communication** : ensemble de protocoles de communication pour interagir avec les autres agents.

Le mode de fonctionnement d'un agent cognitif est centré sur trois fonctions principales : la perception, la prise de décision et la planification. Un agent réactif est souvent dirigé par des mécanismes de motivation (satisfaction d'un besoin interne, accomplissement d'un but, etc.). Il est aussi possible qu'un agent réactif ne réponde qu'à des stimuli issus de son

environnement. Nous pouvons déduire alors qu'il possède une connaissance compilée des actions à effectuer.

Nous résumons les différences entre les agents cognitifs et réactifs dans le Tableau 2 :

Tableau 2 : Agents cognitifs vs réactifs (Reichgelt, 1991)

Agents cognitifs	Agents réactifs
Représentation explicite de l'environnement	Pas de représentation explicite
Peut tenir compte de son passé	Pas de mémoire locale
Agents complexes	Fonctionnement stimulus/action
Nombre d'agents réduit	Nombre d'agents élevé

La différence majeure entre des agents cognitifs et des agents réactifs est le compromis efficacité/complexité.

Toutefois, il est possible de concevoir des systèmes hétérogènes avec les deux types d'agents. Il s'agit d'agents hybrides. Muller et Pischel (Müller & Pischel, 1994) et Bussman et Demazeau (Bussmann & Demazeau, 1994) ont proposé les premiers modèles d'agents hybrides. Chaque agent est décomposé en différents modules : modules cognitifs, modules réactifs et un module de contrôle des autres modules. Le module réactif assure les réponses aux stimuli de l'environnement. Le module cognitif assure la planification qui nécessite des raisonnements complexes. L'approche hybride a apporté une solution adéquate pour la modélisation des systèmes complexes avec un environnement dynamique.

Un deuxième exemple de systèmes hétérogènes est SYROCO (Roy, 1998). Il s'agit d'un système centralisé/hiéarchisé où le pilotage d'un atelier de production est assuré par un unique agent cognitif superviseur qui communique avec d'autres agents réactifs.

Nous avons ainsi présenté les différents aspects d'un agent – celui-ci évoluant souvent dans un environnement avec d'autres agents. Ce qui nous amène à considérer la notion des systèmes multi-agents.

2.3.Système multi-agents

Ferber a défini un système multi-agents comme suit (Ferber, 1995) : « *Un système multi-agents est un système composé des éléments suivants :*

- *Un environnement $\{E\}$, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.*

- Un ensemble d'objets **O**. Ces objets sont situés : pour tout objet, il est possible à un moment donné d'associer une position dans l'environnement **E**. Ces objets peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents : Il s'agit d'objets passifs.
- Un ensemble **A** d'agents, qui représentent les entités actives du système.
- Un ensemble de relations **R** qui unissent les objets et les agents entre eux.
- Un ensemble d'opérations **Op** permettant aux agents **A** de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler les objets de **O**.
- Des **opérateurs** chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers. »

La Figure 2 donne une illustration de la notion de systèmes multi-agents.

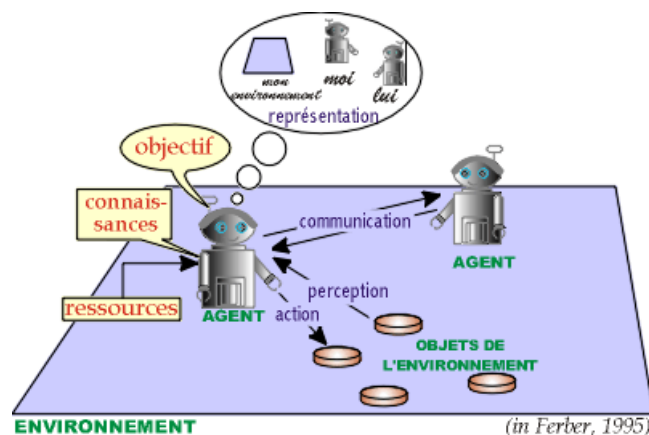


Figure 2 : Illustration de la notion de système multi-agents (Ferber,1995)

Demazeau a défini un système multi-agents comme :

«

- un ensemble d'entités plongées dans un environnement **E** ;
- un ensemble **A** d'agents ;
- un système d'action (opérations) permettant à ces agents d'agir dans l'environnement **E** ;
- un système de communication entre Agents (envoi de messages, **I** comme interaction) ;
- une organisation **O** structurant l'ensemble des agents et définissant les fonctions remplies par les agents (notion de rôles et notamment de groupes) ;
- une relation à des utilisateurs **U** qui agissent dans ce système multi-agents via des agents interfaces. »

Cette définition est connue dans la littérature sous le nom de l'approche **Voyelles**.

Ainsi, un système multi-agents est système composé d'un ensemble d'agents, situés dans un environnement donné et qui interagissent entre eux. Nous nous intéressons dans ce qui suit à ces interactions.

3. Interactions entre agents

Lors du choix du paradigme agents pour résoudre un problème donné, il est évident que la plupart des problèmes exigent et/ou impliquent un ensemble d'agents afin de représenter la nature décentralisée du problème ainsi que les multiples points de vue et/ou les intérêts concurrents. En outre, les agents doivent interagir les uns avec les autres, soit pour atteindre leurs objectifs individuels soit pour gérer les dépendances qui résultent du fait qu'ils sont situés dans un environnement commun (Nick R Jennings, 1996).

Von Martial a établi une classification des relations possibles entre les agents (Von Martial, 1990) :

- **Relations négatives ou conflictuelles** qui empêchent des actions de se réaliser simultanément dans le cas où les buts seraient incompatibles ou les ressources limitées.
- **Relations positives ou synergiques** qui favorisent les actions en les faisant bénéficier les uns des autres. L'auteur a distingué trois types de relations positives :
 - **relations d'égalité** : certaines actions peuvent être réalisées par un autre agent.
 - **relations de subsumption** : supposant qu'une action donnée d'un agent A fait partie des actions d'un agent B. Si l'agent B réalise l'action en question, elle est réalisée pour l'agent A du même coup.
 - **relations de faveur** : la réalisation d'une action favorise la possibilité d'en réaliser une autre.

La Figure 3 synthétise les différents types de relations entre agents définies par (Von Martial, 1990)

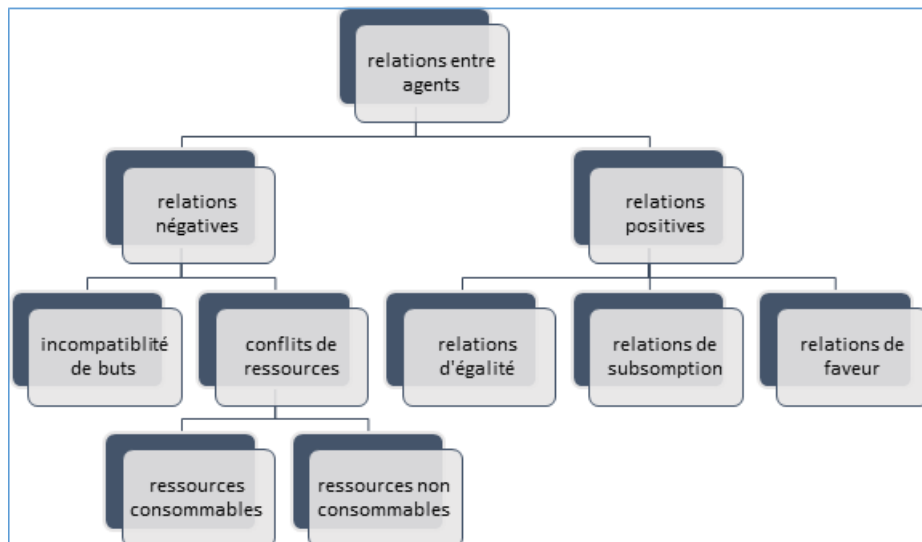


Figure 3 : Types de relations entre les actions des agents

Ferber a distingué trois catégories d'interactions entre les agents selon leurs buts, les ressources requises à la réalisation d'une tâche et leurs compétences (Tableau 3) (Ferber, 1995)

- Indifférence
 - Indépendance des agents ;
- Coopération
 - collaboration simple ;
 - encombrement ;
 - collaboration coordonnée ;
- Antagonisme
 - compétition individuelle pure ;
 - compétition collective pure ;
 - conflits individuels pour des ressources ;
 - conflits collectifs pour des ressources ;

Tableau 3 : Types d'interactions entre agents (Ferber, 1995)

Buts	Ressources	Compétences	Types d'interaction	Catégorie
Compatibles	Suffisante	Suffisante	Indépendance	Indifférence
Compatibles	Suffisante	Suffisante	Collaboration simple	Coopération
Compatibles	Suffisante	Suffisante	Encombrement	Coopération

Compatibles	Suffisante	Suffisante	Collaboration coordonnée	Coopération
Incompatibles	Suffisante	Suffisante	Compétition individuelle pure	Antagonisme
Incompatibles	Suffisante	Suffisante	Compétition collective pure	Antagonisme
Incompatibles	Suffisante	Suffisante	Conflits individuels pour des ressources	Antagonisme
Incompatibles	Suffisante	Suffisante	Conflits collectifs pour des ressources	Antagonisme

De cette classification ressort la notion de coordination et de négociation entre agents. Nous détaillons dans ce qui suit ces deux types d'interactions entre agents.

3.1. Coordination

La coordination dans les SMA a été abordée dans la communauté par différentes approches. Nous discernons :

- **Approche de Jennings** (Nick R Jennings, 1996): « *Processus par lequel un ou plusieurs agents **raisonnent** sur leurs actions locales et sur les actions des autres par anticipation afin d'assurer des **actions communes**.* »
- **Approche de Lesser** (Lesser V.R., 1987): « *L'objectif de la coordination est de s'assurer que :*
 - *les activités des agents permettent de résoudre toutes les composantes du problème global ;*
 - *les interactions entre les agents sont cohérentes et s'intègrent dans la solution globale ;*
 - *les groupes définis sont cohérents.* »
- **Approche de Malone** (Malone & Crowston, 1994): « *Gestion des **interdépendances** entre **activités*** ». Le partage de ressources, l'allocation des tâches, la co-conception, la prise de décision multi-acteurs en sont des exemples.

Dans la littérature, il est distingué quatre types principaux de coordination d'actions entre les agents (Lopistéguy *et al.*, 2003).

- **Coordination par synchronisation ou par ajustements mutuels** où le travail se répartit par un simple processus de communication peu, voire pas, formel, au fur et à mesure de son avancement.

- **Coordination par planification**

- *Planification centralisée pour agents multiples*

Dans ce type de coordination par planification, un agent (ou éventuellement un système) central **planifie** et **distribue** les plans aux agents en résolvant les problèmes de synchronisation et d'allocation de ressources. Les autres agents sont de simples exécutants ;

- *Coordination centralisée pour plans partiels*

Un seul agent coordinateur et plusieurs planificateurs exécuteurs sont différenciés dans ce type de coordination. De ce fait, la **planification** est **distribuée** et la **coordination** par fusion des plans partiels construits par les agents est **centralisée** ;

- *Coordination distribuée pour plans partiels*

La **planification** ainsi que la **coordination** des plans sont totalement **distribuées**. Plusieurs planificateurs exécuteurs échangent leurs plans partiels jusqu'à **satisfaction** des buts.

- **Coordination par réglementation**

Un code, une loi ou des conventions peuvent être utilisés pour coordonner les actions des agents.

- **Coordination réactive**

Ce type de coordination est le mieux adapté aux agents réactifs. La coordination est assurée par action située par marquage de l'environnement ou par des actions de coordination.

Le Tableau 4 synthétise les degrés de coordination en combinant les différents outils d'un SMA : Agent, Environnement, Interaction, Organisation.

Tableau 4 : Degrés de coordination (Lesser, 1998)

	Dirigé par les données	Dirigé par les buts	Dirigé par les tâches
Autonome	Reçoit des données, pondération ;	Reçoit les buts ;	Reçoit les plans ;
	Détermine et pondère les buts associés à ces données ;	Pondère les buts ;	Pondère les plans ;
	Détermine et pondère les tâches associées à ces buts ;	Détermine et pondère les tâches associées à ces buts ;	
Dirigé	Reçoit les données et les pondérations ;	Reçoit les buts et les pondérations ;	Reçoit les plans et les pondérations ;
	Détermine et pondère les buts associés à ces données ;	Détermine et pondère les tâches associées à buts ;	
	Détermine et pondère les tâches associées à ces buts ;		

Après avoir détaillé les différentes formes de la coordination, nous nous intéressons à présent à une forme particulière de la coordination avec résolution des conflits qui est la négociation.

3.2. Négociation

La définition de la négociation entre agents reste aussi imprécise que celle de l'agent.

Les travaux de recherches de Sycara (Sycara, 1990a) (Sycara, 1990) (Sycara, 1988) (Sycara, 1989) et de Rosenschein (Rosenstein, 1986) (Rosenstein & Breese, 1988) (Rosenstein & Zlotkin, 1994) ont été les premiers travaux sur la négociation.

Bussmann et Muller ont défini la négociation comme « *un processus de communication d'un groupe d'agents permettant d'atteindre un accord mutuellement accepté* » (Bussmann & Muller, 1992). Ce processus nécessite un échange d'information, la relation de buts et des concessions mutuelles afin de trouver un accord portant sur un prix, un objectif commun, une action commune ou autres. Pour négocier, les agents doivent **raisonner** sur les **croyances**, **désirs** et **intentions** des **autres agents** (Rao & Georgeff, 1995).

Une autre définition a été proposée par Bouron : « *la négociation est une stratégie de résolution utilisant le **dialogue** pour parvenir à un **accord** pour résoudre des **conflits** de **croyances** ou de **buts*** » (Bouron, 1992).

D'après ces différentes définitions, nous pouvons conclure qu'un modèle de négociation est composé de :

- **Langage de négociation** composé d'un ensemble de primitives de communication qui précisent la façon dont les agents communiquent entre eux ;
- **Protocole de négociation** constitué d'un ensemble de règles qui régit la négociation ;
- **Objet de négociation** ;
- **Processus de décision** qui régit le fonctionnement de la négociation et qui oriente la stratégie de l'agent au cours de la négociation.

Rosenschein et Zlotkin ont proposé la **théorie de la négociation** (Rosenschein & Zlotkin, 1994) “*We are not interested in describing the ways humans interact, and simulating that behavior in machines. Instead, we are interested in creating social environments for machines with provably optimal, beneficial behavior. Rather than describing a social phenomenon, we are doing social engineering, helping designers establish an automated society's rules*”.

La négociation peut porter sur trois domaines différenciés par la théorie de la négociation (Zlotkin & Jeffrey, 1996) : les **domaines orientés tâches (TOD : Task Oriented Domains)**, les **domaines orientés états (SOD : State Oriented Domains)**, et les **domaines orientés utilité (WOD : Worth Oriented Domains)**. Cette différenciation permet de classer les différents types d'interactions et de choisir le protocole de négociation le plus approprié.

Dans la littérature, deux grands types de négociation sont illustrés :

- **Négociation coopérative** : Les agents sont collaboratifs et ont un but commun. Le Contract Net Protocol proposé par Davis et Smith est le protocole le plus utilisé pour élaborer des processus de négociation coopérative (Smith, 1980) (Smith & Davis, 1981) ;
 - *Contract Net Protocol (CNP)* : Davis et Smith se sont inspirés de l'économie de marché pour proposer ce modèle. Le principe général du CNP est comme suit :
 - les agents peuvent avoir deux rôles : **manager** ou **initiateur** et **contractant** ;

- l'agent manager décompose le problème en plusieurs sous-problèmes ;
 - il **annonce** chaque sous-problème à un ensemble d'agents contractants potentiels ;
 - ils **évaluent** l'annonce ;
 - les agents contractants ayant les ressources et les capacités requises font des **offres** ;
 - l'agent manager **évalue** les soumissions et **accorde** le contrat à l'agent contractant qui a proposé la meilleure offre.
- Bozdag a rapporté les différentes extensions du Contract Net Protocol (Bozdag, 2008). Parmi ces extensions, citons le protocole Rubinstein alternant proposition et contre-proposition, FIPA Contract Net Protocol (FIPA, 2002) qui permet aux agents d'accepter ou de refuser d'exécuter une requête ou encore l'extension proposée par Aknine *et al.*, (Aknine *et al.*, 2004) pour surmonter la limite de négociation simultanée qui peut échouer en utilisant un CNP. Les auteurs ont introduit de nouvelles primitives de communication : *PreBid*, *PreAccept*, *PreReject*, *DefinitiveReject*, *DefinitiveBid*, *DefinitiveAccept* qui permettent une communication avant acceptation ou rejet définitif de l'offre.
- **Négociation compétitive.**
 - ***Négociation basée sur la théorie des jeux***
La théorie des jeux a été utilisée pour la conception des processus de négociations automatisées afin d'étudier les stratégies d'interaction entre agents économiques (Makki, *et al.*, 1994) (Wolters & Schuller, 1997) (Stuber *et al.*, 2005). L'objectif est de déterminer la stratégie optimale à utiliser pour atteindre un équilibre d'une simulation d'un jeu entre agents négociateurs (Rao, 1987) (Wang & Parlar, 1989) (Wolters & Schuller, 1997). Dans la théorie des jeux, les agents adoptent souvent un comportement rationnel. Toutefois, ce comportement peut amener à des solutions non satisfaisantes (Brooks & Rose, 2004) (Esmaeili *et al.*, 2009).
 - ***Négociation basée sur les heuristiques***
Pour pallier aux limites du comportement rationnel de la négociation basée sur la théorie des jeux, les agents peuvent opter pour des stratégies approximatives et heuristiques (Ury *et al.*, 1998). Bien évidemment, les heuristiques sont des règles qui donnent une solution proche de l'optimal dans un temps de calcul

raisonnable. L'approche heuristique se base essentiellement sur l'évaluation des différentes stratégies (Bazerman, 2005). Néanmoins, la principale limite de cette approche réside dans le fait qu'elle suppose que les agents ont une connaissance complète de leurs préférences et de leurs désirs (Bazerman, 2005) (Ury *et al.*, 1998).

- **Négociation basée sur l'argumentation**

L'argument constitue l'élément de base de cette approche. Il est l'information qui permet à un agent de justifier sa position dans le processus de la négociation et d'influencer les positions des autres agents (Kremenjuk & Faure, 1991) (Huang & Lin, 2010). Plusieurs modèles de négociation basée sur l'argumentation ont été proposés dans plusieurs domaines. Nous citons l'e-marketplace (Huang & Lin, 2010) et la négociation de travail (Kraus *et al.*, 1998) (Sycara, 1990).

4. Organisation des systèmes multi-agents

Quand on parle du modèle organisationnel des agents, il faut tenir compte des aspects agents, comment ces derniers interagissent entre eux ainsi que leur environnement. Le modèle organisationnel traite alors de l'aspect social.

Un modèle organisationnel peut être défini comme la modélisation du fonctionnement d'un système multi-agents afin de spécifier le comportement global qu'on souhaite émerger des interactions entre les agents.

Plusieurs modèles organisationnels ont été proposés dans la littérature. Nous citons les modèles basés sur la notion de groupe (Hirsh *et al.*, 2003), des rôles (Cabri *et al.*, 2003), ou encore la théorie des activités (Omicini *et al.*, 2003).

L'utilisation des modèles organisationnels a deux avantages :

- La séparation des problèmes liés à l'algorithmique et ceux liés aux interactions lors du développement d'un système multi-agents.
- La réutilisabilité des solutions et des expériences. En effet, les rôles sont liés à un scénario d'application. Ces derniers peuvent être exploités pour des applications similaires.

Après avoir défini la notion de modèle organisationnel d'un système multi-agents, nous détaillons les modèles les plus répondus.

4.1. Modèle BRAIN

Le modèle BRAIN (Behavioral Roles for Agent Interactions) (Cabri et al., 2003) est un modèle d'interaction multi-niveaux à base de rôles. Les rôles sont décrits en se basant sur le formalisme XML. L'infrastructure des interactions est construite en se basant sur cette description des rôles. Elle permet de contrôler l'émergence du système.

Ce modèle a été implémenté en utilisant la plateforme JADE (Java Agent DEvelopment Framework) pour donner lieu à un « Rolesystem ». Le modèle est représenté dans la Figure 4

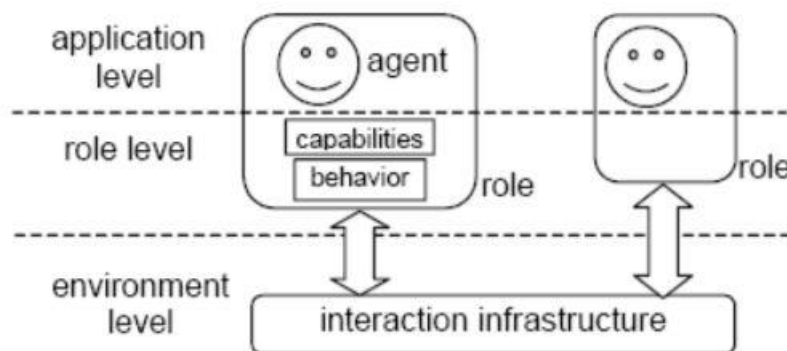


Figure 4 : Modèle BRAIN

Le modèle BRAIN est parmi les modèles les plus complets. Cependant, son implémentation en utilisant l'API (Application Programming Interface) de « RoleSystem » reste difficile.

4.2. Modèle RoleEP

Le modèle RoleEP (Role Based Evolutionary Programming) (Ubayashi & Tamai, 2000) est basé sur la notion des agents mobiles et leur domaine de collaboration.

Dans ce modèle, le domaine est l'environnement de l'évolution des agents et le rôle est la fonction que prend un agent dans cet environnement.

Le point fort de ce modèle est son dynamisme. En effet, un rôle peut être incarné ou annulé pendant l'exécution ce qui offre une adaptation maximale. Cependant, ce modèle ne reste valable que pour les agents mobiles ce qui n'est pas le cas de tous les systèmes multi-agents.

4.3.Modèle AALAADIN

Ferber et Gutknecht ont développé le modèle AALAADIN (Ferber & Gutknecht, 1998) pour concevoir des systèmes multi-agents. Le modèle repose sur trois concepts : l'agent, le groupe, le rôle et groupe (Figure 5).

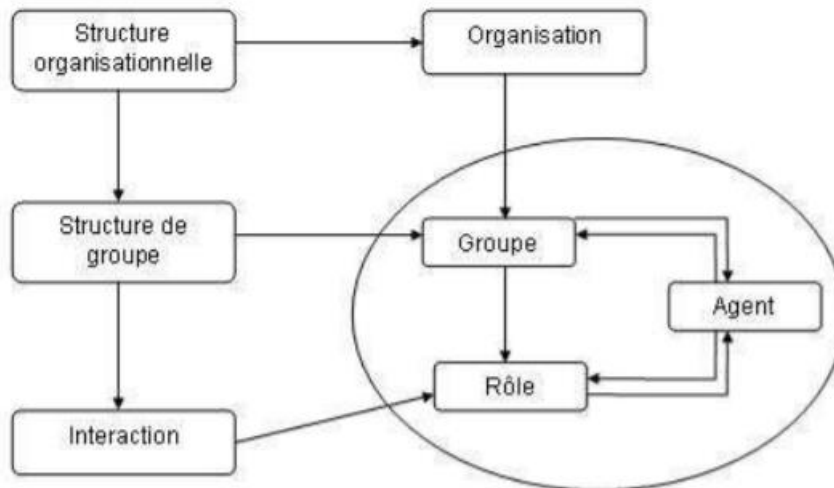


Figure 5 : Modèle AALAADIN

L'agent

Dans ce modèle, l'agent est défini comme une entité autonome communicante qui joue un ou plusieurs rôles dans les différents groupes. Il est à noter que dans ce modèle, aucune contrainte sur l'architecture interne de l'agent ni sur le formalisme de description de son comportement n'est imposé. De ce fait, les concepteurs ont la liberté du choix des architectures et des formalismes utilisés.

Le rôle

Le rôle est défini dans AADAALIN, comme la représentation abstraite d'un service, d'une identification ou d'une fonction d'un agent au sein d'un groupe particulier. Un agent peut avoir un ou plusieurs rôles. Un rôle peut être tenu par plusieurs agents. Les rôles sont locaux aux groupes.

Le groupe

Le groupe est la notion de primitive de regroupement d'agents. Chaque agent peut faire partie d'un ou plusieurs groupes. Pour faire simple, un groupe est un moyen d'identifier un ensemble d'agents par regroupement.

D'autres modèles sont présentés dans les travaux de Cabri *et al.* (Cabri *et al.*, 2004) qui concluent qu'AALAADIN est l'un des modèles les plus ouverts et les plus outillés. Il se positionne au centre du triangle (Figure 6) : modélisation, analyse et implémentation, ce qui peut constituer un modèle de référence complet.

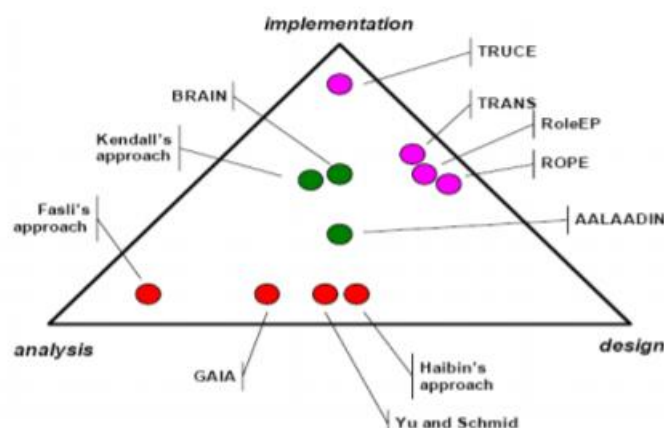


Figure 6 : Comparaison des modèles par rapport à la modélisation, l'analyse et l'implémentation

Nous avons ainsi donné un aperçu général sur la notion d'agent et de système multi-agents ainsi que les formes d'interactions entre agents. Le paradigme agent a été largement utilisé pour répondre à des problématiques dans différents domaines. Nous focalisons notre étude bibliographique sur leur application dans le domaine de la santé.

5. Systèmes multi-agents : applications aux systèmes hospitaliers

L'optimisation des systèmes hospitaliers que ce soit d'un point de vue économique ou temporel nécessite l'informatisation des processus administratifs. Cependant, les systèmes de santé sont parmi les problèmes les plus compliqués à aborder vu leur complexité inhérente. Les techniques d'optimisation classiques, que nous détaillons dans la partie suivante, restent limitées pour modéliser un environnement avec une telle variété d'utilisateurs ainsi que la complexité des processus et des interactions.

L'utilisation du paradigme agent dans le domaine de la santé a été présentée comme une technique complémentaire pour améliorer les performances des systèmes informatisés en termes d'interopérabilité, d'évolutivité, et de reconfiguration. Comme nous le verrons dans la suite de la présente section, le paradigme agent a une large gamme d'applications dans le domaine de santé telle que l'accès aux sources de données distribuées, la coordination des

activités de soins ou bien le soutien des systèmes d'aide à la décision (Nealon & Moreno, 2003).

Récemment, dans leur revue de littérature, Iqbal *et al.*, ont présenté l'adaptation des agents intelligents dans les systèmes de soins, leurs apports, leurs limites, les questions connexes ainsi que les perspectives de recherches (Iqbal *et al.*, 2016). Les auteurs ont distingué cinq catégories majeures des applications du paradigme agent dans le domaine de la santé :

- Gestion de données médicales :
Systèmes axés sur la collecte et l'extraction, la représentation, l'organisation et le stockage des données médicales (Lopez & Blobel, 2009) (Schmidt *et al.*, 2001) (Cruz-Correia *et al.*, 2005).
- Systèmes d'aide à la décision :
Approches visant à assister les professionnels de la santé dans l'exécution des processus de soins tels que les traitements ou le diagnostic (Cervantes *et al.*, 2006) en utilisant des bases de connaissances (Ji *et al.*, 2012) et/ou en appliquant des algorithmes d'analyse de données.
- Planification et allocation des ressources :
Systèmes centrés sur les problèmes de planification et d'ordonnancement des activités de soins, d'affectation des ressources humaines et matérielles, de suivi des patients, d'évaluation des performances (Vermeulen *et al.*, 2009) (Corchado *et al.*, 2008) (Decker & Li, 1998) (Hutzschenreuter *et al.*, 2008).
- Télémédecine :
Approches visant le suivi à distance des patients. (Nieto *et al.*, 2009) (Isern *et al.*, 2011) (Boudy *et al.*, 2006).
- Autres Systèmes :
En addition à ces catégories, d'autres systèmes dans d'autres disciplines: bio-informatique (Ezziane, 2006) traitement d'images médicales (Richard *et al.*, 2004) (González-Vélez *et al.*, 2009), simulation (Stainsby *et al.*, 2009), peuvent être considérés.

Voyons plus en détail les SMA dédiés à ces domaines et leurs caractéristiques.

4.1.Gestion des données médicales

Patriarca-Almeida *et al.*, ont présenté un modèle, de simulation pour l'optimisation de l'extraction de données, basé sur les agents (Patriarca-Almeida *et al.*, 2011).

Afin de sécuriser les dossiers électroniques des patients, Chen *et al.*, ont développé un agent mobile de sécurité pour les systèmes d'information hospitaliers (Chen *et al.*, 2010). Ces travaux de recherches ont visé principalement à fournir un accès sécurisé, confidentiel et efficace aux dossiers des patients dans un environnement où les données liées aux patients doivent être partagées entre plusieurs unités de soins. Les auteurs ont proposé un système à base de gestion de clés pour faire face aux diverses attaques de sécurité.

Dans d'autres travaux, Lin *et al.*, ont présenté un système basé sur le Web pour fournir une certaine commodité à la recherche des utilisateurs appropriée à leur spécialité (Lin *et al.*, 2012). Schématiquement, le système proposé se compose principalement d'agents intelligents, de composants de business intelligence, d'un entrepôt de données, d'un serveur et d'une interface homme-machine.

4.2.Systèmes d'aide à la décision

Plusieurs systèmes d'aide à la décision ont été proposés pour assister le personnel médical au quotidien.

Parmi ces systèmes nous citons, le système proposé par Ji *et al.*, pour aider les professionnels de santé à détecter des réactions indésirables aux médicaments (Ji *et al.*, 2012). Le système collecte les informations provenant de différents utilisateurs (médecins, pharmaciens, etc.) et gère une base de connaissances. L'« agent assistant » est associé à des professionnels. Il utilise l'algorithme de Naranjo (Naranjo, et al., 1981) pour évaluer les effets indésirables potentiels de l'utilisation d'un médicament en se basant sur les données liées au patient en communiquant avec l'« agent extraction de données ». Ce dernier remplit automatiquement le rapport des effets indésirables destiné au médecin.

Benomrane *et al.*, ont proposé une approche basée sur les agents pour mettre en œuvre un système de découverte de connaissances à partir de bases de données (Benomrane *et al.*, 2013). Les auteurs ont appliqué l'approche proposée pour lutter contre les infections nosocomiales au sein d'une unité de soins intensifs.

Un autre système d'aide à la décision clinique intégré qui couvre l'ensemble du processus de la prise en charge a été proposé par Shirabad *et al.*, (Shirabad *et al.*, 2012). Les auteurs ont développé un système multi-agents qui fournit de nouvelles fonctionnalités à des travaux antérieurs comme la collecte de données, la formulation de diagnostics et la planification du

traitement. Le système est composé de huit agents. Le premier agent, « Access Management Agent », est le contrôleur d'accès au système. Les demandes provenant d'autres agents sont traitées par « Model Manager Agent » en utilisant une base de connaissances. La gestion des données est assurée par « Data Management Agent » alors que l'agent « HIS Synchronizer » assure la synchronisation des données entre les systèmes externes. Le « TreatmentSuggester Agent » propose des traitements. Alors que l'agent « Evidence Provider Agent » fournit des preuves cliniques liées à un plan de traitement pour un patient donné. Finalement, le « Encounter Assistant Agent » permet aux utilisateurs du système d'accéder aux fonctionnalités via une interface homme-machine.

4.3. Planification et allocation des ressources

Nous étudions dans cette section les systèmes multi-agents utilisés pour la planification optimale des ressources hospitalières.

Rahmat *et al.*, ont proposé un modèle de simulation à base d'agent pour le re-triage des patients qui se présentent au service des urgences (Agent based Modelling and Simulation of Emergency Department Re-tirage AMSEDR) (Rahmat *et al.*, 2013). Le système propose une évaluation en temps réel pour réorganiser la file d'attente en fonction de l'état des patients et de la détérioration des conditions pour gérer l'allocation optimale des ressources (médecins et infirmiers) à la tâche la plus urgente en premier.

Un environnement intelligent pour le suivi des patients atteints d'Alzheimer a été proposé par Corchado *et al.*, (Corchado *et al.*, 2008). Les auteurs ont proposé une nouvelle approche de l'allocation des ressources à des patients extérieurs d'un hôpital. Dans le système, la description du problème et les solutions sont représentées sous forme de « croyances » formant ainsi une base de croyances. Quant aux états finaux, ils sont représentés comme « objectifs » regroupés dans la base des objectifs. La base des actions est composée de plusieurs algorithmes. La base de planification est implémentée en utilisant des objectifs et des planifications. Quand un objectif correspond à l'un des objectifs répertoriés dans la base des objectifs, une (ou plusieurs) action(s) est déclenchée pour atteindre cet objectif. Les agents du système sont dotés d'algorithmes de planification dynamiques qui prennent en considération la localisation géographique (en utilisant la technologie RFID) du patient et des ressources à lui allouer.

Le problème de la planification des patients est décrit par Paulussen *et al.*, (Paulussen *et al.*, 2003). Les auteurs ont modélisé l'état de santé des patients, représentés par des agents autonomes, en introduisant la notion de fonction de coût. Les agents doivent alors optimiser ces fonctions dans le but de satisfaire leurs propres objectifs, qui sont l'amélioration de leur état de santé et la minimisation de leur durée de séjour. Le problème d'affectation de créneaux horaires est résolu via une négociation entre deux agents patients modérée par un agent de type ressource selon un mécanisme de gestion de marché. Le processus de négociation est lancé quand le créneau désiré (le créneau le plus proche en fonction de l'attente maximale autorisée par l'état de santé du patient) par un agent patient est déjà occupé. Les agents du personnel hospitalier cherchent à maximiser leur temps d'utilisation et à minimiser leur inactivité.

Plus loin, Paulussen, *et al.*, (Paulussen *et al.*, 2006) ont proposé un mécanisme de coordination à base d'agents pour la planification des patients au sein d'un système hospitalier. Dans cette approche, les agents patients sont en concurrence pour utiliser les ressources hospitalières limitées. Grâce à un mécanisme d'enchères décentralisé, les créneaux sont affectés aux agents patients qui ont l'utilité la plus élevée de ces créneaux horaires.

4.4.Télémédecine

À titre d'exemple, le système TOMAS (Telemedicine-Oriented Medical Assistant) (Della Mea, 2001) a été développé pour assister les praticiens à élaborer un diagnostic en collaboration avec d'autres collègues dans d'autres départements en leur transférant les images microscopiques et les données d'un patient.

D'autres travaux ont traité les soins à domicile, notamment l'architecture du système multi-agents de soins à domicile pour les patients atteints de démence proposée par Huson *et al.*, (Hudson *et al.*, 2010). Leur système est basé sur trois agents logiciels à savoir « Reminder Agent », « Communication Agent », « Surveillance Agent ». En outre, le système contient trois agents humains : les patients, les soignants, et les professionnels médicaux. Le système dispose également de dispositifs permettant l'extraction des données, la communication et le stockage des données.

4.5.Autres systèmes

Moreno (Moreno *et al.*, 2001) a conçu et implémenté un système multi-agents qui fournit un mécanisme rapide pour assurer la disponibilité d'une salle d'opération et une équipe de

transplantation dès l'arrivée d'un organe à transplanter à l'hôpital. L'objectif du système est de trouver une salle d'opération où la transplantation peut être réalisée et de trouver aussi une équipe chirurgicale qui va être attribuée à cette opération. Dans le cas d'indisponibilité des ressources, le système est capable de notifier le coordinateur de transplantation afin de sélectionner un autre patient de la liste d'attente. Un agent est attribué à chaque membre de l'équipe médicale (chirurgien, infirmière et anesthésiste). Chaque jour est divisé en 48 périodes de 30 minutes. Chaque période peut être en trois états : libre, occupé, ou en opération. Quand un agent est notifié que le praticien associé a été attribué à une opération de transplantation, il notifie à son tour le personnel en envoyant un message. Le système contient aussi des agents qui supervisent l'ordonnancement de chaque salle d'opération. Ces agents sont en exécution sur la machine du personnel chargé de la coordination de l'activité des salles d'opération. Cette personne peut accéder aux horaires et les modifier si nécessaire.

D'autres travaux de recherches se sont focalisés sur la conception de Framework qui permet l'intégration de nouveaux comportements, ou de nouvelles solutions innovantes aux systèmes de santé actuels. Parmi ces Framework Hospital-Agent (Kirn *et al.*, 2003) basés sur les agents proposés par Kirn *et al.*, pour les systèmes de soins de santé fortement distribués. Heine *et al.*, (Heine *et al.*, 2003) se sont basés sur ce Framework pour développer le projet ADAPT. L'objectif est d'optimiser les processus ainsi que le flux d'informations. Ainsi, l'allocation des ressources et la planification tactique seront plus efficaces.

6. Conclusions

Les systèmes multi agents ont plusieurs points en commun avec les systèmes hospitaliers.

Tout d'abord, un système hospitalier est par essence fortement distribué, car composé de plusieurs entités aux rôles et compétences différents pour réaliser des tâches indépendantes ou communes, les SMA s'appliquent naturellement à ce type de système, car ils sont intrinsèquement distribués eux-aussi.

Il faut noter également que dans un système hospitalier, la prise de décision pour gérer un parcours patient se fait au travers d'une coordination entre différentes entités de la même manière que les agents dans un SMA utilisent des méthodes de coordination et/négociation pour prendre une décision individuellement ou collectivement.

Par contre, un acteur a accès à des informations souvent incomplètes et partagées le long des frontières du système. Les agents quant à eux partagent les informations et les connaissances par échanges de messages, ce qui vise à améliorer la concertation.

Notons également qu'un parcours patient est décomposé en plusieurs activités de soins et d'activités supports où chaque activité a un responsable. Les agents s'inscrivent dans cette lignée puisqu'ils ont la capacité de déléguer des tâches ou bien les partager pour résoudre des problèmes complexes.

Finalement, un système hospitalier est une structure dynamique, les acteurs peuvent rejoindre ou quitter le processus de soins. Les agents peuvent être ajoutés ou supprimés.

De plus, les SMA héritent aussi des avantages de l'intelligence artificielle à savoir le traitement symbolique, la facilité de maintenance, la portabilité, la réutilisation et les protocoles d'interactions élaborés. Ces interactions peuvent inclure la coopération (travailler ensemble pour atteindre un but commun), la coordination (organiser la résolution d'un problème donné en évitant les interactions nuisibles ou en exploitant les interactions bénéfiques), et la négociation (trouver un accord acceptable pour toutes les parties prenantes). Les SMA représentent alors une solution très adaptée pour modéliser les systèmes hospitaliers à caractère complexe. Plusieurs chercheurs ont creusé cette piste. Les travaux de recherches ont porté sur des sous-domaines du domaine de la santé comme la télémédecine, la gestion des données médicales, la planification et l'allocation des ressources et bien d'autres.

Cependant, le paradigme agent n'est pas suffisant pour une mise en œuvre efficace. C'est pourquoi dans la majorité des travaux basés sur les agents, des techniques de recherche opérationnelle sont utilisées pour assurer un aspect d'optimisation. Dans ce qui suit, nous présentons les méthodes de recherche opérationnelle les plus utilisées pour optimiser les systèmes hospitaliers.

V. Méthodes de recherche opérationnelle et leurs applications aux systèmes hospitaliers

1. Introduction

Les systèmes hospitaliers doivent faire face à de nouveaux enjeux. L'objectif primordial de tout système hospitalier est l'amélioration de la qualité des soins tout en apportant des gains

significatifs en termes de productivité et d'efficacité. Une organisation efficiente des activités de soins s'avère alors nécessaire. Des techniques de recherche opérationnelle issues du domaine du génie industriel peuvent apporter des solutions à la problématique de la gestion efficace des systèmes hospitaliers. Certes, les domaines hospitalier et industriel ont des similitudes, mais diffèrent sur un élément crucial : dans le domaine industriel, nous nous intéressons aux produits et aux machines, tandis que dans le domaine hospitalier nous nous intéressons aux patients et au personnel hospitalier.

La communauté de la recherche opérationnelle participe activement à la résolution des problèmes qui relèvent du dimensionnement, de l'allocation des ressources, de la programmation journalière et de la gestion des aléas selon les trois niveaux de décision : stratégique, tactique et opérationnelle.

Les chercheurs du domaine industriel maîtrisent une panoplie de méthodes et d'outils qui ont fait leurs preuves pour la gestion des systèmes de production.

Ainsi, le groupe de travail Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH) a été créé au sein du Groupement de Recherche Modélisation, Analyse et Commande des Systèmes dynamiques (GdR MACS) du CNRS.

Nous présentons tout d'abord une revue de la littérature selon les trois niveaux de décisions. Nous détaillons des travaux qui s'intéressent aux problèmes liés à l'organisation générale des systèmes hospitaliers (niveau stratégique), aux problèmes de planification et d'ordonnancement des activités de soins (niveau tactique) et finalement à la gestion des aléas (niveau opérationnel).

Ensuite, nous focalisons cette étude bibliographique sur les applications de la recherche opérationnelle aux systèmes hospitaliers. Nous terminons avec des conclusions et discussions.

2. Recherche opérationnelle : applications aux systèmes hospitaliers

La Recherche Opérationnelle (RO) en santé est d'abord et avant tout une application des techniques de la RO en mettant l'accent sur les spécificités des systèmes hospitaliers.

La littérature regorge de revues et de synthèses sur l'application des techniques de la RO aux systèmes de santé ou à leurs composantes. (Brailsford & Vissers, 2011) (Trust, 1955) (Campbell *et al.*, 2002) (Boldy, 1976) (Lavieri *et al.*, 2015).

Brailsford et Vissers ont présenté un cadre d'étude pour analyser et discuter les applications de la RO dans le domaine de la santé présenté lors des conférences organisées par ORAHS (Brailsford & Vissers, 2011). Ce cadre d'étude centré-utilisateur est basé sur une combinaison de cycle de vie du produit comme a été proposé par (Royston, 1998) et les niveaux de décision comme préconisés par (Vissers, 1998).

La Figure 7 représente ces deux niveaux de ségrégation des travaux de recherches étudiés.

Il ressort de cette étude quantitative de plus de 1000 papiers que la communauté européenne s'est intéressée plus au problème de la gestion de la performance au niveau des services et des hôpitaux avec 40% de l'ensemble des communications. Les moins étudiés (entre 5 et 7%) sont les problèmes d'allocation des ressources et d'estimation de la demande.

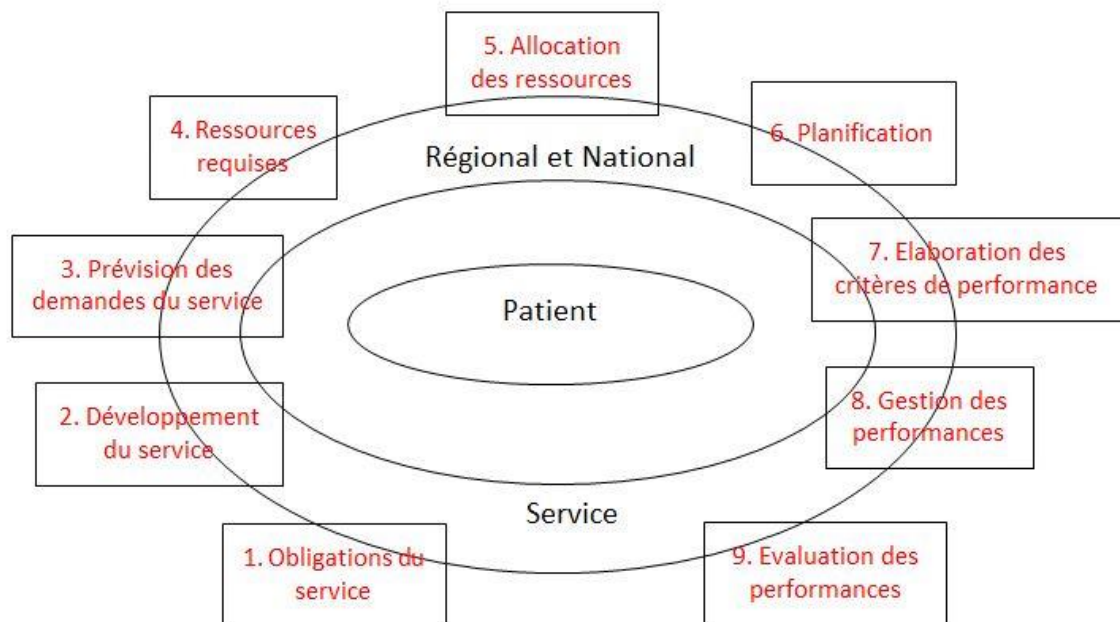


Figure 7 : Domaines d'application de la RO dans le domaine de la santé (Brailsford, 2011)

Une autre classification des applications de la recherche opérationnelle aux systèmes de santé peut être considérée selon les méthodes de résolution utilisées :

- **Programmation linéaire**

Parmi toutes les techniques de la RO, la programmation mathématique, plus particulièrement la programmation linéaire (PL) est, peut-être, la plus connue et la plus utilisée. De plus cette technique a fait ses preuves dans le domaine industriel en apportant des solutions d'aide à la décision.

Les problèmes opérationnels, tels que l'affectation des ressources, sont souvent résolus par le biais d'un processus d'allocation. Habituellement, ce processus est soumis à des contraintes temporelles, de précédences, de ressources limitées ou autres. Dans le cas où le critère pour une allocation optimale est la maximisation ou la minimisation d'une quantité donnée qui mesure l'efficacité de l'allocation, la programmation linéaire est une technique appropriée à utiliser. Ainsi, la fonction objectif et les contraintes sont exprimées sous forme de combinaison linéaire des variables de décision. Plusieurs chercheurs ont utilisé la PL pour répondre aux problématiques de dimensionnement (Lavieri et al., 2015), de planification (Jebali *et al.*, 2003) (Wang *et al.*, 2009) et d'ordonnancement (Bachouch *et al.*, 2007) (Bouguerra *et al.*, 2015) au sein des systèmes hospitaliers (Luenberger & Ye, 1984) (Bachouch *et al.*, 2007) (Hulshof *et al.*, 2013) (Wang *et al.*, 2009).

- **Programmation stochastique**

En raison du caractère incertain des processus de prise en charge, l'utilisation des modèles déterministes est très discutable. Le recours à des modèles stochastiques est alors une nécessité.

La programmation stochastique est souvent incluse dans les outils de simulation. Elle permet d'anticiper la variabilité et de définir les phénomènes de caractère aléatoire en se basant sur des données antécédentes.

La programmation stochastique est la programmation mathématique sous incertitude. Elle constitue un complément des familles de problèmes d'optimisation à savoir la programmation linéaire, non-linéaire et dynamique, lorsque la notion d'incertitude intervient.

La littérature autour de la programmation stochastique est riche (Kali & Wallace, 1994) (Birge & Louveaux, 2011) (Pagel *et al.*, 2008).

- **Heuristiques**

Les heuristiques sont utilisées pour résoudre les problèmes difficiles où l'utilisation d'une méthode de résolution exacte est très coûteuse en termes de temps d'exécution. Elles sont des méthodes de résolution approchées qui permettent de trouver une solution réalisable et acceptable en un temps déterminé.

À l'instar des autres méthodes de résolution, des heuristiques ont été proposées pour résoudre les différents problèmes liés à la programmation opératoire (Bouguerra, 2016), la gestion des lits d'hospitalisation (Akcali *et al.*, 2006), à l'affectation des lits (Demeester *et*

al., 2010), ou encore à l'ordonnancement de plusieurs salles d'opération avec prise en compte des lits de réveil (Marcon & Dexter, 2006) (Iser *et al.*, 2008).

- **Simulation**

La simulation est une technique consistant à construire une représentation informatique du système étudié, afin d'observer son comportement sous des conditions bien définies.

La simulation est largement utilisée dans la littérature pour comprendre et analyser le fonctionnement des systèmes hospitaliers (Ramis *et al.*, 2001). Au service des urgences par exemple, la simulation a été utilisée dans le but d'ajuster le nombre des équipes médicales (Wang *et al.*, 2009) et de dimensionner le nombre de lits nécessaires pour accueillir les patients (Ferrin *et al.*, 2004).

- **Modélisation Markovienne**

Un modèle de Markov est un modèle stochastique utilisé pour modéliser du changement aléatoire du système en supposant que l'état futur ne dépend que de l'état actuel.

Les modèles de Markov ont été proposés par Kao (Kao, 1974) afin d'analyser les différents flux de patients dans les unités de soins et estimer leurs durées de séjour et calculer par la suite les ressources (personnels de soins et lits d'hospitalisation) nécessaires (Thomson *et al.*, 2009) (Green *et al.*, 2006) (Patrick *et al.*, 2008).

- **Théorie des files d'attente**

C'est une théorie mathématique, considérée comme une extension des modèles markoviens et basée sur les probabilités. Elle est utilisée pour répondre aux problèmes de dimensionnement de ressources et d'équipes (Gorunescu *et al.*, 2002) (Green & Savin, 2008), notamment dans le service des urgences (Laskowski *et al.*, 2009).

2.1.Niveau stratégique

Au niveau stratégique, les problèmes rencontrés au sein des systèmes hospitaliers correspondent à des horizons de temps lointains, à savoir l'architecture, la réingénierie (Ducq *et al.*, 2005) ou le dimensionnement.

Certains travaux s'intéressent particulièrement au problème de dimensionnement du bloc opératoire, des plateaux médicaux-techniques (Marcon, 2004) (Marcon, 2003) (S Rodier, 2008), des lits ou des ressources humaines

Beliën *et al.*, (Beliën *et al.*, 2009) ont présenté un système d'aide à la décision « *cyclic master surgery scheduling* ». Trois objectifs ont été pris en compte dans ce système. Tout d'abord, maximiser le taux d'occupation des lits dans les unités d'hospitalisation dans la mesure du possible. À cet effet, le modèle présenté dans (Beliën & Demeulemeester, 2007) a été adopté et incorporé dans le système. Deuxièmement, une salle d'opération est mieux allouée exclusivement à un groupe de chirurgiens de la même spécialité. Le programme d'interventions chirurgicales doit être le plus simple et le plus répétitif possible avec des petits changements d'une semaine à l'autre. Le système repose sur les techniques de programmation mixte en nombres entiers impliquant la résolution de problème d'optimisation multi objectifs et en recuit simulé.

Une approche markovienne a été utilisée par Kapadia *et al.* (Kapadia *et al.*, 2000), afin d'estimer la durée de séjour des patients et l'évolution de leur état de santé dans une unité de soins intensifs en pédiatrie. Les auteurs ont défini trois états possibles du patient : haut, moyen et bas. La sortie du patient est représentée comme un état absorbant. Les résultats ont montré que dans 75% des cas, l'évolution du patient est indépendante du temps et qu'une matrice de transition peut être considérée. Ce modèle présente un avantage dans l'estimation du besoin en ressources vu que l'état du patient est connu.

2.2.Niveau tactique

La planification vise à allouer les ressources pour chaque intervalle de temps au moyen terme, de telle sorte que les besoins par intervalle soient couverts et que les différentes contraintes (juridiques, sociales, techniques, économiques) soient satisfaites (Chan, 2002).

Plusieurs problèmes d'allocation peuvent être modélisés par un programme linéaire (non-linéaire ou en nombre entier). Hulshof *et al.*, ont proposé une méthode pour établir une allocation tactique des ressources hospitalières et une planification des admissions des patients électifs (non urgents) (Hulshof *et al.*, 2013). Dans cette méthode, les ressources disponibles sont allouées aux différents processus de soins et les patients qui doivent être pris en charge et qui sont à un stade de leur processus de soins sont sélectionnés. Les auteurs se basent sur la programmation linéaire en nombres entiers mixtes en considérant un ensemble de ressources, de périodes et de groupes de patients avec différents parcours de soins incertains possibles. Cette approche est générique. Elle permet d'inclure diverses extensions : à la fois les objectifs et les contraintes. Par conséquent, elle est applicable dans divers contextes de gestion tactique de l'hôpital.

Dans d'autres travaux, Fei *et al.*, (Fei *et al.*, 2010) ont proposé une planification hebdomadaire du bloc opératoire où les plages horaires sont réservées pour les chirurgiens et non par spécialité. Ils considèrent les salles d'opération ainsi que les salles de réveil. L'objectif est de minimiser l'utilisation des salles d'opération, le coût des heures supplémentaires d'ouverture de bloc et le temps d'attente entre deux interventions chirurgicales. Ce problème d'ordonnancement et de planification opérationnelle est résolu en deux phases. Premièrement, le problème de planification est résolu pour préciser la date de l'intervention pour chaque patient suivant les disponibilités des chirurgiens et des salles d'opération. Ensuite, un ordonnancement journalier est conçu pour déterminer la séquence d'opérations dans chaque salle d'opération pour chaque jour en tenant en compte la disponibilité des lits de réveil. Le problème de planification est décrit comme un problème de cette partition en nombres entiers et résolu par une heuristique de génération de colonnes. En se basant sur les résultats obtenus lors de la première phase, le problème d'ordonnancement journalier est traité comme un flow shop hybride à deux étages et résolu par un algorithme génétique hybride.

Guinet et Chaabane (Guinet & Chaabane, 2003) ont modélisé le problème de planification des interventions à l'aide d'un programme linéaire en nombres entiers permettant d'affecter une salle d'intervention et un créneau horaire à chaque intervention inscrite au programme. L'objectif de ce modèle est de minimiser le temps d'attente du patient (c'est-à-dire l'écart entre la date d'hospitalisation et la date d'intervention) et les coûts des heures supplémentaires (c'est-à-dire les heures d'ouverture du bloc opératoire). Les auteurs ont proposé une heuristique axée sur une extension de la méthode hongroise pour résoudre le problème.

Lamiri *et al.*, (Lamiri *et al.*, 2008) ont élaboré un modèle stochastique pour la planification des salles d'opération avec deux types de demandes de chirurgies : électives (ou prévues) et urgentes. Le problème de planification consiste à affecter les cas électifs à différentes périodes dans l'horizon de planification afin de minimiser la somme des coûts liés aux patients électifs et les coûts supplémentaires de salles d'opération. Les auteurs ont proposé dans le même travail une méthode d'optimisation de Monte-Carlo combinant la simulation de Monte-Carlo et la programmation en nombres entiers.

Dans leurs travaux Meskens *et al.*, (Meskens *et al.*, 2013) ont considéré les préférences de l'équipe chirurgicale en élaborant l'ordonnancement d'une salle d'opération. Afin de prendre en compte les multiples contraintes du monde réel (disponibilités, préférences de l'équipe chirurgicale et l'affinité entre les membres de l'équipe) dans leur modèle, les auteurs se sont

reposés sur le paradigme de programmation par contraintes. L'objectif est d'optimiser l'utilisation des salles d'opération en minimisant le makespan ainsi que les heures supplémentaires d'ouverture et en maximisant l'affinité entre les membres de l'équipe chirurgicale. Les auteurs ont développé un modèle général qui prend en compte la majorité des problèmes issus de la littérature. Le cœur du modèle assure que toutes les contraintes de base sont prises en compte. En outre, grâce à sa modularité, le modèle ici en question peut prendre en compte d'autres contraintes à savoir les préférences et les disponibilités des membres de l'équipe chirurgicale.

2.3.Niveau opérationnel

Guinet et Chaabane (Guinet & Chaabane, 2003) ont abordé la question de l'ordonnancement des interventions sur les salles, en prenant en considération la phase de réveil dans leur démarche. Ils ont modélisé le problème comme un flow-shop hybride à deux étages avec temps d'attente dont l'objectif est de minimiser les coûts (heure de fin de programme opératoire). Les auteurs ont étendu ces travaux (Chaabane & Guinet, 2004) en considérant les brancardiers comme troisième étage d'un flow-shop hybride avec contraintes de précédence.

Pham et Klinkert (Pham & Klinkert, 2008) ont présenté une nouvelle approche d'ordonnancement des blocs opératoires basée sur une extension du problème d'ordonnancement Job Shop nommée Multi-ModeBlocking Job Shop (MMBJS). Ils formalisent le problème de MMBJS en utilisant la programmation en nombres entiers mixtes. L'objectif est de minimiser la somme pondérée des makespans et la somme des heures de départ de l'ensemble des interventions chirurgicales.

Augusto et Xie (Augusto *et al.*, 2010) ont étudié l'impact d'une nouvelle politique de réveil : la possibilité de se servir des salles opératoires lorsque la salle de réanimation est surchargée et ils montrent, grâce à leur méthode basée sur des approches par relaxation lagrangienne, que cette politique serait particulièrement bénéfique pour les services dont la salle de réanimation est surchargée. Trois ressources hospitalières partagées ont été considérées dans ce travail : les brancardiers, les salles d'opération et les salles de réveil.

Mazier *et al.*, (Mazier *et al.*, 2010) ont étudié un ensemble d'outils de planification pour s'adapter au mieux aux événements qui peuvent perturber la gestion du flux de patients dans les unités de soins. Ils ont traité en premier lieu la planification des dates d'admission des patients réguliers tout en tenant compte, par optimisation de Monte-Carlo, de l'impact de ce

choix sur les nouveaux patients qui se présenteraient. Ensuite, l'affectation du patient aux unités de soins s'est faite sous forme d'un problème de couplage entre patients.

3. Conclusions

Les travaux, de recherches, rapportés dans la littérature et portant sur l'application des techniques de la recherche opérationnelle dans le domaine de santé se sont focalisés généralement sur des services bien particuliers (blocs opératoires, services des urgences).

Le bloc opératoire est un des services les plus coûteux de l'hôpital ; par contre, il génère beaucoup de recettes d'où l'intérêt porté à sa gestion. La littérature regorge aussi de problèmes illustrant la complexité de la gestion d'un bloc opératoire, ce aussi bien en matière de dimensionnement, de planification que d'ordonnancement.

Le second service le plus étudié dans la littérature est le service des urgences.

Par ailleurs, la majorité des travaux sont fondés sur une approche centrée sur une seule ressource, souvent considérée comme critique, les lits d'hospitalisation, les lits de réanimation, le bloc opératoire et les infirmiers.

En synthèse, nous ne pouvons manquer de constater que dans cette étude bibliographique, la technique de programmation linéaire est utilisée plus pour modéliser les problèmes d'allocation au niveau tactique que pour prendre en charge le niveau stratégique associé à ces derniers. D'un autre côté, la simulation reste la technique la plus utilisée pour résoudre les problèmes de dimensionnement dans le domaine hospitalier. En analogie avec le domaine industriel, cette technique permet de reproduire ou de prédire l'aspect dynamique du fonctionnement d'un système de production de biens.

VI. Synthèse : positionnement de nos travaux de recherches

Les systèmes hospitaliers évoluent dans un contexte de plus en plus contraint à une politique de réduction des dépenses de santé qui ne cesse de croître et aux exigences réglementaires rigoureuses. Les établissements de soins sont alors amenés à remettre en cause leur organisation afin de maîtriser les budgets et l'allocation de ressources humaines et matérielles limitées tout en assurant une prise en charge de patients exigeants.

Dans cette lignée, plusieurs travaux de recherches se sont intéressés aux problématiques liées aux systèmes hospitaliers. L'objectif de ces travaux est d'adapter les méthodes et outils de la gestion des systèmes de production du domaine industriel au domaine hospitalier. Des thèmes

divers et variés sont abordés : systèmes d'information hospitaliers ; stratégie, modélisation et ingénierie des systèmes hospitaliers ; management et planification des ressources ; logistique et configuration des ressources ; modélisation et évaluation socioéconomique des systèmes hospitaliers ; constitution et pilotage des réseaux de soins et de santé (Di Mascolo & Monteiro, 2013).

Par contre, un thème est peu traité, il s'agit de celui que nous abordons dans le cadre de cette thèse : le pilotage réactif de l'ensemble des parcours patients qui regroupe plusieurs thématiques de recherches à savoir : la modélisation et l'ingénierie des systèmes hospitaliers, la planification des ressources et le pilotage des réseaux de soins.

Pour traiter cette problématique, plusieurs outils et méthodes s'offrent à nous. Nous citons les méthodes et outils de la modélisation et la simulation de flux, de la recherche opérationnelle (RO), de l'analyse fonctionnelle et de processus et de la (ré)ingénierie des systèmes complexes.

L'utilisation de la programmation linéaire comme approche de modélisation est souvent limitée en termes de temps de calcul quand la taille du problème est assez conséquente, ce qui est le cas dans notre problème. De plus, le caractère incertain des parcours patients n'est pas pris en compte par ce type d'approches.

Certes, la programmation stochastique vient pallier à cette limite et permet de traiter les problèmes à caractère aléatoire en se basant sur des données antécédentes, mais les systèmes d'information actuels des centres hospitaliers ne nous permettent pas d'avoir des informations complètes. Ce type d'approches n'est donc pas bien adapté à notre problématique.

Nous pouvons faire le même constat pour les approches basées sur la simulation. En effet, elles se basent sur une reproduction du comportement d'un système sous des conditions bien définies. Ce qui est loin d'être le cas des systèmes hospitaliers comme on l'a discuté dans la partie II.

Les heuristiques peuvent être une piste intéressante pour le pilotage réactif des parcours patients, d'autant plus qu'elles ont prouvé leur efficacité pour la résolution de problèmes d'affectation et d'ordonnancement des ressources hospitalières. Cependant, la majorité des heuristiques proposées dans la littérature, sont centrées sur une ressource souvent considérée comme critique comme les lits d'hospitalisation, les lits de réanimation, le bloc opératoire et

les infirmiers ce qui ne reflète pas la réalité du terrain. En outre, ces ressources sont souvent traitées de façon indépendante dans la littérature. Un patient ne peut pas être opéré à temps si aucun brancardier n'est disponible pour le transporter de son lit d'hospitalisation au bloc opératoire.

Le modèle qui se rapproche le mieux de la réalité du terrain c'est la théorie des files d'attente. Cette théorie repose sur les modèles markoviens et sur des probabilités. En revanche, il n'existe pas, au moins à notre connaissance, un modèle mathématique qui décrit le caractère aléatoire des parcours patients. En absence de ce modèle, les files d'attente ne peuvent pas être appliquées. A l'instar de cette analyse, les méthodes et outils classiques de la RO seuls ne semblent pas être totalement adaptées pour répondre à notre problématique. Néanmoins, nous utilisons la modélisation mathématique pour exprimer nos objectifs ainsi que les contraintes liées à la gestion des parcours patients.

Nous nous sommes alors intéressés au paradigme agent du fait que nous avons déjà utilisé ces notions pour résoudre des problèmes complexes comme la planification dynamique des tournées de véhicules (Benhajji, 2013) et le pilotage réactif d'ateliers de production (Roy, 1998). En effet, les propriétés des agents : autonomie, proactivité et capacités sociales ainsi que l'architecture des systèmes multi-agents qui offre des possibilités de traitement distribué des données, de communication, de coordination et de négociation se révèlent une piste très prometteuse pour modéliser un système de pilotage réactif capable de planifier et ordonnancer les activités de soins en temps réel et les réajuster en cas de perturbations.

Gardons à l'esprit que l'objectif de nos travaux de recherches n'est pas de proposer une nouvelle méthode de résolution de problèmes complexes, mais plutôt de discerner une application possible des résultats des recherches fondamentales (la modélisation mathématique, les systèmes multi-agents, les protocoles d'interaction entre agents) pour trouver une solution pour atteindre notre objectif qui est le pilotage réactif des parcours patients au sein des systèmes hospitaliers.

Chapitre II : **Modélisation**

I. Introduction

« La modélisation est la représentation d'un système réel dans un langage approprié, par la formalisation et la capitalisation de connaissances sous une forme compréhensible et utilisable par diverses personnes ou divers logiciels, tel qu'elle puisse reproduire un fonctionnement ou prédire un comportement sous d'autres conditions » (Claver, Gélinier, & Pitt, 1997).

Il ressort de cette définition qu'un modèle est une représentation simplifiée d'un système pour résoudre un problème s'y rapportant.

La modélisation offre, entre autres, une meilleure compréhension du système, une analyse des dysfonctionnements, une simulation du comportement du système, une évaluation des performances ou encore une spécification d'application informatique.

Dans la littérature, nous distinguons plusieurs familles d'approches de modélisation : les approches orientées données : **FDM** (Functionnal Data Model) (Ramsay, 2006), **SDM** (Semantic Data Model) (Peckham & Maryanski, 1988), les approches orientées fonctions : **SADT** (Structured Analysis and Design Technique) (Marca & McGowan, 1987), les approches orientées événements (réseau de Pétri) et enfin les approches orientées objets : **UML** (Unified Modeling Language) (Muller & Gaertner, 2000) et **ARIS** (Architecture of integrated information systems) (Scheer, 1994), les approches orientées agents (Ferber, 1995) ou encore les modèles mathématiques.

Dans ce deuxième chapitre, nous décrivons les modèles que nous avons élaborés.

La première partie est consacrée à la modélisation des parcours de soins au sein d'un système hospitalier sous forme d'un diagramme de flux des patients afin de comprendre et analyser le processus de prise en charge. Nous détaillons ensuite le modèle mathématique proposé dans la deuxième partie qui nous permettra d'exprimer nos objectifs et contraintes sous forme d'équations mathématiques que nous allons résoudre en utilisant un solveur. Quant à la troisième partie, elle définit plus en détail les vues systémiques de notre système en utilisant une approche de modélisation orientée objets, à savoir UML. Nous proposons ensuite notre modélisation à base d'agents dans le chapitre III.

II. Parcours de soins

1. Introduction

Il y a des années, la prise en charge des patients reposait sur une succession d'actes de soins isolés et réalisés par plusieurs professionnels de santé. De cela résultait un manque de traçabilité et de visibilité. C'est ainsi que le terme de « parcours » a émergé lors des réformes du secteur de la santé. Cependant, plusieurs rapports du Haut Conseil pour l'Avenir de l'Assurance Maladie (HCAAM) ont pointé des dysfonctionnements concernant le parcours de soins du patient. Dans ce contexte, une nouvelle réforme du système de santé, nommée Stratégie Nationale de Santé (SNS) a vu le jour.

L'amélioration de la qualité de la prise en charge et de l'accompagnement des patients passe d'abord par de bonnes pratiques professionnelles, mais elle doit aussi s'appuyer sur la promotion du parcours de soins. La démarche consiste à mettre en place une meilleure coordination des interventions des professionnels en se basant sur les bonnes pratiques instaurées par la HAS lors de l'accompagnement du patient. Cette démarche permet notamment de développer des actions d'anticipation, d'échanges d'informations et de coordination entre les différents acteurs impliqués. Toutefois, le nombre de professionnels concernés varie en fonction de la complexité de la situation et la poly pathologie obligeant en conséquence à augmenter l'effort de coordination.

L'amélioration des parcours du patient est devenue alors un enjeu de santé publique et une priorité stratégique pour la HAS. C'est pour cette raison qu'elle s'est imposé comme un objectif incontournable de la certification V2014.

S'intéresser au parcours du patient impose la modélisation des parcours de soins du patient de manière à identifier les besoins de prises de décisions permettant d'élaborer les méthodes et les outils pertinents qui leur sont associés.

2. Définitions

Selon la HAS, « *les parcours de santé résultent de la délivrance coordonnée de prestations sanitaires et sociales pour répondre aux besoins de prévention et de soins de personnes, dans le cadre de dépenses maîtrisées. Pour cela, les professionnels doivent s'organiser de telle*

sorte que soient délivrées les bonnes prestations aux bons patients, au bon moment et par les bons professionnels.» (HAS, 2015).

« Les parcours de soins comprennent, pour le patient, le juste enchaînement et au bon moment de ces différentes compétences professionnelles liées directement ou indirectement aux soins : consultations, actes techniques ou biologiques, traitements médicamenteux et non médicamenteux, prise en charge des épisodes aigus (décompensation, exacerbation), autres prises en charge (médico-sociales notamment, mais aussi sociales) » (HAS, 2012).

L'Agence Régionale de Santé (ARS) définit le parcours de soins comme *« la prise en charge globale du patient et de l'usager dans un territoire donné, avec une meilleure attention portée à l'individu et à ses choix, nécessitant l'action coordonnée des acteurs de la prévention, du sanitaire, du médico-social, et intégrant les facteurs déterminants de santé que sont l'hygiène, le mode de vie, l'éducation, le milieu professionnel et l'environnement ».* (SGMCAS, 2012)

L'ARS englobe dans le parcours de soins les soins de premier recours, l'hospitalisation évitable au sein des services des urgences, les soins de suite et de réadaptation, l'hospitalisation à domicile, les établissements d'hébergement des personnes âgées dépendantes et l'unité de soins de longue durée.

Une définition plus large peut en découler : *« ensemble des étapes que le patient traverse en réponse aux spécificités de sa pathologie et de sa situation individuelle, tout au long de sa maladie ».*

Après plusieurs entretiens avec les professionnels de santé, nous avons modélisé les parcours qu'un patient peut suivre. La Figure 8 représente les parcours patients possibles au sein d'un système hospitalier. Il est à noter que les soins qui s'effectuent hors de l'hôpital, comme l'hospitalisation à domicile, ne sont pas pris en compte dans notre modélisation, de même qu'une sortie « temporaire » (une consultation, puis une opération programmée quelques jours plus tard, par exemple) du patient du système. Dans notre vision, il apparaît alors comme quittant l'hôpital, et ré-entrera alors plus tard (étant entendu que son dossier est conservé dans l'intervalle).

3. Modélisation du parcours de soins

Les consultations (médicales, chirurgicales et anesthésiques) peuvent intervenir soit comme l'équivalent d'une consultation en ville, soit pour préparer une hospitalisation et/ou une

intervention chirurgicale, soit encore pour assurer un suivi médical après ou durant une hospitalisation ou après une intervention.

Une hospitalisation peut être programmée ou recommandée par un praticien suite à une consultation ou une urgence. Pour chaque hospitalisation, le patient doit se présenter au bureau des admissions afin de remplir les documents administratifs et fournir certaines informations médicales.

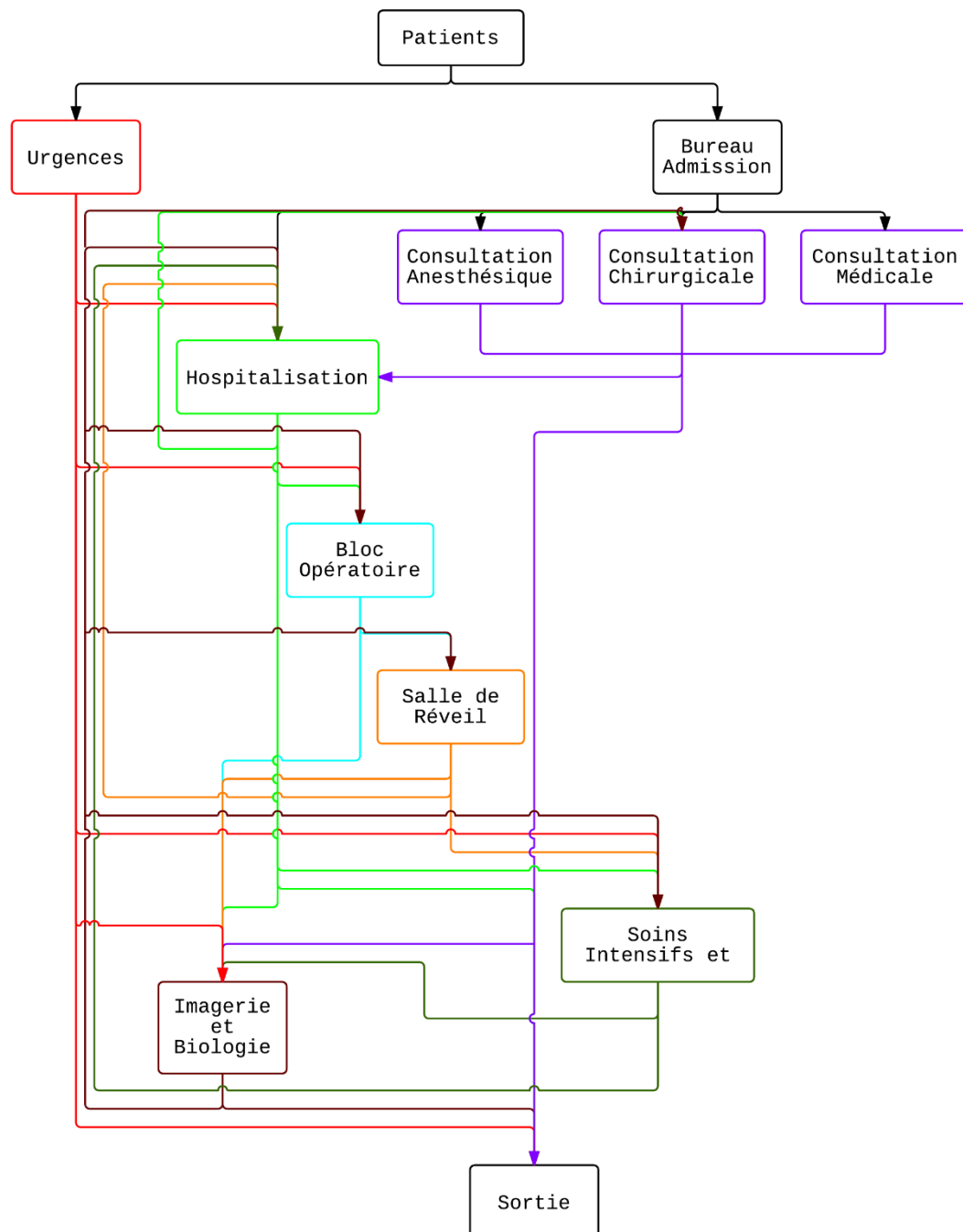


Figure 8 : Parcours de soins du patient

Avant chaque intervention chirurgicale, le patient doit effectuer une consultation anesthésiste. Le patient est admis au service d'hospitalisation après l'accord du médecin anesthésiste réanimateur. Il est ensuite transporté au bloc opératoire pour être préparé pour l'intervention. Si l'intervention se déroule sans complication, le patient est conduit à la salle de réveil. Le cas échéant, il est conduit à l'unité des soins intensifs et réanimation. Il est à noter que le patient peut être opéré directement en cas d'urgence.

En cas de dégradation de l'état du patient nécessitant des soins intensifs ou une réanimation, il est admis immédiatement dans une salle de soins intensifs et réanimation.

Des examens complémentaires (imagerie ou biologie) peuvent être requis à tout moment lors du séjour du patient dans un hôpital (consultations, hospitalisation, intervention chirurgicale, salle de réveil, unité de soins intensifs et réanimation ou urgences).

Pour résumer, le flux des patients représente le flux principal. La notion de flux est associée à la notion de processus de prise en charge. Le flux des patients est caractérisé par son aspect aléatoire. En effet, il n'est pas toujours possible de prévoir de façon certaine le traitement à suivre par un patient. Le traitement évolue au fur et à mesure de l'évolution de l'état du patient. Cet aspect aléatoire du flux des patients rend difficile l'analyse et la modélisation du parcours patient.

3. Conclusions

Nous nous sommes intéressés à l'analyse et la modélisation des parcours de patients au niveau opérationnel. Cette cartographie des parcours des patients constitue la charpente de base pour la suite de notre modélisation. Cela nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes de productions des soins, les contraintes de précédence entre les opérations élémentaires ainsi que la complexité de la gestion de flux des patients. Il est alors possible de planifier les activités de soins (recommandées par le(s) praticien(s)) associées à ces parcours) pour mieux maîtriser leurs déroulements. À cet effet, nous avons développé, en premier lieu un programme mathématique non linéaire pour la planification et l'ordonnancement des actes de soins.

III. Modèle mathématique

1. Introduction

La modélisation mathématique est la technique de la RO la plus utilisée pour répondre aux problèmes de planification en général et d'ordonnancement des activités de soins pour le cas qui nous intéresse ici.

Nous avons modélisé le problème de planification et d'ordonnancement des parcours patients sous forme d'un programme non-linéaire, à l'aide de variables binaires de décisions soumises à des contraintes, tout en optimisant un objectif multicritère. Notons que nous avons discrétisé l'espace-temps en créneaux horaires de cinq minutes. Dans la suite du manuscrit, le problème que nous modélisons est noté (P) .

2. Notations

- **Indices :**

- t : indice du temps, $t \in \{1, \dots, n_t\}$
- p : indice du patient, $p \in \{1, \dots, n_p\}$
- l : indice de l'acte de soin, $l \in \{1, \dots, n_l\}$
- j_i : $i^{\text{ème}}$ acteur de type j , $i \in \{1, \dots, n_j\}$, $j \in \{1, \dots, n_a\}$
- k_i : $i^{\text{ème}}$ ressource de type k , $i \in \{1, \dots, n_k\}$, $k \in \{1, \dots, n_r\}$

- **Constantes :**

- n_t : nombre de créneaux horaires
- n_p : nombre de patients
- n_l : nombre d'actes de soins médicaux
- n_a : nombre de types d'acteurs
- n_j : nombre d'acteurs de type j
- n_r : nombre de types de ressources
- n_k : nombre de ressources de type k

- **Ensembles :**

- $\mathcal{T} = \{1, \dots, n_t\}$: ensemble des créneaux horaires
- $\mathcal{P} = \{1, \dots, n_p\}$: ensemble des patients
- $\mathcal{L} = \{1, \dots, n_l\}$: ensemble d'actes de soins médicaux à programmer

- $\mathcal{A} = \{1, \dots, n_a\}$: ensemble des types d'acteurs dans l'hôpital
- $\mathcal{R} = \{1, \dots, n_r\}$: ensemble des types de ressources dont dispose l'hôpital
- $\mathcal{L}_p = \{l\}_{l \in \mathcal{L}}$: ensemble des actes de soins requis pour le patient p
- $\mathcal{A}_{p,l} = \{j\}_{j \in \mathcal{A}}$: ensemble de types d'acteurs requis pour l'acte de soin l pour le patient p
- $\mathcal{R}_{p,l} = \{k\}_{k \in \mathcal{R}}$: ensemble de types de ressources requises pour l'acte de soin l pour le patient p
- **Données :**
 - dur_l : durée estimée de l'acte de soin l
 - $ed_{p,l}$: date au plus tôt pour programmer l'acte de soin l pour le patient p
 - $ld_{p,l}$: date au plus tard pour programmer l'acte de soin l pour le patient p
 - W_{j_i} : charge horaire de l'acteur j_i
 - α_{j_i} : taux de travail de l'acteur j_i
 - $P_{p,l}$: coût de l'acte médical l pour le patient p
 - C_j : coût unitaire de l'acteur de type j
 - β_j : pénalité pour le dépassement des heures réglementaires pour l'acteur de type j
 - C_k : coût unitaire de la ressource de type k
 - β_k : pénalité pour le dépassement des heures réglementaires pour la ressource de type k

3. Variables de décision

Le présent modèle mathématique permet d'affecter les acteurs et les ressources requis pour un acte de soin pour chaque patient à un instant donné. Pour ce, nous avons utilisé trois variables de décision :

$$X_{p,l,t} = \begin{cases} 1 & \text{si l'acte médical } l \text{ est programmé à l'instant } t \text{ pour le patient } p \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

$$Y_{j_i,l,t} = \begin{cases} 1 & \text{si le } i^{\text{ème}} \text{ acteur de type } j \text{ performe l'acte médical } l \text{ pour le patient } p \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

$$Z_{k_i,l,t} = \begin{cases} 1 & \text{si la } i^{\text{ème}} \text{ ressource de type } k \text{ est utilisée pour l'acte médical } l \text{ pour le patient } p \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

- La variable $X_{p,l,t}$ permet de programmer à l'instant t l'acte de soin l pour le patient p . La variable est égale à 1 si l'ensemble des acteurs requis ainsi que les ressources requises sont affectés au patient p à l'instant t , selon leurs disponibilités.
- La variable $Y_{j,i,l,t}$ définit si l'acte médical l sera traité par le $i^{\text{ème}}$ acteur de type j à l'instant t .
- La variable $Z_{k,i,l,t}$ définit si l'acte médical l sera traité en utilisant la $i^{\text{ème}}$ ressource de type k à l'instant t .

4. Fonctions objectifs

Dans ce modèle, nous visons à prendre en charge le maximum d'actes de soins médicaux possibles (4). Nous nous intéressons aussi au lissage des charges du personnel et des ressources hospitalières en maximisant leur occupation (5) (6). Finalement, sur le plan économique, l'objectif est de maximiser les profits (7). Pour cela, nous calculons les recettes des actes médicaux qui ont été programmés. À ceci, nous soustrayons les coûts des ressources humaines et matérielles utilisées.

- Maximiser le nombre des actes médicaux programmés

$$\max \left(\sum_{p=1}^N \sum_{l \in L_p} X_{p,l,t} \right) \quad (4)$$

- Maximiser le taux d'occupation des acteurs

$$\max \left(\sum_{p=1}^N \sum_{l \in L_p} Y_{j,i,p,t} \times X_{p,l,t} \times dur_{p,l} \right) \quad (5)$$

- Maximiser l'utilisation des ressources humaines

$$\max \left(\sum_{p=1}^N \sum_{l \in L_p} Z_{k,i,p,t} \times X_{p,l,t} \times dur_{p,l} \right) \quad (6)$$

- Maximiser les profits

$$\max \left(\left[\sum_{p=1}^N \sum_{l \in L_p} X_{p,l,t} \times P_{p,l} \right] - \left[\sum_{p=1}^N \sum_{l \in L_p} X_{p,l,t} \times dur_{p,l} \times \left(\sum_{j \in A_{p,l}} C_j + \sum_{k \in R_{p,l}} C_k \right) \right] \right) \quad (7)$$

5. Contraintes

Nous distinguons deux types de contraintes pour ce modèle : des contraintes fortes (contraintes d'antériorité, contraintes disjonctives, contraintes de disponibilités et contraintes des ressources) qui doivent être respectées et des contraintes faibles, qui traduisent la réglementation du travail du personnel hospitalier. En effet, le non-respect entraîne des heures supplémentaires ou l'attribution de récupérations supplémentaires, ce qui est non souhaitable, mais pas impossible.

1. Un acte médical l est programmé au plus une fois pour un patient à un instant t

$$\sum_{p=1}^N \sum_{l \in L_p} X_{p,l,t} \leq 1 \quad \forall p = \{1, \dots, N\} \quad \forall l \in L_i \quad \forall t \quad (8)$$

2. Un acteur j_i est affecté au plus une fois à un patient p à un instant t

$$\sum_{p=1}^N \sum_{l \in L_p} Y_{j_i,p,t} \times X_{p,l,t} \leq 1 \quad \forall p = \{1, \dots, N\} \quad \forall l \in L_i \quad \forall j \in A_{p,l} \quad \forall t \quad (9)$$

3. Un acte médical l doit être assuré en utilisant les mêmes ressources humaines j_i et matérielles k_i

$$Y_{j_i,p,t} \times X_{p,l,t} \times dur_{p,l} \leq \sum_{t'=t}^{t+dur_{p,l}} Av_{j_i,t'} \quad \forall p = \{1, \dots, N\} \quad \forall l \in L_i \quad \forall j \in A_{p,l} \quad \forall t \quad (10)$$

$$Z_{k_i,p,t} \times X_{p,l,t} \times dur_{p,l} \leq \sum_{t'=t}^{t+dur_{p,l}} Av_{k_i,t'} \quad \forall p = \{1, \dots, N\} \quad \forall l \in L_i \quad \forall k \in R_{p,l} \quad \forall t \quad (11)$$

4. Toutes les ressources humaines j_i et matérielles k_i requises pour un acte médical l sont affectées à chaque patient p

$$\sum_{j \in A_{p,l}} Y_{j_i,p,t} \times X_{p,l,t} = |A_{p,l}| \quad \forall p = \{1, \dots, N\} \quad \forall l \in L_i \quad \forall j \in A_{p,l} \quad \forall t \quad (12)$$

$$\sum_{k \in R_{p,l}} Z_{k_i,p,t} \times X_{p,l,t} = |R_{p,l}| \quad \forall p = \{1, \dots, N\} \quad \forall l \in L_i \quad \forall k \in R_{p,l} \quad \forall t \quad (13)$$

5. Contraintes temporelles de programmation d'un acte médical l .

$$\sum_{t'=ed_{p,l}}^{ld_{p,l}} X_{p,l,t'} = 1 \quad \forall p = \{1, \dots, N\} \quad \forall l \in L_i \quad (14)$$

6. Contraintes de réglementations de travail. En effet, le personnel hospitalier j_i ne doit pas dépasser un seuil d'heures de travail par semaine.

$$\sum_{t=0}^T Y_{j_i,p,t} \times X_{p,l,t} \times dur_{p,l} \leq W_j \times \alpha_{j_i} \quad \forall p = \{1, \dots, N\} \quad \forall l \in L_i \quad \forall j \in A_{p,l} \quad \forall t \quad (15)$$

Après avoir détaillé le programme non linéaire proposé, une étude de complexité s'avère nécessaire pour déterminer la classe de complexité du problème que nous traitons.

6. Classe de complexité

La fonction objective est linéaire et l'espace de recherche est défini par des contraintes non-linéaires. Par conséquent, le problème (P) est un problème d'optimisation non-linéaire.

Les problèmes d'optimisation non linéaires sont souvent NP-difficiles (Murty, 1987).

Rappelons quelques définitions de classes de complexité.

Définitions :

- **P** est l'ensemble de problèmes de décision algorithmiques dont la complexité est polynomiale.
- **NP** est l'ensemble de problèmes de décision algorithmiques tels que, si une solution possible est donnée, il est possible de vérifier cette solution en un temps polynomial.
- Un problème est dit **NP-difficile** s'il est au moins aussi difficile que tout problème de NP.
- Un problème est dit **NP-complet** s'il appartient à la classe NP et il est NP-difficile.

Théorème :

Le problème (P) est NP-difficile.

Preuve :

Supposons que le problème (P) est réduit à un problème (P') mono-objectif (maximiser les profits).

Le problème (P') est équivalent au problème « Resource Allocation with Time Intervals » (RATI).

En effet, les tâches dans le problème RATI ont les caractéristiques suivantes : chaque tâche consomme une quantité d'une ou plusieurs ressources limitées durant un intervalle de temps et réalise un profit (Darmann, 2010).

Par analogie, l'objectif du problème (P') est de maximiser les profits. Chaque acte médical (tâche) consomme des ressources humaines et matérielles durant la durée prévue de cet acte médical (intervalle de temps).

Étant donné($P' \subset P$), le problème (P) est équivalent au problème RATI.

Cependant, il a été prouvé que le problème RATI est NP-difficile (Darmann, 2010).

D'où le problème (P) est NP-difficile.

Nous avons implémenté notre programme non-linéaire en utilisant le logiciel FICO Optimization Suite 7¹. Le langage Mosel Xpress permet de transcrire facilement les contraintes du modèle.

Afin d'évaluer le modèle proposé, nous avons généré aléatoirement des instances pour valider le programme et vérifier sa convergence. Le Tableau 5 résume ces instances ainsi que le temps de calcul.

Tableau 5 : Temps de calcul pour différentes instances

Nombre de patients	Nombre d'acteurs	Nombre de ressources	Actes requis	Acteurs requis	Ressources requises	Temps de calcul (s)
3	20	15	5	7	8	15,608
5	21	27	11	14	8	15,702
7	33	15	32	12	13	149,663
9	30	33	34	14	15	269,179
11	38	53	56	14	23	378,035
13	50	64	55	29	20	1585,94
15	41	34	89	18	26	10065

Nous avons atteint la solution optimale pour les sept instances, ce qui prouve la convergence du programme.

En se référant à ces résultats, le temps de calcul augmente exponentiellement avec la taille des instances.

¹ FICO Xpress-Optimizer est un solveur commercial pour la programmation mathématique. Xpress comprend son langage de modélisation Xpress Mosel.

Cependant, notre objectif est de trouver un planning optimal de l'ensemble des actes médicaux à programmer dans un horizon de temps donné. Nous nous sommes basés alors sur les données réelles que le médecin DIM (Département de l'Information Médicale) de l'hôpital Robert Pax nous a communiquées pour construire les deux instances résumées dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Instances basées sur des données réelles de l'hôpital Robert Pax

Horizon	Nombre de patients	Nombre d'acteurs	Nombre de ressources	Nombre d'actes médicaux requis	Nombre de types d'acteurs requis	Nombre de types de ressources requises
Une journée	165	125	321	199	26	13
Une demi-journée	45	81	57	45	15	8

Vu la nature du problème, une résolution « assez rapide » est nécessaire. Nous estimons qu'une résolution au-delà de 20 min de calcul est considérée comme lente et ne sera pas acceptable. Au bout de 20 min de calculs, le programme ne converge pas pour les deux instances.

Il est à noter que des techniques de relaxation peuvent être utilisées pour construire une approximation du problème initial qui peut être alors résolu facilement. Ainsi, nous obtenons des solutions en des temps de calcul acceptables. Ces solutions peuvent être mathématiquement acceptables, mais irréalisables pratiquement. Cependant, notre objectif est de résoudre le problème dans sa globalité sans avoir à imposer des hypothèses particulières.

7. Conclusions

Nous avons présenté un modèle mathématique pour aborder le problème de planification et d'ordonnancement des parcours patients au sein d'un système hospitalier. Ce modèle est basé sur un programme non-linéaire présentant un objectif multicritère. L'originalité de notre modèle réside dans le fait qu'il prend en considération la globalité du parcours de soins d'un patient, dès son arrivée jusqu'à sa sortie. En outre, dans ce modèle, nous tenons en compte de toutes les ressources requises contrairement à d'autres modèles qui se focalisent sur une ou plusieurs ressources qu'ils considèrent comme critiques. Cette relaxation de contraintes de

ressource en supposant que certaines ressources sont illimitées ne reflète pas la réalité et par conséquent, la solution obtenue n'est souvent pas réalisable.

Nous avons prouvé que le problème que nous traitons est NP-Difficile.

L'approche de résolution exacte que nous avons présentée ci-dessus a donc des limites face au problème complexe de planification et d'ordonnancement des parcours patients. Le grand avantage des méthodes exactes est de garantir l'existence (ou non) d'une solution optimale. Cependant, une solution satisfaisante et rapide est suffisante pour notre problème.

Afin de mieux cerner l'aspect organisationnel et temporel de la structure en question, à savoir l'hôpital, nous avons élaboré des modèles UML que nous détaillons dans la partie qui suit.

IV. Modèles UML

1. Introduction

Dans l'ingénierie des systèmes, plusieurs techniques de modélisation sont utilisées. Parmi les plus connues, SADT (Structured Analysis and Design Technic), SA/RT (Structured Analysis with Real Time extensions) et les approches basées sur les réseaux de Pétri ou les machines à états finis.

Nous avons choisi le formalisme Unified Modeling Language (UML) pour la modélisation opérationnelle et organisationnelle du système. Ce choix s'est justifié pour plusieurs raisons :

- UML est générique et expressif. La représentation graphique est simple à comprendre et à manipuler.
- UML est un langage de modélisation orienté objet, ce qui facilite la mise en œuvre du modèle, quels que soient le langage de programmation et les bases de données.
- UML est flexible, configurable et extensible. Il offre alors la possibilité à d'éventuelles extensions.

La Figure 9 représente les différentes vues (ou perspectives) indépendantes et complémentaires qui permettent de définir un modèle (Kruchten, 1995).

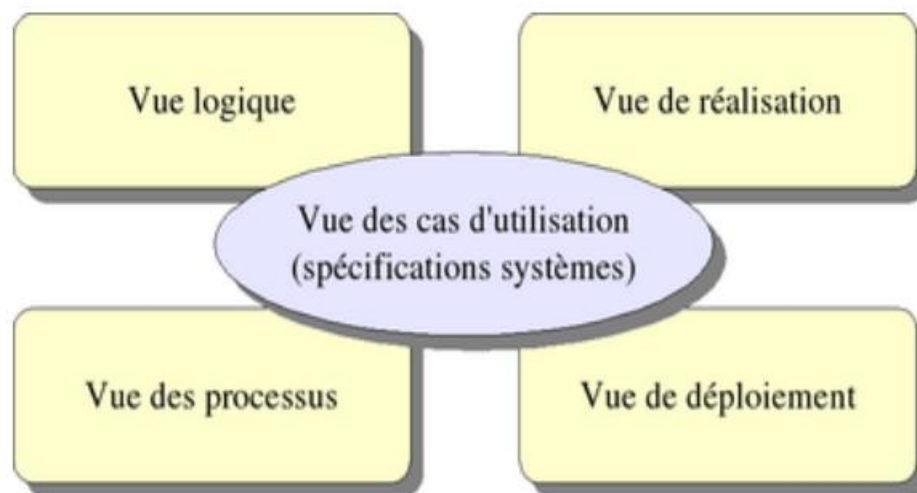


Figure 9 : Schéma 4+1 vues

Nous nous limiterons dans ce travail à la vue logique et la vue des processus.

Les différents diagrammes UML que nous avons élaborés puis fait valider par les cadres de santé sont présentés dans cette partie.

2. Vue logique

La vue logique est une vue de haut niveau. Elle se concentre sur l'abstraction et l'encapsulation et modélise les principaux éléments du système. Elle identifie les éléments du système ainsi que les relations qui lient ces derniers. Cette vue organise également les éléments du système en catégories afin de répartir les tâches ou les regrouper. Deux diagrammes peuvent être utilisés pour cette vue : le diagramme de classes et le diagramme des objets.

Les diagrammes de classes permettent de modéliser les entités du système et les relations entre celles-ci.

Selon le formalisme UML, une classe est une description abstraite d'un ensemble d'objets ayant des états et des comportements similaires. Une classe possède un nom, des attributs et des méthodes qui la caractérisent. Chaque instance de cette classe est appelée objet.

Définition 1 : Classe

Une classe est le triplet $C = (n, A, M)$ où

n est le nom de la classe ;

$A = \{a_1, \dots, a_n\}, n \in \mathbb{N}$, est l'ensemble des attributs caractérisant cette classe ;

$M = \{m_1, \dots, m_k\}, k \in \mathbb{N}$, est l'ensemble des méthodes de cette classe.

Nous représentons alors les patients, les ressources humaines et matérielles ou tout autre acteur ou objet de l'hôpital par des classes.

L'exemple présenté dans la Figure 10 décrit une classe Patient ayant plusieurs attributs : IPP (Identifiant Permanent du Patient), nom, dateDeNaissance, sexe, etc.

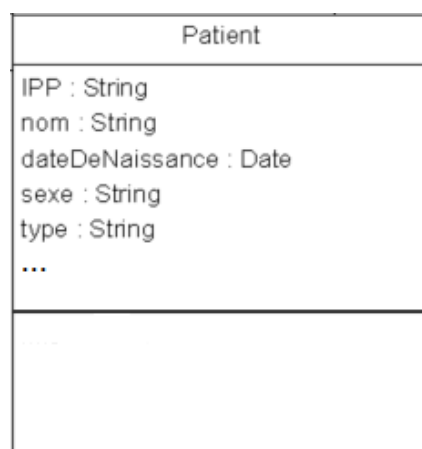


Figure 10 : Exemple d'une classe Patient

Nous détaillons ci-après les classes clés d'un système hospitalier. Or, pour avoir un modèle complet, il est indispensable de représenter les relations entre classes. UML propose une panoplie de *relations* entre classes pour représenter un type spécifique de lien. Parmi ces relations nous citons : l'association, l'association n-aire, la classe d'association, la qualification, l'agrégation, la composition et l'héritage. Chaque relation a une *cardinalité* qui précise le nombre d'instances qui participent à cette dernière.

Une relation de *généralisation* consiste à factoriser les propriétés d'un ensemble de classes sous forme d'une *classe mère*, plus abstraite, afin de gagner en généralité. Les sous-classes, appelées *classes filles*, héritent des propriétés de la classe mère et ont des attributs et/ou des relations supplémentaires pertinents.

Une *agrégation* est une association non symétrique qui exprime un couplage fort et une relation de subordination. Elle représente une relation de type « ensemble/élément ». Il est à noter qu'une instance d'élément agrégé peut exister sans agrégat et inversement.

Une *composition* est une agrégation forte, autrement dit agrégation par valeur. En effet, les cycles de vies des éléments et de l'agrégat sont liés ; si l'agrégat est détruit, ses composants le sont aussi.

Il est à signaler que l'agrégation et la composition sont des vues subjectives.

Classe Acteur

La Figure 11 illustre la relation de généralisation entre les classes Médecin, Brancardier, Infirmier et Aide-soignant et la classe Acteur. La classe Médecin est une généralisation des classes chirurgien et anesthésiste réanimateur, qui est la classe mère des classes chirurgien senior et chirurgien junior. La classe infirmière peut être déclinée en trois sous-classes : IDE (Infirmier Diplômé d'État), IADE (Infirmier Anesthésiste Diplômé d'État) et IBODE (Infirmier de Bloc Opératoire Diplômé d'État).

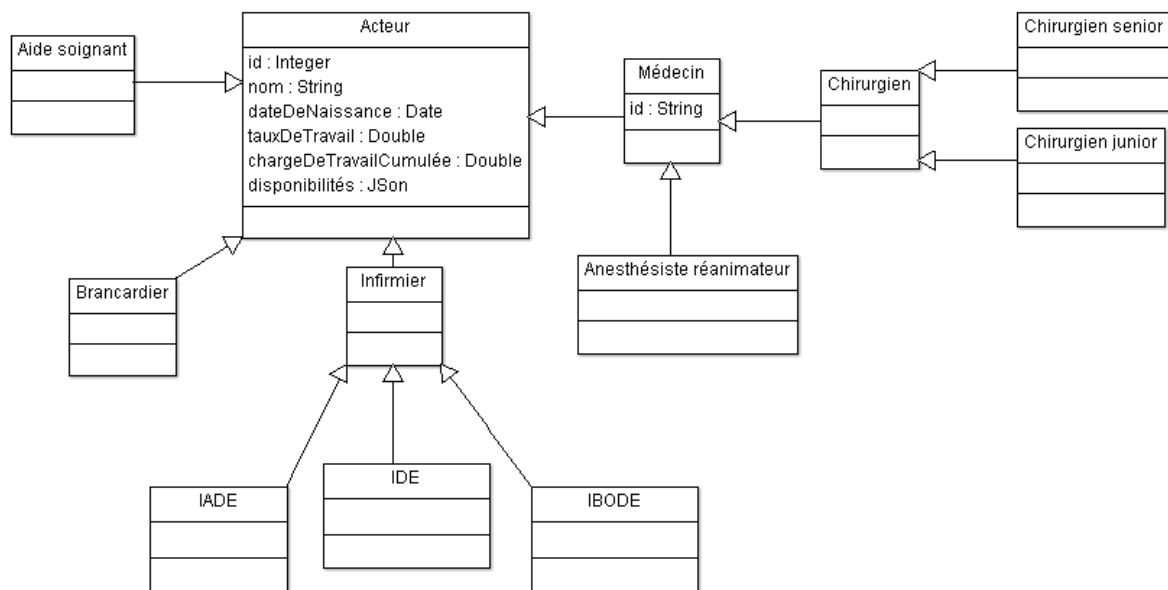


Figure 11 : Classe Acteur

Classe Ressource

La classe Ressource regroupe toutes les ressources matérielles de l'hôpital en lien avec le patient : salle de consultation (salle polyvalente ou salle spécialisée), bloc opératoire (composé de salles d'opération), salle de réveil (composée de lits de réveil), chambre, imagerie et biologie. Chacune de ces ressources est représentée par une classe qui hérite de la classe mère Ressource (Figure 12).

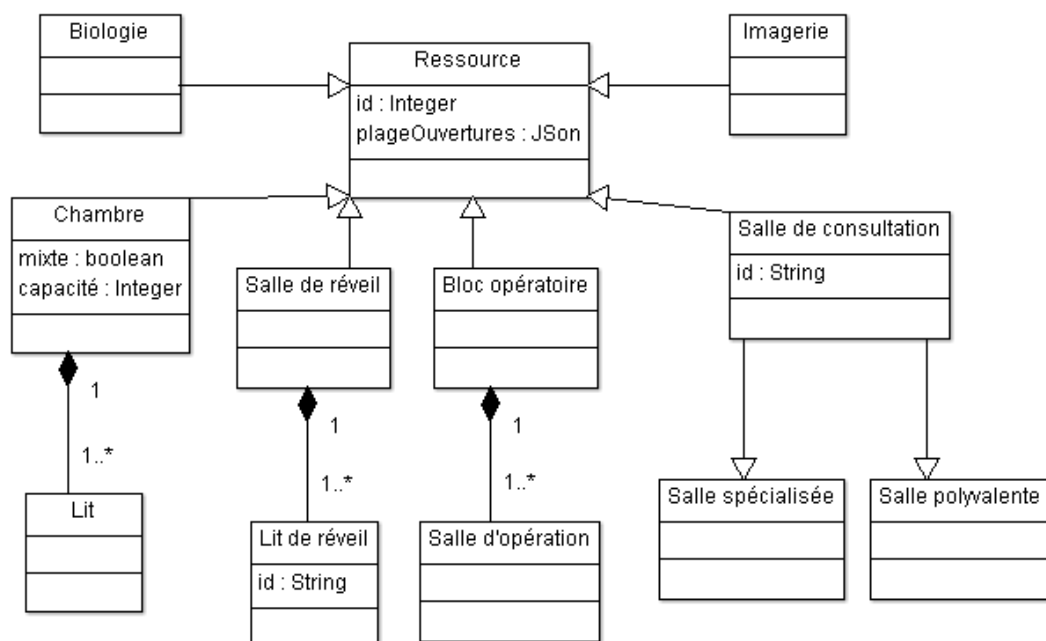


Figure 12 : Classe Ressource

Les diagrammes UML complets du système peuvent être consultés en annexe 1 (Figure 28, Figure 28, Figure 29, Figure 30).

3. Vue des processus

La vue des processus est primordiale dans un environnement multitâche. Assurément, elle illustre la décomposition du système en processus et actions, la synchronisation et la communication des activités simultanées ainsi que les interactions entre les processus. La vue des processus est basée sur différents diagrammes comme le diagramme de séquence, d'activité, et de collaboration.

Nous avons choisi d'illustrer la vue des processus en utilisant le diagramme d'activité. Ce dernier permet de modéliser le processus interactif global du système.

La Figure 31 (Annexe 1 : Modélisation UML) détaille les différents processus de la prise en charge du patient et les acteurs impliqués.

4. Conclusions

Dans le but de développer un outil d'aide à la décision flexible guidé par le flux de patients, nous avons proposé un ensemble de spécifications du langage de modélisation UML qui permet la modélisation du processus de soins des patients au sein de l'hôpital. Ces modèles ont été un support indispensable lors de nos réunions avec les cadres de la santé et nous ont permis de mieux cerner le problème pour proposer un outil d'aide à la décision, basé sur les agents que nous décrivons dans la partie suivante.

V. Synthèse

La gestion du flux patient dans un établissement de soins est très complexe en vue de la multitude des trajectoires possibles, de la décentralisation de la décision et de l'absence de synchronisation entre les différents services.

Nous avons utilisé plusieurs outils de modélisation afin de mieux analyser le problème et définir les solutions les mieux adaptées pour la gestion des parcours patients.

Nous avons établi des diagrammes UML pour la modélisation opérationnelle et organisationnelle du système après avoir défini une modélisation mathématique sous forme d'un programme non-linéaire. La résolution exacte s'avère très coûteuse et inappropriée pour le problème que nous traitons. En effet, la réactivité de la solution est un de nos objectifs majeurs.

Pour concevoir un système réactif, nous nous intéressons au paradigme agent qui semble être adapté pour la modélisation des systèmes complexes et fortement distribués comme le nôtre.

Nous discutons dans le chapitre suivant de nos choix d'architecture et de comportement des agents qui composent le système que nous proposons.

Chapitre III : **Système multi-agents proposé**

I. Introduction

Il semble vital de modéliser et de mettre en œuvre un système d'aide à la décision pour le pilotage réactif du parcours patient permettant d'ordonnancer les activités du processus de la prise en charge des patients, de gérer les parcours des patients dans leur globalité, de construire les plannings du personnel hospitalier (médical et paramédical) et des ressources hospitalières et de proposer des solutions face aux événements imprévus qui peuvent survenir à tout moment. Nos objectifs de pilotage sont, à la fois, l'optimisation systématique d'un système hospitalier et la gestion des perturbations en l'adaptant en conséquence. En revanche, la définition des règles de comportement reste un problème délicat. Or ce mode de pilotage est proche du paradigme des systèmes multi-agents. En effet, le comportement global du système émerge du comportement local des agents. Il nous a paru alors judicieux de modéliser un système de pilotage réactif à base d'agents.

Nous proposons alors un système à base d'agents réactifs, dynamiques, ouverts et distribués centré sur le patient que nous baptisons « PILPAP » (PILotage du Parcours Patient). L'objectif de ce système est d'optimiser le parcours patient en minimisant les délais d'attente, ainsi que la durée de séjour, et par conséquent les coûts des soins, tout en assurant un soin de qualité pour l'ensemble des patients et une meilleure gestion des ressources hospitalières.

La présente partie est structurée comme suit. Nous développons tout d'abord l'architecture du système proposé. Les différents agents qui composent le système sont ensuite développés et spécifiés théoriquement. Finalement, les protocoles d'interaction proposés pour le pilotage réactif du parcours patient sont présentés avant de conclure.

II. Architecture

1. Introduction

Le problème complexe que nous abordons est un problème :

- Combinatoire : le nombre de solutions possibles augmente exponentiellement avec la taille du problème.
- Dynamique : les données d'entrée du problème ont la caractéristique d'être dynamiques. En effet, il est difficile de prédire le parcours d'un patient qui dépend de sa pathologie et l'évolution de son état de santé.

- Distribué : les acteurs qui interviennent au long du parcours des patients sont répartis physiquement et/ou temporellement.

Le choix d'un système à base d'agents s'avère alors judicieux. En effet, les systèmes multi-agents offrent l'autonomie, la réactivité, la proactivité et l'adaptabilité requises pour résoudre ce problème complexe à caractère combinatoire, dynamique et distribué.

Le système que nous proposons est un système hétérarchique centré patient. Nous présentons dans le paragraphe suivant ce que ces concepts recouvrent.

2. Approche centrée patient

Comme nous l'avons déjà mentionné, notre collaborateur, CH de Sarreguemines – hôpital Robert Pax, se mobilise pour obtenir la certification V2014 après avoir obtenu la V2012 en octobre 2013. Dans cette perspective, il est amené à adopter les cinq orientations stratégiques introduites par la HAS pour la certification V2014 (Santé, Juillet 2013), qui se résument à : (1) Renforcer la capacité de la certification à maîtriser les risques. (2) Renforcer l'effet de la certification sur le management de l'établissement et des secteurs d'activité. (3) Rendre continue la démarche d'amélioration de la qualité des établissements. (4) Poursuivre le développement des approches centrées sur le patient. (5) Valoriser les établissements dans le cadre de la certification. Nous nous intéressons dans ce travail à la quatrième directive. Ces travaux de recherche sont alors des travaux support pour les gestionnaires de l'hôpital Robert Pax (et plus généralement de tout centre de santé) afin de développer des approches centrées sur le patient.

En vue de développer de telles approches, nous nous sommes inspirés des approches, centrées sur le produit, issues du domaine industriel.

Les approches de pilotage par le produit ont été proposées pour répondre aux exigences croissantes de gestion des produits dans un environnement de plus en plus incertain (Hafri & Najid, 2001) (Pannequin & Thomas, 2012). Ces approches ont permis d'améliorer le fonctionnement en améliorant plusieurs indicateurs de performance. Les systèmes de production de soins centrés sur le patient peuvent être assimilés aux systèmes de production de biens centrés produits (Pannequin & Thomas, 2008) (Wang, 2004) (Wong, 2002).

Cependant, il ne faut pas perdre de vue la présence du facteur humain, dans le cas des services de soins, qui est une spécificité principale de ces derniers. Cette spécificité est à l'origine de leur caractère complexe, aléatoire et imprévisible.

Le système est centré patient. En effet, « *l'Agent Patient* » gère son propre parcours selon les recommandations de son (ses) médecin(s) en toute évidence. Autrement dit, « *l'Agent Patient* » (entité informatique) ordonnance et planifie les services médicaux prescrits au patient associé (entité humaine) comme les consultations, les examens complémentaires, que ça soit en radiologie ou en biologie, ou bien les interventions chirurgicales. L'« *Agent Patient* » peut aussi planifier les services d'appuis comme la restauration et l'hôtellerie.

3. Architecture hétérarchique

Afin de garantir la simplicité et la flexibilité de notre système, nous avons opté pour une architecture modulaire et hétérarchique basée sur les agents en plaçant autour de l'agent central, qui est « *l'Agent Patient* », des agents auxiliaires qui représentent les ressources partagées de l'hôpital.

La Figure 13 illustre l'architecture du système de pilotage réactif, dynamique et distribué centré patient du flux patient que nous avons modélisé en nous basant sur le diagramme de flux (Figure 8).

Les Agents Patients sont représentés par des cercles. Les rectangles représentent les ressources partagées entre les « *Agents Patients* ». Il est à noter que certaines de ces ressources peuvent avoir plusieurs instances ou types. Les flèches en pointillés représentent le flux d'informations (coordination ou négociation) qui circule entre les « *Agents Patients* » et les « *Agents Ressources* » et les « *Agents Acteurs* ».

Il est à noter que nous n'avons pas traité le flux pharmaceutique. Nous estimons que ce dernier a été largement étudié dans la littérature (Shah, 2004) (Nagurney, 2013).

Comme le montre la Figure 13, le système proposé est un système hétérarchique. Nous distinguons deux niveaux : le niveau supérieur, composé des « *Agents Patients* » et le niveau inférieur, composé des « *Agents Ressources* » et des « *Agents Acteurs* » partagés.

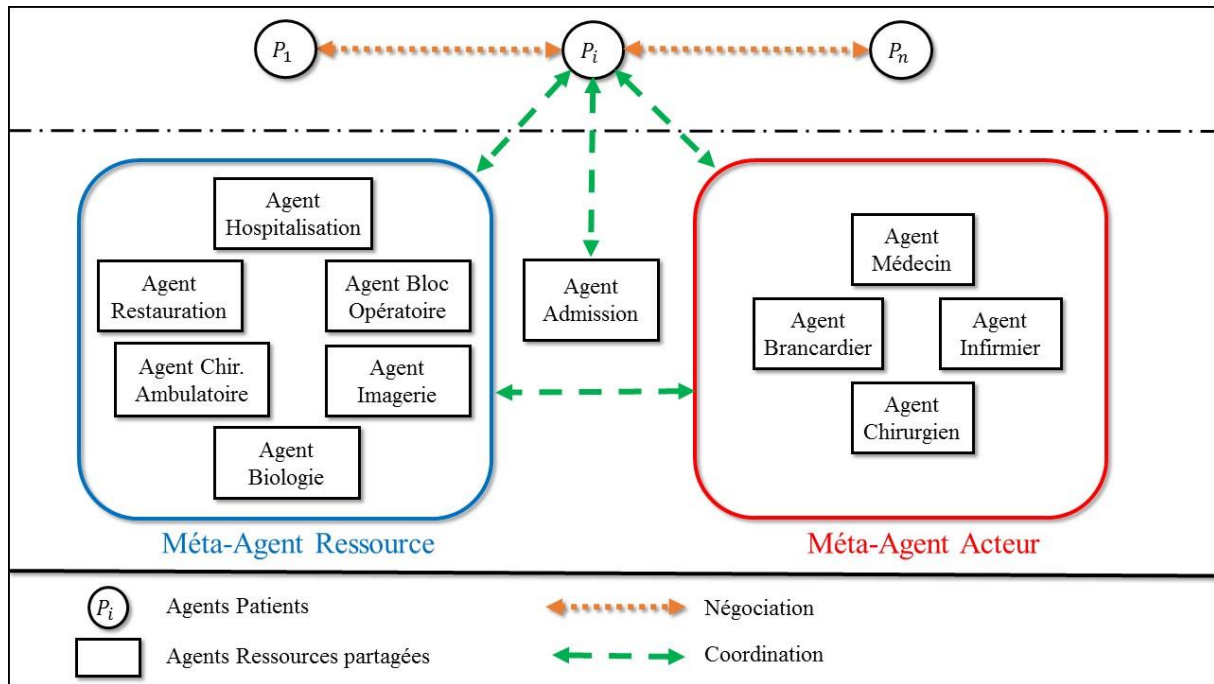


Figure 13 : Architecture du système multi-agents centré-patient du pilotage réactif du processus patient

Nous avons adopté une architecture hétérarchique pour plusieurs raisons. La première c'est que le niveau de contrôle peut changer selon l'activité à coordonner puisque certains conflits ou problèmes peuvent être résolus soit en interne, soit par négociation/coordination interservices, sans qu'il soit nécessaire que deux ou plusieurs « *Agents Patients* » négocient au niveau supérieur. La deuxième réside dans le fait que la communication peut être assurée par coordination, coopération ou négociation. Et finalement, de nouvelles entités peuvent être ajoutées ou supprimées sans que la structure change.

4. Conclusions

La gestion des parcours patients s'avère très complexe. C'est pourquoi nous avons modélisé le problème en nous basant sur le paradigme agent pour concevoir notre système complexe et fortement distribué ainsi que sur les approches, centrées sur le produit, issues du domaine industriel. Nous avons alors défini une architecture hétérarchique, modulable et centrée patient pour notre système. Il nous est alors apparu qu'en utilisant un système hétérarchique basé sur des agents distribués informatiquement, nous pourrions mettre en œuvre un système de pilotage réactif du parcours patient robuste, distribué, rapide et fiable.

III. Description des agents

1. Introduction

Nous nous sommes basés sur un système multi-agent, telle que défini auparavant, pour développer une architecture hétérarchique et centré patient mettant en œuvre des agents réactifs et hybrides. Nous distinguons dans ce système deux types d'agents principaux : un agent **hybride** comme l'« *Agent Patient* » et des agents **réactifs** comme les méta-agents « *Agents Services* » et « *Agent Acteurs* ».

Dans ce qui suit, nous décrivons les comportements des différents agents qui composent le système.

2. Agent central « Agent Patient »

Avant d'aller plus loin, nous mettons l'accent sur la différence entre l'« *Agent Patient* » et le patient. Le premier est une application informatique cognitive qui représente le patient dans le système, alors que le deuxième est la personne physique consommateur des services de soins. L'« *Agent Patient* » dont la modélisation informatique, qui est le miroir du patient physique, modélise ses croyances (au sens agent informatique du terme, il ne s'agit pas des préjugés de l'être humain : patient), ses comportements dans différentes situations et ses objectifs (lesquels ne sont pas définis par l'être humain patient, mais bien par le corps hospitalier). Il est à souligner aussi que le patient n'intervient pas dans la gestion et le contrôle de son propre parcours (c'est-à-dire l'être humain patient n'a ni accès ni contrôle sur l'« *Agent Patient* » contrairement à l'« *Agent Patient* », qui gère et contrôle le parcours du patient associé).

Ainsi, cet agent est en relation avec tous les autres agents logiciels du système afin d'assurer la prise en charge du patient.

La création de l'« *Agent Patient* » se fait par l'« *Agent Admission* » au moment de l'arrivée du patient.

Nous notons que l'« *Agent Patient* » est le seul agent hybride de notre système.

Le diagramme d'activité de cet agent est donné en Figure 14 où sont explicités les différents états que peut avoir l'agent (et les actions principales associées à chaque état) ainsi que les événements causant une transition d'un état à un autre.

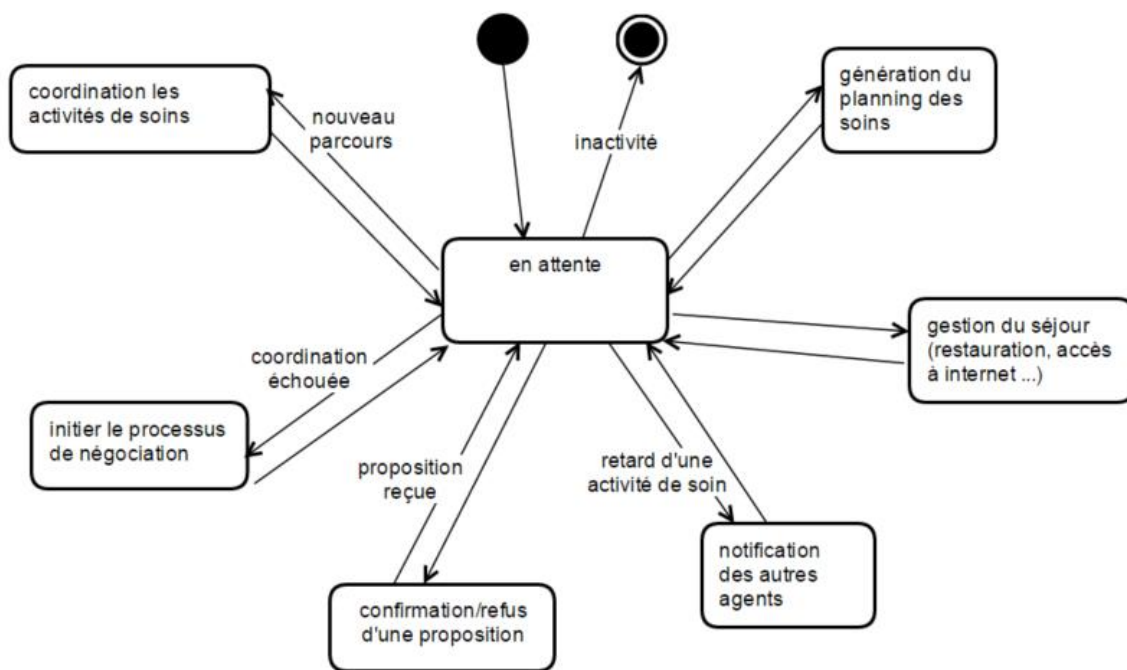


Figure 14 : Diagramme d'activité de l'« Agent Patient »

3. Agents auxiliaires « ressources partagées »

Nous distinguons trois méta-agents auxiliaires :

3.1.Méta-Agent Acteur

L'agent acteur est le méta-agent de l'ensemble des acteurs à l'hôpital, tel que : «*Agent Praticien*», «*Agent chirurgien*», «*Agent radiologue*», «*Agent anesthésiste*», «*Agent infirmier*» ou encore «*Agent Brancardage*».

L'«*Agent Acteur*» est créé lors de l'authentification d'un acteur via une interface homme-machine ou lorsqu'un autre agent du système l'invoque. À titre d'exemple, l'«*Agent Imagerie*» envoie les résultats des examens complémentaires d'un patient au praticien chargé de son suivi, si l'«*Agent Praticien*» correspondant n'est pas actif, le système le crée. Un deuxième exemple est quand le praticien élabore le plan de soins qu'il détaille dans son compte rendu. Ce dernier est envoyé à l'«*Agent Patient*» afin de planifier et d'ordonnancer ses activités de soins.

L'«*Agent Acteur*» a un comportement prédictif. Il notifie l'«*Agent Patient*» d'éventuelles perturbations en cours de l'activité de soin.

L'agent génère le planning de l'acteur correspondant et peut accéder aux dossiers médicaux des patients dont il assure le suivi.

Nous explicitons le comportement de l'« *Agent Acteur* » dans la Figure 15.

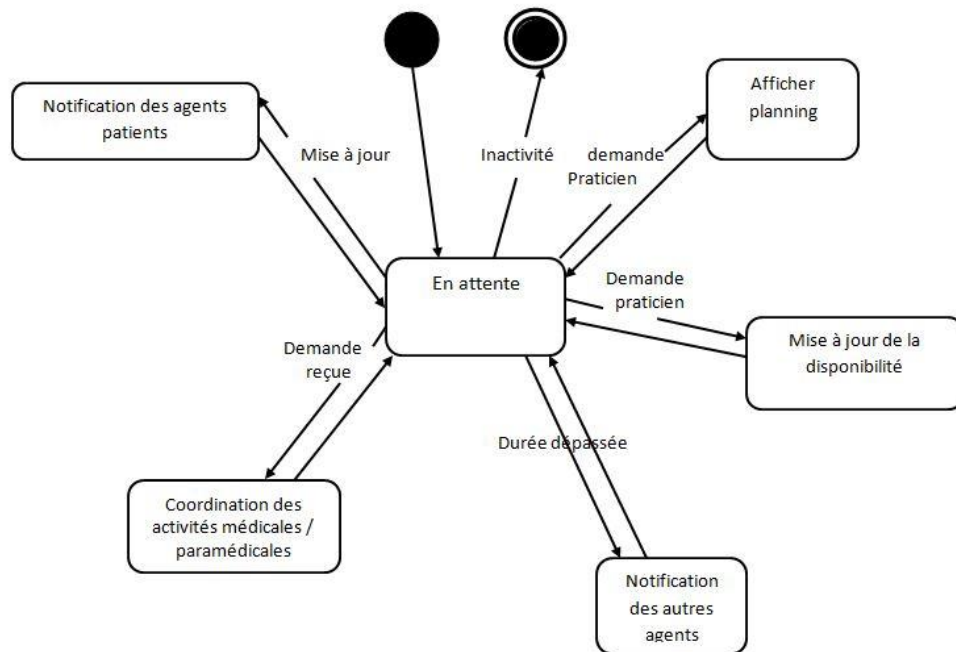


Figure 15 : Diagramme d'activité du méta-agent « Acteur »

3.2.Méta-Agent Service

Cet agent est le méta-agent de chaque service de l'hôpital (imagerie, laboratoire, hospitalisation, salle d'opération, chirurgie ambulatoire et restauration). Cet agent est responsable de planifier les unités concernées. Si nécessaire, il devrait également transférer les résultats aux autres « *Agents services* » ou à un « *Agent patient* ». Il s'agit d'un agent réactif (Figure 16).

Pour terminer, chaque agent du système « PILPAP » :

- Peut être exécuté sur une machine différente géographiquement distribuée et fonctionner au même temps.
- Peut accéder à plusieurs ressources disponibles dans la mémoire de l'agent. Ce qui veut dire que la connaissance est distribuée spatialement.
- Peut-être ajouté au système (ou supprimé) en fonction de l'évolution du système.

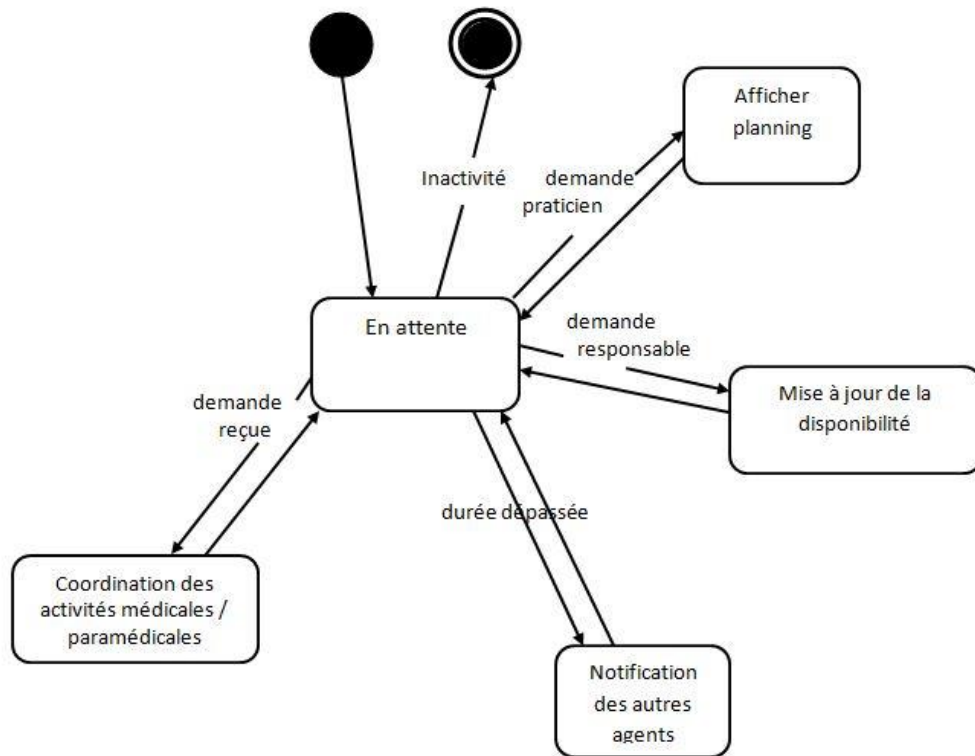


Figure 16 : Diagramme d'activité du méta-agent « Service »

4. Conclusions

Le système « PILPAP » est centré sur un agent central qui est l'« Agent Patient ». En effet, cet agent est au cœur de la gestion du parcours du patient qui lui est associé. Il évolue dans un environnement situé avec d'autres agents qui modélisent les ressources hospitalières que les patients partagent pour avoir accès aux soins. Étant donné que les ressources matérielles ainsi que les ressources humaines ont globalement le même comportement, nous les avons modélisés sous forme de méta-agents « Ressources » et « Acteurs ». Le premier méta-agent regroupe les différents agents qui représentent les services de consultation, le bloc opératoire, la chirurgie ambulatoire, le service d'imagerie, le service de biologie et la restauration. Quant au deuxième méta-agent « Acteur », il regroupe les agents qui représentent les médecins, les chirurgiens, les infirmiers, et les brancardiers.

Nous consacrons la suite de ce chapitre à la description détaillée des spécifications du système proposé. Pour cela, nous détaillons les protocoles d'interaction (communication, coordination et négociation) que nous avons développés pour la couche de pilotage réactif. Ensuite, nous détaillons quelques scénarios de perturbations afin d'illustrer le comportement du système.

IV. Pilotage réactif

1. Introduction

Dans une approche de pilotage prédictif, les données du problème sont connues en amont, ce qui n'est pas le cas pour l'ordonnancement des parcours des patients. En effet, le caractère incertain du milieu hospitalier rend difficile la prédiction de la durée des activités de soins ou bien la suite des activités à effectuer. De plus, l'ordonnancement initial peut être affecté par les aléas qui peuvent survenir avec l'arrivée des patients non électifs (c'est-à-dire non planifiés, tel que les urgences). Nous nous sommes particulièrement intéressés à la gestion des patients non électifs qui perturbent fortement la planification initiale et qui doivent être pris en charge dans les meilleurs délais et dans de bonnes conditions. Pour ce, nous avons développé une approche de pilotage réactif à base d'agents. Cette approche complète l'approche prévisionnelle dans le sens où elle permet d'assister la décision prévisionnelle lorsqu'une perturbation surgit. PILPAP gère tous les patients, mais les non électifs suivent un processus de décision à trois stratégies interdépendantes :

- *Stratégie 1* : Programmer le patient non électif le plus tôt possible selon les disponibilités du personnel et des ressources ;
- *Stratégie 2* : Lancer un processus de négociation (de niveau supérieur) entre les « Agents Patients » ;
- *Stratégie 3* : Absorber les heures supplémentaires induites par la prise en charge d'un ou plusieurs patient(s) non électif(s).

Avant de détailler notre processus de décision, nous allons définir la notion de perturbations dans un milieu hospitalier.

1. Les perturbations

L'une des fonctions principales de « PILPAP » est de faire face aux perturbations. Rossi (Rossi, 2003) distingue deux types de perturbations : les aléas et les incertitudes. Les aléas sont les événements discrets qui impliquent des modifications dans le modèle. Quant aux incertitudes, elles représentent les imprécisions concernant les mesures physiques, notamment, la différence entre l'estimation d'une grandeur et sa valeur réelle.

1.1. Les aléas

L'arrivée des patients non électifs ou la modification du parcours d'un patient suite à l'évolution de son état de santé sont les principaux événements imprévisibles qui perturbent la planification prévisionnelle.

En effet, à l'arrivée d'un patient dont l'état de santé nécessite une prise en charge immédiate, la planification initiale est souvent modifiée. Ce qui entraîne des retards des activités qui suivent et par conséquent des heures supplémentaires coûteuses, le mécontentement des patients et l'épuisement des équipes médicales.

1.2. Les incertitudes

Selon Rossi (Rossi, 2003), les incertitudes sont « *les imprécisions qui affectent les mesures physiques et les erreurs qui découlent de la différence entre l'estimation prévisionnelle d'une grandeur et sa valeur effective* ».

Les durées des activités de soins sont non déterministes. En effet, la durée varie en fonction de l'état du patient, des compétences du personnel médical et des éventuelles complications en cours de l'activité de soin. Plusieurs travaux de recherches ont été menés afin de déterminer les durées des actes médicaux dans ce contexte incertain. Dexter et Macario (Dexter & Macario, 1996) ont supposé que la durée suit une loi log normale. Dussauchoy et Combes (Dussauchoy *et al.*, 2003) ont montré que les durées peuvent être approchées par des lois de Pearson de type III. Ces études ont été appliquées à plusieurs établissements de soins. Malheureusement, elles n'ont pas abouti à une même loi de probabilité qui décrit les durées des actes médicaux vu que les pratiques diffèrent d'un hôpital à l'autre, voire d'un praticien à l'autre.

Dans « PILPAP », la réactivité face aux perturbations est assurée via un ensemble de processus d'interaction entre les agents qui composent le système. La performance du système de pilotage dépend de son aptitude à s'adapter en temps réel en prenant en compte les incertitudes et les aléas.

2. Protocoles d'interaction entre agents

Le système « PILPAP » a été conçu afin que les « Agents Patients » (qui représentent l'entité physique patient) et les agents « Ressources » partagées et « Acteurs » (qui représentent respectivement les entités physiques ressources hospitalières et acteurs que partagent les

patients) coopèrent et interagissent pour piloter les parcours patients en absorbant au mieux les perturbations qui peuvent surgir à tout instant, tout en optimisant les temps et les coûts d'utilisation des ressources hospitalières. Pour cela, il faut que les agents communiquent entre eux dans un langage commun compréhensible. À cet effet, nous avons défini, dans un premier temps, le protocole de communication utilisé dans « PILPAP ». Ce dernier est fondé sur les spécifications de FIPA-ACL (The Foundation for Intelligent Physical Agents-Agent Communication Language). Ensuite, nous avons développé un protocole de coordination qui permet aux « Agents Patients » de coordonner les activités de soins avec les autres agents en se basant sur la théorie du stimulus/réponse. Finalement, nous avons mis en place un protocole de négociation inspiré du FIPA Contract Net Protocol. Nous détaillons dans ce qui suit les trois protocoles.

2.1. Protocole et langage de communication

Dans un SMA, les agents échangent les informations soit par envoi de messages, soit via une mémoire partagée, aussi appelée tableaux noirs (Hayes-Roth, 1985).

Cependant, à l'exception de l'« Agent Patient », les autres agents qui composent « PILPAP » sont réactifs. Par conséquent, ils répondent uniquement à la théorie du stimulus/réponse. Pour cette raison, nous avons opté pour la communication par envoi de messages, chaque message constituant pour l'agent réactif qui le reçoit un stimulus auquel une réponse est directement associée.

3.1.1. Envoi de messages

L'échange des messages nécessite un langage de communication avec une *syntaxe*, une *sémantique* et une *pragmatique*. La *syntaxe* permet de représenter les informations et les requêtes dans un langage commun, alors que la *sémantique* structure le vocabulaire utilisé, nous parlons aussi d'ontologie partagée. Quant à la *pragmatique*, elle précise avec qui la communication est établie et comment initier et maintenir cet échange. Le typage sémantique des messages est inspiré de la théorie des actes de langage définie par Searle (Searle, 1969) et Austin (Austin, 1975). Cohen et Lavesque (Cohen & Lavesque, 1990) ont appliqué cette théorie à la communication entre agents autonomes. Ainsi, les premiers langages de communication entre agents (ACL : Agent Communication Language) ont été développés dans les années '90.

3.1.2. Langues de communication

Les langues de communication entre agents les plus répondus sont KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) développé par Finin et Labrou (Labrou & Finin, 1997) (Finin, *et al.*, 1994) et FIPA-ACL standardisés par la FIPA (FIPA, 2002). Le Tableau 7 détaille parallèlement les principaux actes de langages de FIPA-ACL et KQML ainsi que leur catégorie.

Nous constatons que FIPA ACL est plus parcimonieux et économe de performatifs que KQML. Ce dernier est plus spécifique et redondant et a une sémantique dédiée à des tâches spécifiques comme la gestion des bases de données qui ne relève pas de la simple communication. De plus, ces actes spécifiques peuvent être exprimés dans FIPA ACL par des actes génériques comme *Request* couplés à un contenu spécifique. Pour ces raisons, nous avons retenu FIPA ACL comme langage de communication pour « PILPAL ».

Tableau 7 : Classification des principaux actes de langage de KQML et FIPA ACL (Jouvin, 2003)

Actes de langage KQML	Actes de langages FIPA ACL	Catégorie	Description succincte
<i>Subscribe</i>	<i>Subscribe</i>	directive	Requête d'information avec mises à jour régulière (monitoring)
<i>Ready / Next / rest / discard /EOS</i>	<i>N/A</i>	(directive?)	Utilisé pour morceler une réponse en un flot de messages
<i>Insert /delete-one/all / update</i>	<i>N/A</i>	(directive?)	Manipulation de base de connaissance
<i>Broker-one/all</i>	<i>Proxy</i>	directive	Délégation d'une requête simple
<i>Recuit-one/all</i>	<i>N/A (Proxy)</i>	directive	Recherche d'un interlocuteur et redirection
<i>Recommand-one/all</i>	<i>N/A (Inform)</i>	assertion	Réponse à une recherche d'interlocuteur
<i>Forward / Broadcast</i>	<i>N/A</i>	directive	Redirection / diffusion
<i>N/A</i>	<i>Propagate</i>	directive	Requête et diffusion
<i>Not-understood</i>	<i>Not-understood</i>	déclaration ou assertion	Incapacité du locuteur à interpréter le message, ou non-respect du protocole par l'interlocuteur
<i>Failure</i>	<i>Failure</i>	assertion	Informe de l'échec du locuteur
<i>Tell / Untell / Deny</i>	<i>Inform / confirm / disconfirm</i>	assertion	Informe le destinataire d'un fait ou d'une croyance
<i>Request / Cancel</i>	<i>Request / Cancel</i>	directive	Requête / annulation d'une requête
<i>N/A</i>	<i>Request-when /</i>	directive	Associe la requête à une condition

	<i>Request-whensoever</i>		temporelle sur la réponse
<i>Agree / Refuse</i>	<i>Agree / Refuse</i>	engagement déclaration	Accepte d'accéder à une requête / refuse la requête
<i>CFP</i>	<i>CFP</i>	directive	Appel à proposition pour une tâche
<i>Propose</i>	<i>Propose</i>	engagement directive	Proposition avec éventuellement des conditions supplémentaires
<i>Accept-proposal/ Reject-proposal</i>	<i>Accept-proposal/ Reject-proposal</i>	engagement	Accepte / rejette une proposition et ses conditions
<i>Ask / Ask-if</i>	<i>Query-if / query-ref</i>	directive	Requête d'information

Tableau 8 : Performatives ACL-FIPA

performative	Description
<i>sender</i>	L'émetteur du message
<i>receiver</i>	Le destinataire du message
<i>reply-to</i>	Participant à l'acte de communication
<i>content</i>	Le contenu du message (l'information transportée par la performative)
<i>language</i>	Le langage dans lequel le contenu est représenté
<i>encoding</i>	Le nom de l'ontologie utilisé pour donner un sens aux termes utilisés dans le <i>content</i>
<i>protocol</i>	Contrôle de la conversation
<i>conversation-id</i>	Identificateur de la conversation
<i>reply-with</i>	Identificateur unique du message, en vue d'une référence ultérieure
<i>in-reply-to</i>	Référence à un message auquel l'agent est entrain de répondre (précisé par l'attribut <i>reply-with</i> de l'émetteur)
<i>reply-by</i>	Impose un délai pour la réponse

FIPA ACL n'est basé que sur un ensemble de vingt et un actes de communication primitifs. Ces actes sont exprimés par des **performatives** (Tableau 8) qui sont regroupées dans cinq groupes (Tableau 9).

Tableau 9 : Groupes d'actes de communication primitifs (FIPA ACL)

passage d'information	<i>inform*</i> , <i>inform-if (macro act)</i> , <i>inform-ref (macro act)</i> , <i>confirm*</i> , <i>disconfirm*</i>
réquisition d'information	<i>query-if</i> , <i>query-ref</i> , <i>subscribe</i>
négociation	<i>accept-proposal</i> , <i>cfp</i> , <i>propose</i> , <i>reject-proposal</i>
distribution de tâches	<i>request*</i> , <i>request-when</i> , <i>request-whenever</i> , <i>agree</i> , <i>cancel</i> , <i>refuse</i>
manipulation des erreurs	<i>failure</i> , <i>not-understood</i>

Ce langage de communication constitue la brique de base des protocoles de coordination et de négociation que nous avons proposés et que nous allons présenter dans ce qui suit.

2.2. Protocole de coordination

L'approche que nous avons proposée pour piloter les parcours patients d'une façon réactive consiste tout d'abord en une coordination entre les agents de « PILPAP » pour planifier et coordonner les nouvelles activités et/ou durées de soins qui perturbent le planning prévisionnel déjà établi.

Dans « PILPAP », la coordination est assurée par un échange de messages entre les agents (stimulus/réponse), vu leur nature réactive.

Le processus de coordination pour planifier et ordonnancer un parcours patient est comme suit (Figure 17) :

1. L'« Agent Patient », dont le parcours de son patient associé a été modifié, envoie un message aux agents qui représentent les ressources et les acteurs partagés requis pour l'activité de soin selon les recommandations médicales et les dates butoirs (date au plus tôt et date au plus tard). La performative de ce message est de type *request*.
2. Quand un agent de type ressource ou acteur partagé reçoit une demande de disponibilités, il répond par un message contenant une liste triée des acteurs/ressources disponibles selon la charge de travail effectuée.
3. L'agent patient reçoit ces réponses sous forme de messages de performative *inform*. Ce dernier fait correspondre les disponibilités et sélectionne le créneau qui réduit le temps du parcours patient.
4. Finalement, l'agent patient envoie des messages aux agents ressources et acteurs afin de mettre à jour leur planification.

5. Si aucun créneau n'est disponible pour planifier l'activité de soin, le processus de négociation est lancé (Figure 18).
6. Ce processus est répété tant qu'il y a des activités de soins liées à un parcours patient à planifier.

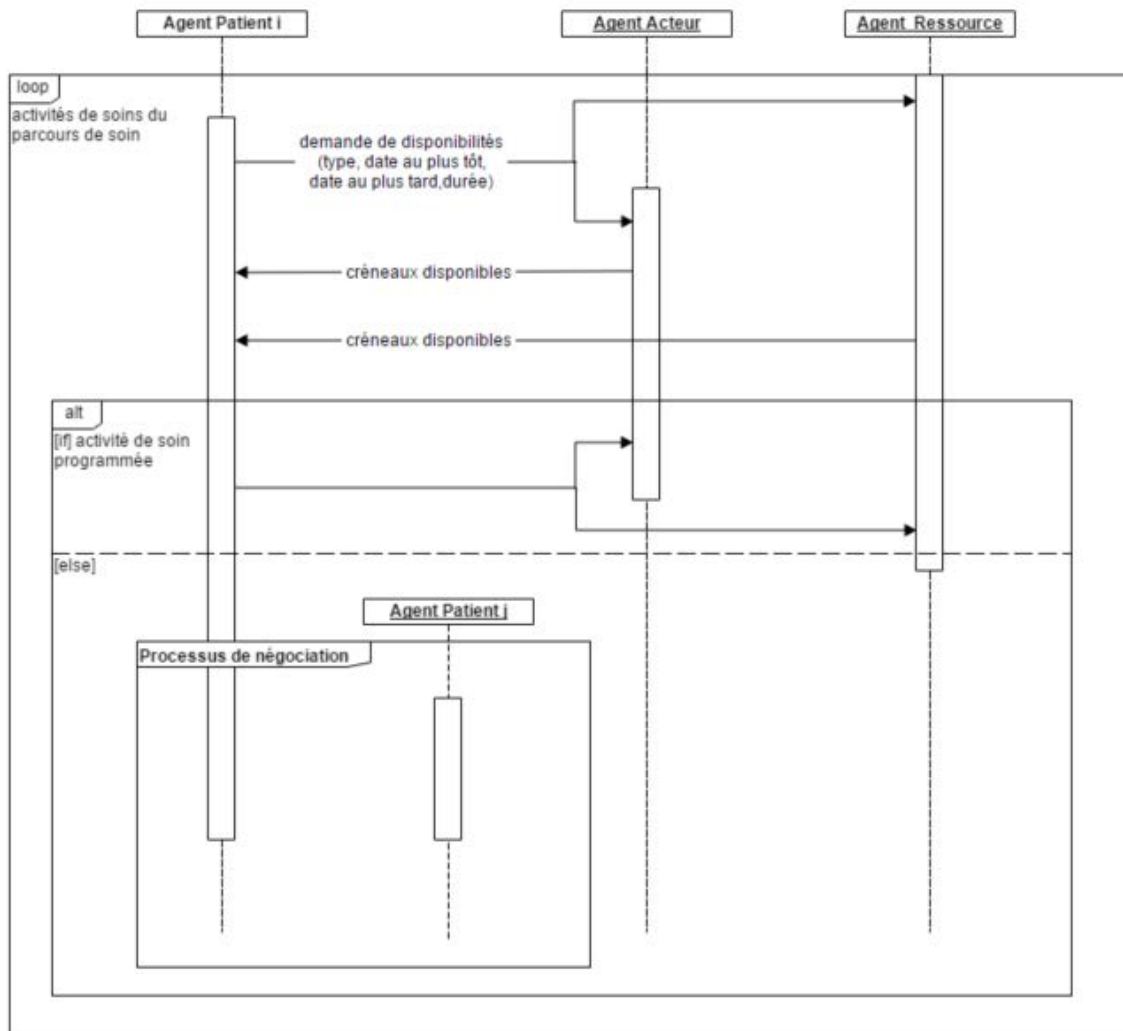


Figure 17 : Protocole de coordination proposé

Il est évident que ce protocole de coordination à lui tout seul ne peut pas résoudre le problème de gestion du parcours patient étant donné que les ressources sont limitées et que la demande est très importante. Pour remédier à cette limite, nous faisons appel à la deuxième stratégie de décision qui permettra de réordonner les activités médicales et/ou paramédicales via un protocole de négociation que nous détaillons dans ce qui suit.

2.3. Protocole de négociation

Afin d'absorber toute perturbation que ça soit aléas ou incertitude, sans perturber la planification initiale, nous avons proposé un processus de négociation. Ce dernier est basé sur

FIPA Contract Net Protocol ou *réseau contractuel* (Figure 19). Le protocole s'appuie sur une métaphore organisationnelle où les agents coordonnent leurs tâches ou activités via des contrats dans le but d'atteindre un consensus global. La Figure 18 illustre ce protocole sous forme d'un diagramme de séquence UML.

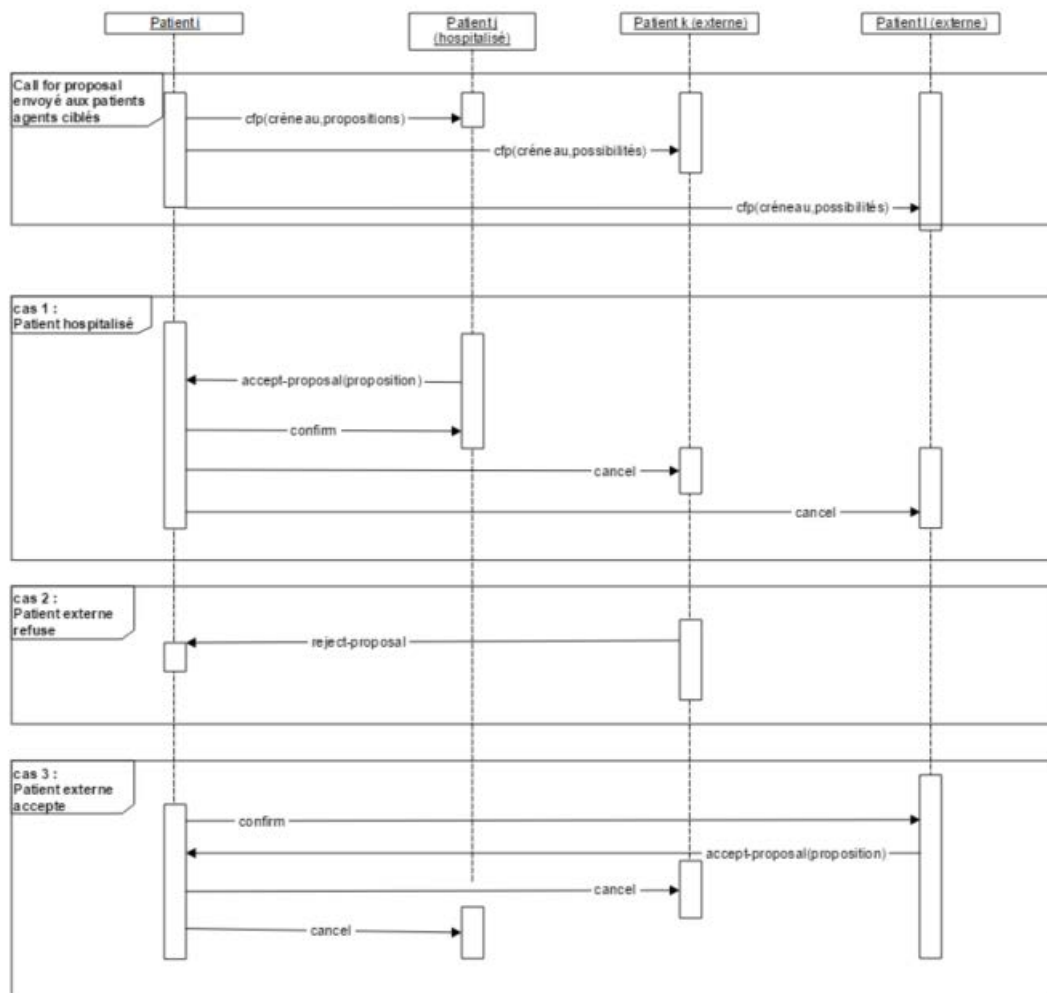


Figure 18 : Protocole de négociation proposé

Avant la mise en œuvre d'un protocole réseau contractuel, il faut définir les deux rôles clés des agents : **gestionnaire** et **contractant**.

Dans « PILPAP », le gestionnaire est l'« Agent Patient » associé au patient qu'il faut prendre en charge le plus rapidement possible. Cet agent annonce un besoin de soin urgent dans un service donné sur un réseau d'agents contractants inscrits dans une page jaune. Le système inscrit les « Agents Patients » associés aux patients externes qui ont consenti pour reprogrammer leurs soins à une date ultérieure selon leurs disponibilités et selon les heures d'ouverture du service en question. Les « Agents Patients » associés aux patients hospitalisés sont par défauts inscrits dans la page jaune.

Dès la réception d'une annonce (ou une proposition), les agents contractants évaluent la proposition en se basant sur un module décisionnel propre à chaque « Agent Patient ».

Dans notre application, nous avons développé ce module en prenant en considération le fonctionnement d'un hôpital ainsi que la réaction que peuvent avoir les patients vis-à-vis de ce type de système. Notre réflexion se synthétise ainsi :

- Si l'agent contractant est associé à un patient hospitalisé, la proposition est acceptée automatiquement à condition que l'état du patient ainsi que sa durée de séjour le permettent. En effet, un patient hospitalisé sera beaucoup moins affecté par un changement d'horaire qu'un externe vu que la planification des soins reste transparente de son point de vue. Néanmoins, une notification pour les services concernés par ce changement est nécessaire.
- Si l'agent contractant est associé à un patient externe, un message sous forme de courriel ou de SMS est envoyé au patient en lui proposant de nouvelles plages horaires en adéquation avec les disponibilités qu'il a exprimées au moment de la confirmation du premier rendez-vous. Le patient, bien évidemment, peut accepter ou refuser cette proposition.

Pour des raisons de viabilité, nous avons défini un délai d'attente de la réponse. Au-delà de cette durée, la proposition est considérée comme refusée.

Dès que le gestionnaire reçoit une proposition acceptée, la négociation est clôturée. Les agents contractants reçoivent une notification précisant que la demande du changement d'horaire n'est plus d'actualité et la planification est mise à jour.

Ce processus de négociation est lancé dans plusieurs cas de figure selon l'état du système à l'instant t . Supposons qu'un patient doive être opéré en urgence, mais toutes les salles d'opération sont occupées. À l'heure actuelle, toutes les opérations d'une salle en particulier vont être reportées et le patient dans un état critique va être pris en charge dès la fin de l'opération en cours ce qui entraînera des retards pour les soins initialement planifiés qui suivent et par conséquent des heures supplémentaires.

Les cas les plus courants sont l'arrivée d'un patient électif ou le dépassement de la durée prévisionnel d'une activité de soin. Dans ce qui suit, nous illustrons ces exemples de perturbations.

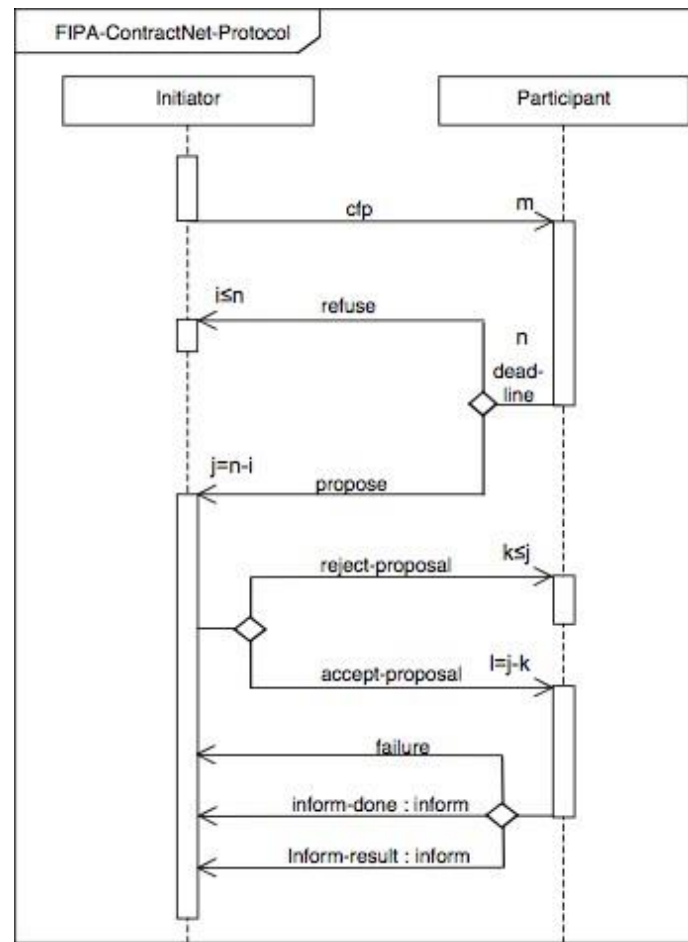


Figure 19 : FIPA Contract Net Protocol (Fipa, 2002)

3. Exemples d'Illustration

Afin d'illustrer le fonctionnement du système « PILPAP », nous présentons des scénarios de perturbations représentatifs des principaux types d'aléas possibles (patient non urgent, mais ressources limitantes et patients urgents). À noter que nous ne détaillons pas la prise en compte des incertitudes ici, car en réalité, c'est sous la forme d'aléas que « PILPAP » les gérera. En effet, le glissement progressif, par exemple, des horaires prévisionnels de consultation suite à des dépassements de délais, provoque la génération d'heures supplémentaires. Dans cette situation, les patients qui se retrouveraient en dehors des heures d'ouvertures devront faire l'objet d'une reprogrammation qui serait alors traitée comme la planification d'un nouveau patient sur les jours suivants. La seule contrainte à respecter est la mise à jour des plannings en temps réel au cours de la journée, ce qui se fait de manière transparente, simplement par actualisation des plannings des agents ressources et acteurs en fonction des informations transmises par chaque agent patient lorsqu'il valide les débuts et fin réels de consultation. Ainsi, dès qu'un agent patient se rend compte que son horaire programmé n'est plus compatible avec les contraintes du système (heures supplémentaires), il

déclenche une demande de re-planification et en averti son patient associé afin que celui-ci n'ai pas à se déplacer pour rien. Dans le même ordre d'idée, « PILPAP », suivant le même processus, est en mesure, même s'il n'y a pas de re-planification nécessaire, d'avertir son patient associé que son rendez-vous est décalé et lui permettre ainsi, en particulier pour les extérieurs, d'adapter son emploi du temps de la journée et de ne pas « perdre » de longues heures en salle d'attente inutilement.

Cette illustration nous permettra d'expliquer comment les agents du système agissent face à une perturbation de la planification initiale. Pour ce, nous illustrons les interactions entre les différents agents et comment ils génèrent le résultat souhaité, qui est la programmation et l'ordonnancement de ces nouvelles activités de soins dans le programme prévisionnel.

L'objectif de l'élaboration de scénarios de test est d'analyser le caractère réactif du système que nous avons développé, ainsi que sa réaction face aux perturbations.

3.1.Scénario 1

Le premier scénario met en évidence le comportement du système face à l'arrivée d'un patient non électif.

Hypothèse : Nous supposons que le patient a été redirigé à l'hôpital suite à une consultation cardiologique pour un examen d'effort avec un degré d'urgence de niveau 3 (prise en charge dès que possible).

Pour assurer cet examen, il faut prévoir :

- Ressources humaines : un cardiologue et une infirmière diplômée d'état.
- Ressources matérielles : une salle d'épreuve d'effort.
- Durée moyenne : 30 minutes.

Le chronogramme de la Figure 20 représente la réaction du système « PILPAP » pour planifier cet examen.

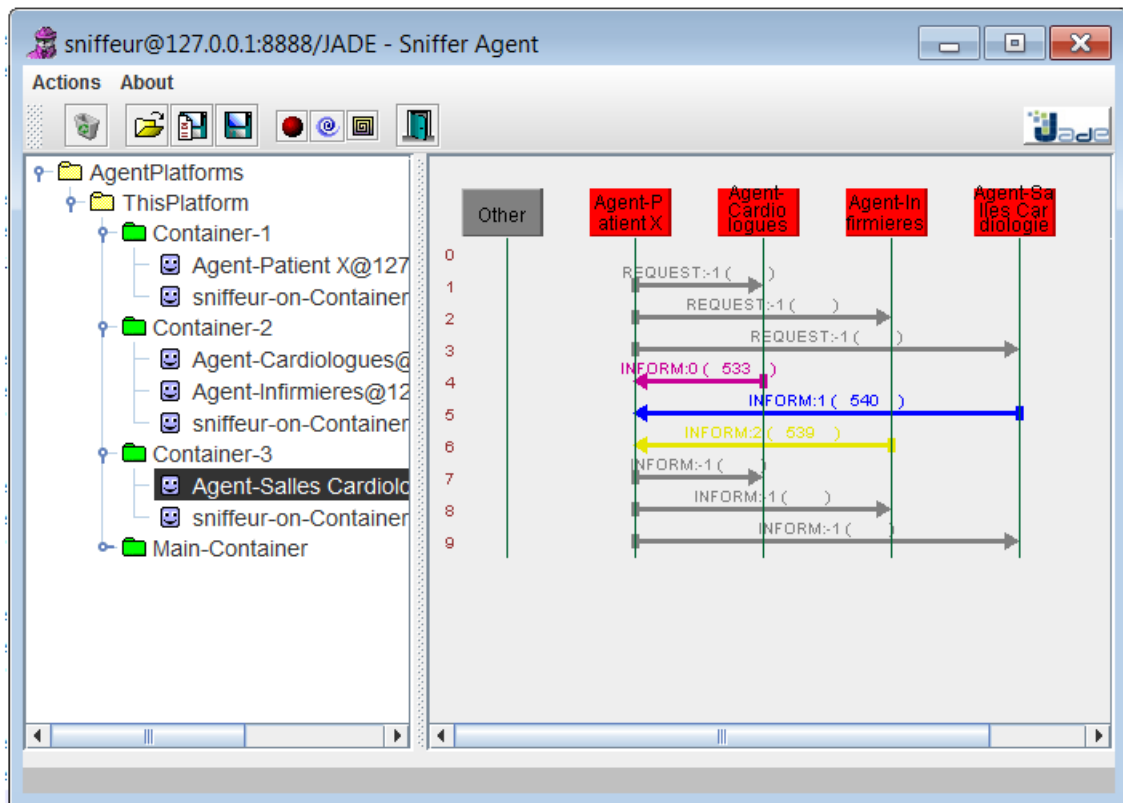


Figure 20 : Chronogramme des messages échangés entre les agents pour gérer un parcours de patient non électif – protocole de coordination -

Il est à noter que l'Agent Admission, chargé de la gestion de l'Agent Patient, n'est pas représenté dans ce chronogramme vu que son rôle se limite à la création ou l'activation de l'Agent Patient.

Pour planifier l'examen d'épreuve d'effort, quatre agents du système interagissent, à savoir l'« Agent Patient », l'« Agent Cardiologues », l'« Agent Infirmiers » et l'« Agent Salles Cardiologie ».

1. Messages 1-2-3 : L'Agent Patient a envoyé un message FIPA-ACL de performative REQUEST à l'Agent Cardiologues, l'Agent Infirmière et l'Agent Salles pour demander leurs disponibilités.
2. Messages 4-5-6 : Les agents ressources ont répondu à la requête par un message FIPA-ACL de performative INFORM avec les disponibilités de chacun.
- 2.1. L'Agent Patient reste en attente des trois réponses afin de les croiser et trouver l'ensemble des créneaux en commun et choisir celui qui maximise notre fonction objective. En effet, l'Agent Patient est un agent cognitif qui a la capacité de choisir le créneau qui optimise l'utilisation des ressources humaines et matérielles et minimise les heures supplémentaires.

3. Message 7-8- 9 : Une fois le créneau déterminé, l'Agent Patient envoie des messages FIPA-ACL pour informer les agents ressources de la mise à jour.

Nota :

Dans cet exemple, les créneaux en commun disponibles sont le vendredi 04/01/2015 de 16h30 à 17h30 et le mercredi 09/01/2015 de 15h à 16h30.

Dans une logique premier arrivé premier servi, cet examen peut être planifié le vendredi 04/01/2015 à 16h30. Cependant, cette politique n'est pas forcément la plus optimale dans la mesure où le cardiologue affecté à cet examen aura un quart d'heure d'inactivité alors que notre objectif est de maximiser l'activité des praticiens.

Notre algorithme préconise de planifier l'examen le vendredi 04/01/2015 de 17h à 17h30.

3.2.Scénario 2

Le deuxième scénario illustre comment « PILPAP » gère la prise en charge immédiate d'un patient.

Hypothèse : Nous supposons que l'état de santé d'un patient hospitalisé en urologie s'est dégradé et son médecin a demandé un bilan urodynamique en urgence.

Pour assurer cet examen, il faut mobiliser :

- Ressources humaines : un brancardier, une infirmière et un urologue.
- Ressources matérielles : une salle bilan urodynamique.
- Durée moyenne : 40 minutes.

En lançant la simulation, nous obtenons les interactions illustrées dans la Figure 21.

Les premiers messages échangés (de 1 à 8) suivent le protocole de coordination.

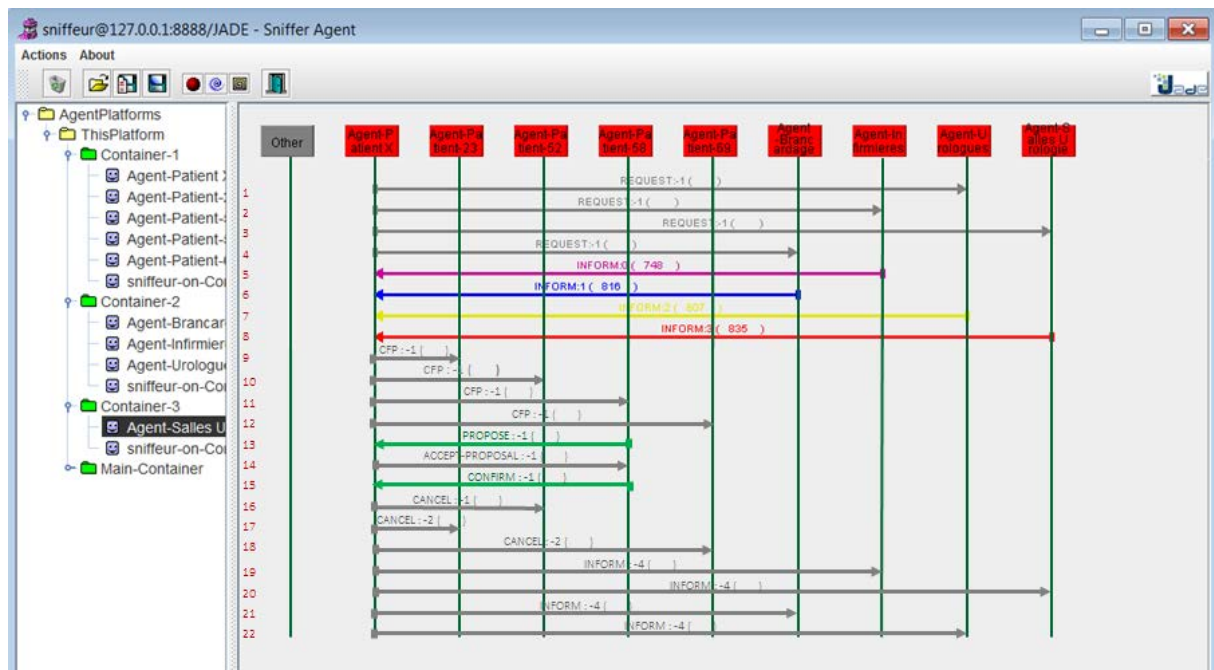


Figure 21 : Chronogramme des messages échangés entre les agents pour gérer le parcours d'un patient électif – protocole de négociation -

L'« Agent Patient » reçoit les disponibilités des ressources humaines et matérielles requises et compile les informations reçues afin de déterminer le meilleur créneau. Toutefois, l'« Agent Salle Urologie » informe l'« Agent Patient » qu'aucune salle n'est disponible. Il est donc impossible de planifier le bilan urodynamique pour le patient en question. L'« Agent Patient » correspondant lance alors le processus de négociation (messages de 9 à 12) en envoyant un message FIPA-ACL de performative CFP (Call For Proposals) à tous les « Agents Patients » hospitalisés inscrits à la page jaune du service urologie programmés dans une salle de bilan urodynamique.

Ces derniers, puisqu'internes, acceptent automatiquement la requête si l'état de santé du patient et la durée de séjour du patient le permet et envoie un message FIPA-ACL de performative PROPOSE à l'« Agent Patient » qui a initié la négociation (message 13).

L'agent initiateur évalue l'offre et l'accepte via un message de performative ACCEPT-PROPOSAL (message 14). Ensuite, l'« Agent Patient » initiateur envoie un message aux autres participants pour annuler la requête (messages de 16 à 18).

Finalement, l'« Agent Patient » informe les agents ressources des modifications de la planification (message de 19 à 22).

4. Conclusions

Nos travaux se sont focalisés sur le pilotage réactif d'un système hospitalier à caractère dynamique et incertain dans l'optique d'assurer une meilleure prise en charge des patients en respectant la triple contrainte : coût, délai, qualité. Nos efforts se sont portés sur la réactivité face aux perturbations auxquelles tout système hospitalier doit faire face à savoir les aléas et les incertitudes.

Pour ce, nous avons proposé trois protocoles d'interaction qui permettent à « PILPAP » de réagir face aux perturbations :

- Un ***protocole de communication*** basé sur spécifications de FIPA-ACL,
- Un ***protocole de coordination*** basé sur la théorie du stimulus-réponse,
- Un ***protocole de négociation*** basé sur FIPA Contract Net Protocol.

Le premier protocole constitue la brique de base des deux autres et normalise la communication et l'échange des messages entre les agents du système.

Le deuxième permet de planifier et ordonnancer les parcours des patients et de gérer les plannings du personnel hospitalier. Étant donné que les ressources sont limitées, un simple protocole de coordination ne suffit pas pour assurer la prise en charge de tous les patients et surtout les cas urgents. Il a fallu alors mettre au point un protocole de négociation afin d'avoir plus de flexibilité de réajustement de la planification.

Nous avons ainsi défini les règles Tableau 10 du pilotage réactif que nous avons adopté en nous basant sur des interactions entre des agents situés dans un environnement ouvert et dynamique. Ces derniers, avec leur capacité à communiquer, se coordonnent afin d'absorber les perturbations.

Cependant, la définition des règles de pilotage est la difficulté majeure de tout pilotage réactif.

Tableau 10 : Règles de pilotage propre à « PILPAP »

Patient électif	- Coordination entre l'« Agent Patient » et les « Agents Ressources ». - Négociation entre « Agents Patients »	- Les patients hospitalisés acceptent les propositions de changement de rendez-vous automatiquement selon l'état du patient associé et sa durée de séjour. - Les patients externes ont la possibilité de répondre à la demande de changement dans une durée déterminée.
Patient non électif	Coordination entre l'« Agent Patient » et les « Agents Ressources ».	- Le taux d'occupation des ressources et maximisé

Dans le cadre de nos travaux, l'ensemble de ces règles agissent localement pour faire émerger un comportement global qui répond aux objectifs fixés vu que nous nous sommes basés sur la notion « agents ».

La cinquième partie de ce chapitre est dédiée à la discussion et l'analyse des simulations que nous avons menées afin de valider notre approche.

V. Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons discuté le système à base d'agents de PILOtage du PArcours Patient « PILPAP » que nous avons proposé pour le pilotage réactif du parcours patient au sein d'un système hospitalier.

Nous avons fait le choix d'une architecture hétérarchique pour avoir plus de flexibilité en termes d'interactions entre l'agent central du système, qui est l'« Agent Patient », et les « Agent Auxiliaires ».

« PILPAP » est également centré patient pour répondre aux exigences de la HAS et mettre le patient au cœur de son parcours de soins.

L'originalité de notre système réside, tout d'abord, dans le fait de s'intéresser à l'optimisation du processus de prise en charge du patient dans sa globalité, depuis son arrivée jusqu'à sa

sortie, en prenant en compte non seulement les activités de soins, mais aussi les activités auxiliaires comme le brancardage, l'hôtellerie et la restauration.

La deuxième spécificité de notre système est sa réactivité face aux perturbations qui constituent un défi quotidien pour les gestionnaires des établissements de soins et qui génèrent des tensions entre le personnel hospitalier, le mécontentement des patients de plus en plus exigeants et évidemment des coûts supplémentaires assez conséquents. À titre d'exemple, une heure d'ouverture d'un bloc opératoire pour une heure supplémentaire s'élève à 700€.

Cet aspect réactif est assuré par les protocoles d'interactions entre agents que nous avons développés à savoir un protocole de communication basé sur les spécifications FIPA-ACL, un protocole de coordination basé sur la théorie des stimulus-réponse et finalement un protocole de négociation inspiré du protocole Contract-Net.

Ces protocoles permettent au système « PILPAP » de réagir face aux perturbations auxquelles les établissements de soins doivent faire face au quotidien en temps réel et avec le minimum de changements possibles de la planification initiale.

Cependant, les règles de pilotage que nous avons défini doivent être validées via un processus expérimental. C'est ce qui fait l'objet du quatrième chapitre.

Chapitre IV : **Expérimentations**

I. Introduction

Afin de mesurer la pertinence du système de pilotage que nous avons proposé, la simulation des scénarios les plus probables reste un moyen simple à implémenter et fiable pour valider l'approche, ajuster en conséquence les règles de pilotage et les faire évoluer en fonction de l'évolution du contexte hospitalier organisationnel et réglementaire.

Dans cette partie, nous discutons les résultats issus des simulations basées sur des données réelles obtenues de l'hôpital R. PAX. Dans un premier temps, nous justifions les plateformes de développement choisies et nous donnons un aperçu sur les outils utilisés. Dans un second temps, nous présentons la démarche de collecte des données. Dans un troisième temps, nous présentons la planification initiale qui nous servira de brique de base pour lancer la simulation des instances de test que nous définissons plus loin. Dans un quatrième temps, nous menons une étude de performance du système « PILPAP » en étudiant sa robustesse et sa flexibilité.

II. Environnement de développement

1. Introduction

Afin d'implémenter le système multi-agents que nous avons modélisé, une plateforme de développement est requise.

Le choix de l'environnement et des plateformes de développement de « PILPAP » a été guidé par quatre critères majeurs :

- **Facilité d'utilisation**, sur le plan de simplicité d'apprentissage, la facilité de la mise en œuvre pour un programmeur expérimenté ainsi que la liberté d'utilisation.
- **Orienté objet** vu que la modélisation de « PILPAP » est basée sur UML, qui est un langage de modélisation unifié orienté objet.
- **Portabilité** du langage sur différentes plateformes. Ce critère a une importance majeure puisque le livrable est destiné à une utilisation au sein d'un centre hospitalier où les équipements informatiques ne sont pas à la pointe de la technologie.
- **Parallélisme** pour pouvoir exécuter les différents agents qui composent le système simultanément.

2. Langage de programmation

Nous avons développé le système « PILPAP » en utilisant le langage de programmation Java. Il permet une programmation orientée-objet et modulaire. Outre son orientation objet, le langage Java est portable : un code Java est exécutable sur n'importe quelle machine (serveur, station de travail, ordinateur portable, tablette ou smartphone). Java permet également une exécution, en apparence, simultanée de plusieurs processus. De plus de nombreuses bibliothèques de développement libres fournissent des mises en œuvre de plusieurs fonctionnalités facilement utilisables.

Pour toutes ces raisons, le langage de programmation Java est le mieux approprié pour la mise en œuvre de l'outil « PILPAP » fidèle aux spécifications scientifiques énoncées auparavant.

3. Plateforme de développement du système multi-agents

Par analogie aux outils de développement des systèmes basés sur le paradigme objet, des outils de développement des systèmes qui reposent sur le paradigme agent ont apparus, notamment des plateformes génériques. Parmi ces plateformes, nous citons SWORM (Minar *et al.*, 1996) pour les agents réactifs, DIMA (Guessoum, 1998), JADE (Bellifemin *et al.*, 1999) et MADKIT (Gutknecht *et al.*, 2000) pour les agents cognitifs. Cette liste n'est pas exhaustive, il existe également d'autres plateformes qui ont été utilisées pour la mise en œuvre de plusieurs applications. Une liste complète est disponible à l'adresse <http://www.agentlink.org/resources/agent-software.php>.

Quelques critères ont été pris en considération pour le choix de la plateforme de développement du système multi-agents tel qu'il a été modélisé dans ce manuscrit à savoir :

- Conformité des protocoles d'interaction avec les spécifications FIPA ;
- Flexibilité ;
- Distribution ;
- Extensibilité.

Compte tenu de ces critères, nous avons opté pour la plateforme JADE pour l'implémentation de « PILPAP ».

JADE est une plateforme multi-agents développée en Java par CSELT (groupe de recherche de Gruppo Telecom, Italie) pour simplifier la mise en œuvre des applications distribuées à

base d'agents, et ce, à travers un middleware qui se conforme aux normes de FIPA. JADE offre une implémentation flexible des SMA qui communiquent via des messages ACL. De plus, cette plateforme supporte la mobilité et l'évolutivité. Elle offre également la possibilité d'intégration des services web, de distribution sur différents serveurs ainsi que la communication entre plusieurs plateformes JADE.

Cette plateforme comporte plusieurs outils d'administration des agents qui nous offrent la possibilité de suivre l'état des agents et l'évolution des communications inter-agents.

- L'agent « *RMA* » gère l'interface d'administration principale.
- L'outil « *introspector* » permet de connaître les détails de l'état de fonctionnement de chaque agent du système.
- L'agent « sniffer » nous permet de connaître l'évolution des communications inter-agents en détaillant la liste des messages reçus et/ou envoyés.
- L'agent « Dummy Agent » nous offre la possibilité d'envoyer un message à un agent particulier et de consulter sa réponse.
- L'agent « Directory Facilitator Agent » ou « DF » qui gère le service de pages jaunes. Les agents qui fournissent un service doivent se déclarer auprès de lui et les agents qui vont consommer ces services doivent le consulter.

4. Conclusions

JADE est parmi les plateformes de développement de systèmes multi-agents la plus utilisée par la communauté scientifique. Elle offre des outils d'administration, nous permettant de suivre l'évolution du système en temps réel.

III. Données

Afin de réaliser les tests fonctionnels du système que nous avons proposé, une étude de l'existant ainsi qu'une récolte des données réelles ont été nécessaires. Pour ce faire, nous avons eu plusieurs entrevues avec le personnel du centre hospitalier de Sarreguemines, à savoir la directrice des soins, les cadres de santé, les secrétaires et les infirmiers.

Dans un premier lieu, nous avons rencontré la responsable de la gestion des risques, la cadre de bloc, la cadre de pharmacie et la directrice des soins. Les responsables ont évoqué les problèmes de fonctionnement suivants :

- *Synchronisation des flux patients externes et internes*

En effet, la majorité des médecins du centre hospitalier sont des médecins libéraux. Ils consultent les patients dans leurs cabinets privés pour les transférer en cas de chirurgie ou d'examens spécifiques (examen d'effort par exemple) au centre hospitalier. Cependant, peu d'informations sur le patient et son dossier médical sont disponibles lors de l'admission. Une synchronisation entre les cabinets privés et l'hôpital Robert Pax s'avère nécessaire afin d'avoir un dossier patient partagé accessible pour tous les acteurs du parcours patient.

- *Gestion des rendez-vous*

À l'heure actuelle, les durées de consultations sont imprévisibles, de même que l'arrivée potentielle de patients non-électifs, ce qui induit des temps d'attente longs pour les patients et des heures supplémentaires pour le personnel hospitalier.

- *Lissage des charges*

Le fonctionnement du centre hospitalier est scindé en deux grandes activités : chirurgie (matinées) et consultations (après-midis). Ce mode de fonctionnement entraîne une surutilisation ou sous-utilisation des ressources selon les périodes de la journée. Une étude sur l'impact du changement des habitudes chirurgicales sur l'utilisation des ressources peut affirmer ou infirmer la nécessité de revoir l'organisation actuelle.

- *Planning prévisionnel à long terme*

À l'heure actuelle, la responsable de bloc reçoit hebdomadairement les interventions chirurgicales à programmer pour la semaine suivante de la part des secrétaires des autres services et des cabinets privés. Elle établit alors le programme opératoire hebdomadaire manuellement. Cependant, une vision à long terme, une planification en six mois, serait d'une grande utilité pour mieux ordonnancer et planifier les interventions.

Dans un deuxième temps, nous avons visité les lieux afin de visualiser la préparation dans l'espace des services et collecter quelques statistiques relatives à la capacité d'accueil de l'hôpital en termes de ressources humaines et matérielles, synthétisées dans le Tableau 11.

Dans un troisième temps, nous avons rencontré le médecin DIM (Département Informatique Médical) pour effectuer des extractions de la base de données. Nous avons obtenu la liste des consultations des années 2013, 2014 et 2015.

Tableau 11 : Ressources humaines et matérielles de l'hôpital Robert Pax

Service	Praticiens	Infirmiers	Salles spécialisées	Salles polyvalentes
<i>Anesthésie</i>	13	16	0	5
<i>Cardiologie</i>	6	5	4	2
<i>Ophtalmologie</i>	2	1	1	0
<i>ORL</i>	3	1	1	0
<i>Chirurgie orthopédique</i>	3	4	2	0
<i>Urologie</i>	3	5	3	1
<i>Chirurgie générale et digestive</i>	6	3	3	0
<i>Gastro-Entérologie</i>	5	4	2	0
<i>Pneumologie</i>	7	4	2	2
<i>Imagerie</i>	8	6	10	0
<i>Biologie</i>	3	2	1	5

En analysant toutes les informations, nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

- En moyenne, 60 consultations (consultations de suivi post-opératoire, consultations de suivi et premières consultations) sont effectuées par jour dans les différents services de Robert Pax entre 8h30 et 17h30. Chaque praticien exerce ses fonctions durant des plages horaires prédéfinies annuellement.
- Les pratiques sont différentes dans chaque service. Le service urologie est surchargé avec une moyenne de dépassement des plages d'ouverture de 2h. Dans ce service, la planification est centrée sur le praticien qui ausculte un patient dans une salle le temps qu'une infirmière installe un deuxième et qu'un troisième quitte la troisième salle. Ce mode de fonctionnement génère beaucoup d'heures supplémentaires. Quant au service chirurgie générale et digestive, par exemple, il est le plus optimal. La planification des actes médicaux est centrée sur le patient.
- Certains praticiens cumulent plusieurs heures supplémentaires.

En nous basant sur les données réelles, nous avons créé une base de données avec l'ensemble du personnel médical (praticiens, infirmiers, brancardiers, etc.) des salles, des services, ainsi que les plages d'ouverture. Des extraits de la base de données sont données en Annexe 2 : Données (Figure 32, Figure 33, Figure 34, Figure 35).

La construction de la base de données de la capacité d'accueil de l'hôpital est la première étape pour entamer les expérimentations.

Tableau 12 : Plages d'ouverture des salles d'opération du bloc opératoire de l'hôpital Robert Pax

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
Salle 1	ORL	Ophtalmologie	Chirurgie main	Ophtalmologie	Chirurgie main
					Ophtalmologie
Salle 2	Géynecologie	Géynecologie	Géynecologie	Géynecologie	Géynecologie
	Géynecologie		Stomatologie	Digestif	Stomatologie
Salle 3	Urologie	Urologie	Urologie	Urologie	Urologie
		Urologie		Urologie	
Salle 4	Digestif	Digestif	Digestif	Gynécologie	Digestif
				Digestif	
				Endoscopie	
Salle 5	Stomatologie	Digestif	Digestif	Stomatologie	Digestif
	Urologie		Cardiologie	Chirurgie main	
				Urologie	
Salle 5	Traumatologie	Traumatologie	Traumatologie	Traumatologie	Traumatologie
Salle 6 endoscopie	Endoscopie	Endoscopie	Endoscopie	Endoscopie	Endoscopie
		Endoscopie	Endoscopie		
		Endoscopie			

Tableau 13 : Plages d'ouverture des services de consultations de l'hôpital Robert Pax

	Lundi										Mardi										Mercredi										Jeudi										Vendredi																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Anesthésie																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Biologie																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									</

IV. Planification initiale

1. Introduction

En vue de la complexité du problème de la planification initiale des parcours des patients électifs, une résolution exacte est trop coûteuse en temps de calcul. En effet, le temps de calcul augmente exponentiellement avec la taille des activités de soins à planifier comme nous l'avons prouvé dans le chapitre II. Toutefois, les méthodes approchées constituent une alternative intéressante. Nous distinguons dans la littérature plusieurs méta-heuristiques qui ont fait leurs preuves à savoir la recherche taboue (Glover, 1989), le recuit simulé (Aarts & Van Laarhoven, 1985), l'algorithme génétique (Goldberg, 1989), et la recherche à voisinage variable (Mladenović & Hansen, 1997). Chacune de ces méthodes a des originalités dans la conception et la méthode de recherche de l'optimum. Cependant, nous avons choisi d'utiliser le Recuit Simulé en raison de sa simplicité de mise en œuvre, principalement. En effet, les algorithmes génétiques, par exemple, nécessitent une phase de codage des solutions en chromosomes qui, ici, se révélait peu opportune. Rappelons, que cette méta-heuristique n'est en rien le cœur de notre recherche. Elle n'a d'utilité que pour constituer une population initiale de l'hôpital qui ne soit pas quelconque (car même empiriquement, les planifications manuelles actuelles sont déjà optimisées, sinon optimales), laquelle sera, par la suite, perturbée par l'arrivée de nouveaux patients et c'est uniquement au niveau de ces nouveaux patients que « PILPAP » intervient.

On trouvera en Annexe II, les bases du Recuit simulé. Sa seule difficulté résidant dans son paramétrage, nous discutons ci-dessous de ce point.

2. Paramétrage du Recuit simulé proposé

Nous détaillons dans ce qui suit les paramètres que nous avons retenus pour la résolution du problème de planification et d'ordonnancement prédictif d'un ensemble de patients électifs.

2.1. Solution initiale

L'efficacité des méthodes approchées, basées sur une solution initiale, dépend souvent du choix de cette dernière. Nous distinguons deux manières pour construire une solution initiale :

- Par tirage au sort d'une solution parmi l'ensemble des solutions possibles ;

- Par des méthodes de construction progressive en respectant les contraintes du problème.

Dans notre approche, nous avons généré la solution initiale par une heuristique de planification et d'ordonnancement. Cette heuristique permet l'affectation de n_a acteurs et n_r ressources à n patients sur un horizon de temps H en utilisant des règles d'affectation et d'ordonnancement tout en respectant les contraintes du problème. Chaque patient p a un parcours de soins S_p correspondant à sa pathologie. Ce dernier est adapté suivant l'évolution de l'état de santé du patient en question. Autrement dit, à chaque patient p , on associe un parcours S_p . Chaque parcours est composé d'un ensemble d'activités de soins liées entre elles par des contraintes temporelles.

Cette heuristique de recherche d'une solution initiale est basée sur un le principe de l'affectation des acteurs et ressources requis(es) pour chaque activité de soin selon leurs disponibilités. Cette affectation permet un lissage de charges pour les acteurs et les ressources hospitalières. Elle permet également de minimiser la durée de la prise en charge des patients. L'heuristique de planification et d'ordonnancement des patients que nous avons proposé est présentée dans ce qui suit.

2.2. Fonction voisinage

La méthode de recherche de voisinage permet d'améliorer la solution courante à l'aide d'une transformation simple.

Le voisinage de la solution courante est obtenu par une permutation de deux activités de soins dans deux parcours différents. Les activités à permuter sont choisies selon une loi de probabilité uniforme. L'opération de permutation que nous avons utilisée garantit la satisfaction des contraintes de notre problème. Par conséquent, la permutation concerne uniquement les activités de soins qui ont les mêmes caractéristiques et qui garantissent une solution faisable.

2.3. Variation de la température

Nous avons choisi de calculer la température initiale en calculant la variance de la fonction de coût de la solution initiale en effectuant des permutations aléatoires des soins planifiés.

Le deuxième paramètre à déterminer est l'équilibre statique. Nous avons opté pour un changement de palier dès que l'une des conditions suivantes est remplie : le nombre de solutions acceptées (respectivement refusées) a atteint leur seuil maximal prédéfini.

- $seuil_{acceptées} = 0.5 \times n_{activités_soins}$;
- $seuil_{refusées} = seuil_{acceptées} + 1$.

Pour assurer une convergence rapide, nous avons retenu $k = 0.7$.

3. Conclusions

L'application de l'algorithme de recuit simulé nous a permis d'obtenir un ordonnancement prévisionnel de l'ensemble des parcours des patients électifs ainsi que le planning prévisionnel du personnel et des ressources. La planification initiale proposée est :

- **Robuste** dans le sens où la solution finale ne dépend pas uniquement de la solution initiale ;
- **Convergent** car il a été démontré que la méthode de recuit simulé garantit d'atteindre l'optimum global avec une probabilité très proche de 1 (Aarts & Van Laarhoven, 1985) (Kan & Timmer, 1987). Par conséquent, cette méthode présente un avantage sur les autres méthodes qui ne garantissent pas forcément de trouver un optimum global.
- **Facile à implémenter.**

Le choix d'un algorithme glouton pour construire une solution initiale nous a permis de prendre en considération les contraintes du problème. La fonction de voisinage que nous avons développée garantit également le respect des contraintes. Cependant, l'inconvénient majeur de l'algorithme de recuit simulé réside dans le nombre des paramètres à fixer. Nous avons contourné ce problème en effectuant une étude empirique. Pour cela, nous avons étudié les résultats de l'algorithme avec plusieurs combinaisons de paramètres.

Ainsi, nous avons obtenu une planification, des parcours des patients, optimisée qui nous servira de base pour évaluer les performances de système « PILPAP ».

V. Expérimentations

1. Introduction

Nous nous focalisons dans la suite à la simulation de ces règles de pilotage afin de déterminer le comportement émergent de « PILPAP », et par conséquent l'adéquation entre le comportement désiré et celui obtenu. De plus, une analyse approfondie nous permettra d'adapter les règles définies.

Nous utilisons une méthode qui a été largement utilisée pour réduire efficacement les coûts des hôpitaux et optimiser leurs performances et qui est la simulation.

C'est un outil qui nous permet dans un premier lieu de modéliser les parcours complexes des patients pour tester, dans un second lieu, les instances de tests, de changement des règles de pilotage, que nous avons définis et enfin améliorer ces derniers pour une performance optimale.

La simulation présente ainsi un intérêt pour la validation des stratégies de pilotage que nous proposons.

Cependant, la simulation du comportement du système « PILPAP » requiert des problèmes tests. Pour ce, nous avons défini une instance en nous basant sur des données que nous avons récoltées auprès du médecin DIM et des cadres de santé.

2. Instances de test

Nous avons limité l'horizon de temps de l'instance étudiée à deux semaines pour analyser finement le comportement du système face aux perturbations. Afin de nous rapprocher de la réalité, nous avons examiné méticuleusement les données récoltées pour sélectionner deux semaines représentatives et significatives.

L'objectif principal de nos simulations est de tester les performances du système « PILPAP », essentiellement, sa réactivité face aux perturbations et sa robustesse dans les cas limites.

C'est pourquoi nous avons implémenté un algorithme de recuit simulé pour avoir un planning prévisionnel optimisé sur deux semaines. La solution obtenue nous a permis d'avoir un planning prévisionnel rempli à une hauteur de 83%. Bien évidemment, l'objectif étant de valider la « qualité » de la planification des nouveaux patients, il nous fallait garder de la capacité disponible (ici, 17%) dont la quantité est représentative de celle qui est en moyenne observée en début de semaine au centre hospitalier Robert Pax.

Tableau 14 : Charge du planning initial jour par jour

	Première semaine	Deuxième semaine
Lundi	100%	80%
Mardi	98%	75%
Mercredi	95%	70%
Jeudi	90%	70%
Vendredi	90%	70%

Une planification prévisionnelle optimale étant construite, nous simulons les perturbations qui peuvent surgir et nous analysons la réaction du système.

3. Scénario de simulation

Les perturbations sont modélisées par l'arrivée d'un patient non électif, ou la dégradation de l'état de santé d'un patient, ou encore la modification de la durée d'une activité de soins.

D'autres paramètres sont nécessaires pour bien mener les simulations comme la tendance d'arrivée des patients ainsi que la probabilité d'un évènement.

Tableau 15 : Paramètres de simulation

Paramètres	Désignation
Loi d'arrivée des patients	Loi de poisson
Classe des patients	- Classe 0 : prise en charge immédiate – 10% des arrivées - Classe 1 : prise en charge dans la journée – 20% des arrivées - Classe 2 : prise en charge dans la semaine – 20% des arrivées - Classe 3 : prise en charge dès que possible – 50% des arrivées
Indicateurs observés	- Taux d'activités de soins planifiées - Taux d'occupation des ressources humaines et matérielles
Temps de cycles	Loi uniforme
Conditions initiales	Planification obtenue par l'algorithme de recuit simulé

Durée de la simulation	4 jours ouvrables
Probabilité qu'un patient externe accepte une modification de son rendez-vous	20%

4. Étude de performance

4.1. Fonction objectif

Afin de quantifier l'intérêt de notre proposition en adoptant une approche réactive à base d'agents pour gérer les flux des patients, nous avons comparé l'évolution de la fonction objectif du système dans l'état actuel avec celle relative à notre approche.

La fonction objectif est la moyenne pondérée du taux des activités de soins planifiées, du taux d'occupation du personnel, du taux d'occupation des ressources matérielles ainsi que du profit. Nous avons opté pour une pondération linéaire avec des coefficients qui doivent être fixés par le conseil d'administration du centre hospitalier Robert Pax selon leur besoin.

Pour nos simulations, nous avons utilisé une moyenne arithmétique (c'est-à-dire que tous les critères ont le même poids).

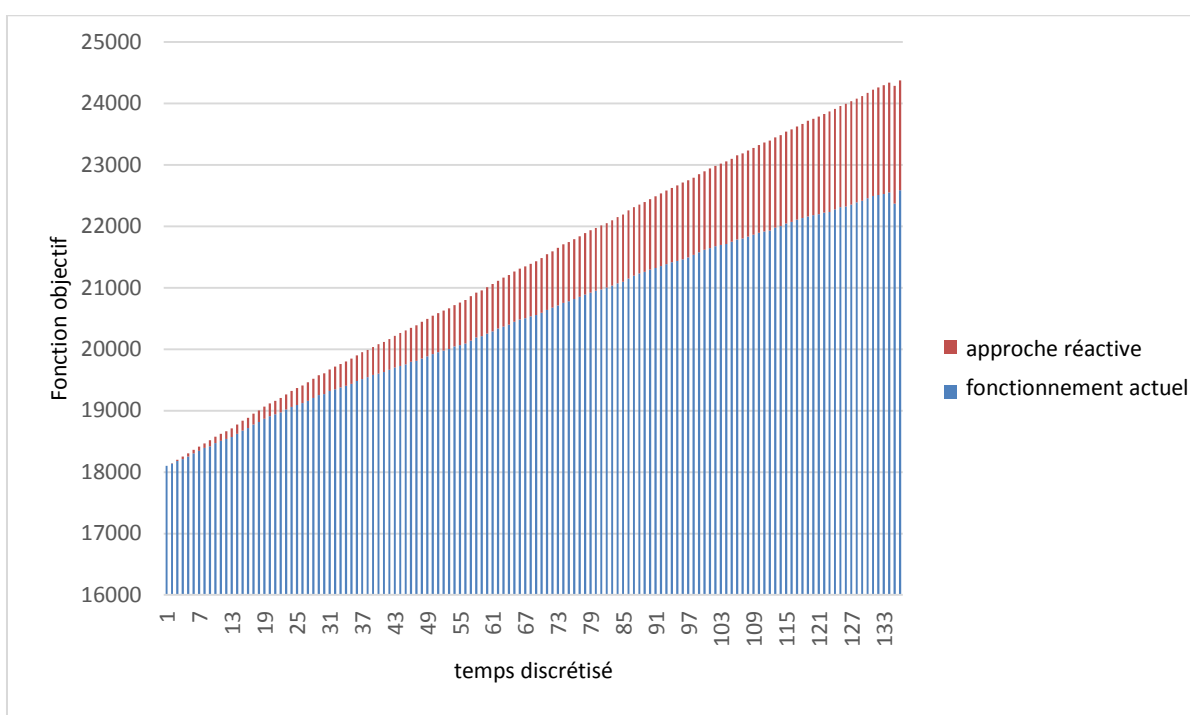


Figure 22 : Évolution de la fonction objectif avec « PILPAP »

Nous nous sommes basés sur la planification optimale initiale (recuit simulé) et nous avons simulé des perturbations avec l'arrivée de nouveaux patients à programmer selon le scénario de simulation décrit dans le paragraphe 3.

Pour éviter le caractère aléatoire des résultats, nous avons effectué 50 simulations. La Figure 22 rapporte deux fonctions objectifs :

- La fonction objectif du système sous le fonctionnement actuel. C'est-à-dire une politique premier arrivé premier servi et la prise en charge immédiate des cas urgents (la courbe bleue) ;
- La fonction objectif du système « PILPAP » (la courbe rouge).

Le premier constat c'est que la fonction objectif suit une courbe croissante. Cela s'explique par le fait qu'une fois une activité de soin est planifiée, le taux de planification et d'occupation des ressources humaines et matérielles ainsi que le profit augmentent.

À la fin de la simulation, nous notons que l'approche réactive a permis d'améliorer la fonction objectif d'environ 7,5%.

Notre objectif ne se limite pas à l'amélioration de la fonction objectif uniquement, mais d'améliorer le fonctionnement de l'hôpital.

L'analyse de l'évolution de la fonction objectif nous permet de confirmer l'intérêt de la mise en place de « PILPAP » pour améliorer significativement le taux des activités de soins planifiées, d'occupation du personnel, d'occupation des ressources matérielles ainsi que le profit.

Nous nous focalisons dans ce qui suit à l'étude de la robustesse et de la flexibilité.

4.2. Étude de la robustesse

L'étude de la robustesse de l'approche réactive que nous proposons nous permettra de mesurer la capacité de notre système « PILPAP » à prendre en considération les perturbations qui peuvent surgir.

Afin de mener cette étude de robustesse, nous avons étudié l'ensemble des scénarios les plus probables, noté I_A . Ainsi, nous pouvons prendre en compte le caractère aléatoire des perturbations.

Pour ce qui suit, nous nous sommes basés sur les définitions proposées par Rossi (Rossi, 2003) à savoir :

- *La performance locale* qui consiste à évaluer l'approche proposée en simulant tous les scénarios I_A de l'ensemble des scénarios possibles I_A par un calcul de la fonction objectif σ_{i_A} .
- *La performance globale* est définie par le pire cas tel que : $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2)$ avec $\lambda_1 = \max_i \sigma_{1i_A}$ et $\lambda_2 = \max_i \sigma_{2i_A}$
- *La robustesse de la solution*. Soit C l'ensemble des critères de performance désirés. La solution est robuste si et seulement si $\lambda_1 \leq c_1$ et $\lambda_2 \geq c_2$.

Dans notre situation, l'évaluation par « performance locale » est la plus simple à mettre en œuvre, c'est donc ce mode d'évaluation que nous allons déployer.

Pour ce faire, nous avons considéré dix instances de tests (Tableau 16) que nous avons générés selon le scénario de simulation présenté dans le paragraphe 3, mais en faisant évoluer les répartitions entre les différentes classes de patients.

Tableau 16 : Paramètres des dix instances de test

	Classe 0	Classe 1	Classe 2	Classe3
Instance 1	8%	16%	24%	52%
Instance 2	7%	19%	21%	53%
Instance 3	5%	21%	18%	56%
Instance 4	6%	18%	21%	55%
Instance 5	8%	16%	25%	51%
Instance 6	8%	14%	22%	56%
Instance 7	5%	17%	31%	47%
Instance 8	4%	17%	25%	54%
Instance 9	4%	15%	25%	56%
Instance 10	9%	18%	21%	52%

Pour chaque instance des tests I_A , nous déterminons sa performance locale $\sigma_{i_A} = (\sigma_{1i_A}, \sigma_{2i_A}, \sigma_{3i_A}, \sigma_{4i_A})$ tel que :

σ_{1i_A} : taux des activités de soins affectées pendant les horaires d'ouverture

σ_{2i_A} : taux des activités de soins affectées hors horaires d'ouverture

σ_{3i_A} : taux de charge de travail des acteurs

σ_{4i_A} : taux d'utilisation des ressources

Afin de mettre en évidence la robustesse de notre approche, nous comparons la performance locale de la planification initiale et celle proposée.

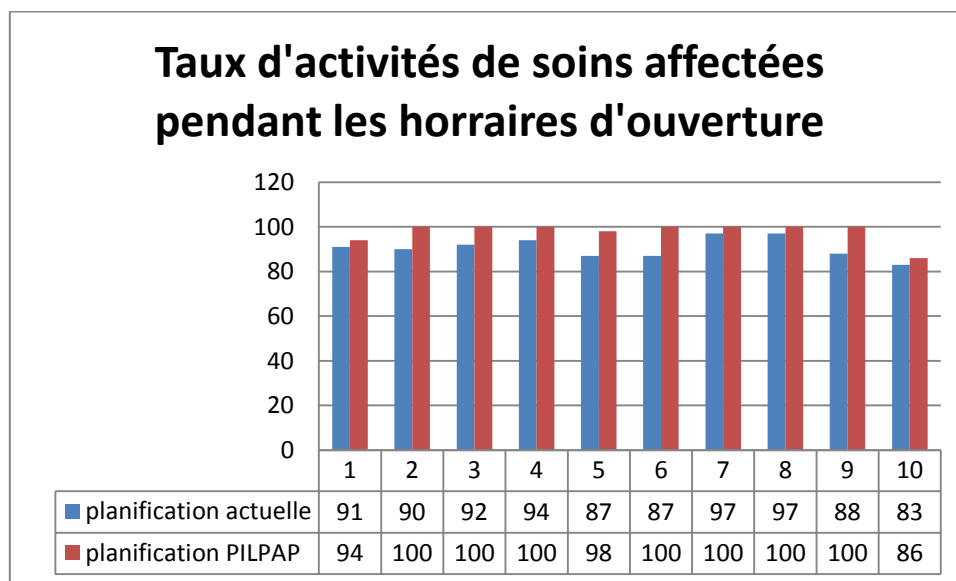


Figure 23 : Planification actuelle VS « PILPAP » : taux d'activités de soins affectées pendant les horaires d'ouverture

La Figure 23 présente le taux des activités de soins affectées pendant les horaires d'ouverture dans les dix instances de test.

Nous précisons que la planification actuelle correspond à la planification initiale optimale obtenue par le recuit simulé plus la programmation des nouveaux patients selon la politique actuelle de l'hôpital à savoir FIFO (premier arrivé premier servi) et une prise en charge immédiate des cas vitaux. Quant à la planification « PILPAP », elle correspond à la planification initiale et en ajoutant les nouvelles arrivées en utilisant notre approche réactive.

Les résultats montrent que notre approche de pilotage réactif permet de maximiser davantage le nombre des activités de soins programmées. En effet, nous sommes toujours meilleurs en terme de taux d'activité et dans 70% des cas, nous exploitons au maximum les plages d'ouverture des différents services.

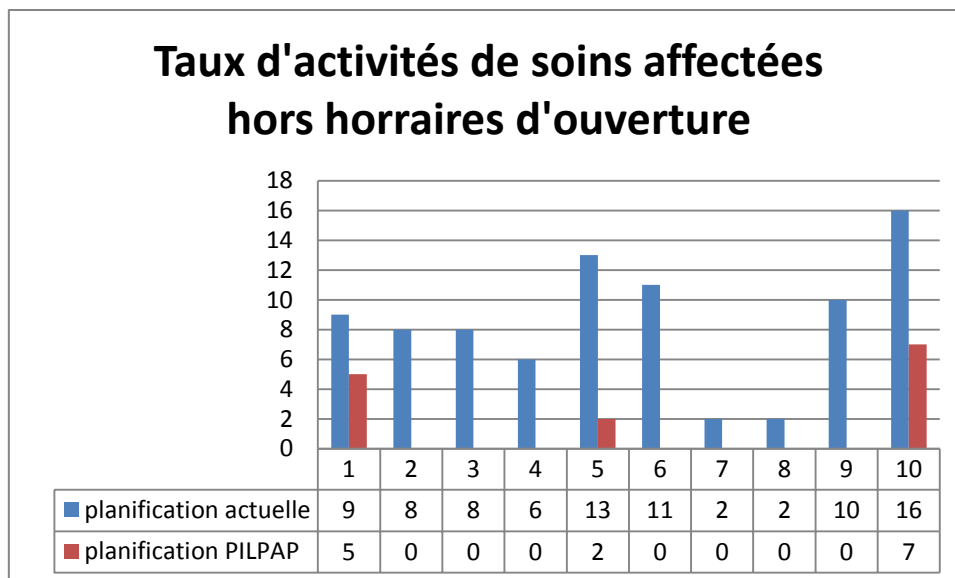


Figure 24 : Planification actuelle VS « PILPAP » : taux d'activités de soins affectées hors horaires d'ouverture

La Figure 24 présente le taux des activités de soins affectées hors plages d'ouverture. Nous constatons qu'en adoptant une approche réactive, les heures supplémentaires d'ouverture, qui ont un coût conséquent, ont été minimisées. Nous observons également que dans 70% des scénarios simulés, le recours aux heures supplémentaires est quasi nul.

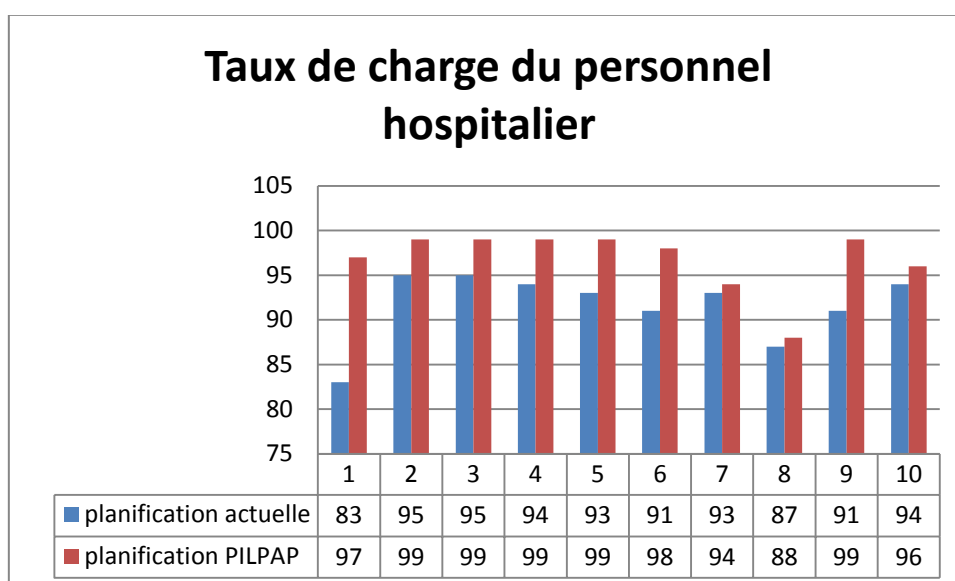


Figure 25 : planification actuelle VS « PILPAP » : taux de charge du personnel hospitalier

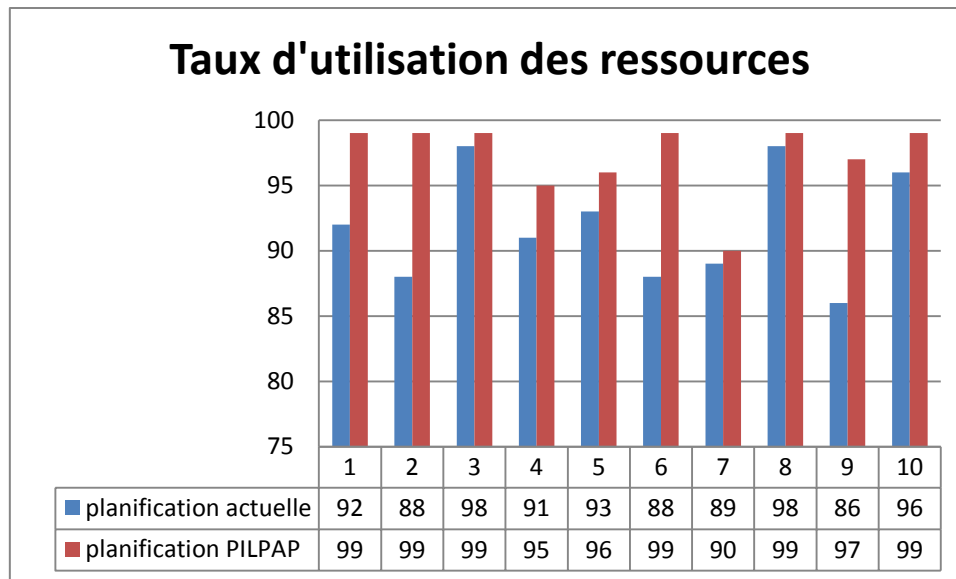


Figure 26 : Planification actuelle VS « PILPAP » : taux d'utilisation des ressources

La Figure 25 et la Figure 26 présentent respectivement le taux de charge de travail du personnel hospitalier et le taux d'utilisation de ressources. Avec le système « PILPAP », nous améliorons l'utilisation des ressources humaines et matérielles. D'une part, du fait que notre approche a un taux d'affectation plus élevé par rapport à l'approche classique. D'autre part, avec notre heuristique, l'affectation des ressources est optimisée de façon à maximiser l'occupation des ressources humaines et matérielles.

4.3. Étude de la flexibilité

Le Groupe de recherche en Ordonnancement Théorique et Appliqué (*GOThA, 2002*) définit la flexibilité comme les possibles modifications que l'on peut apporter à un ordonnancement calculé statiquement (hors ligne) et qui peuvent entraîner une perte de performance acceptable.

Dans un contexte incertain, nous distinguons deux types de flexibilité : « offerte » et « choisie ». La flexibilité offerte se mesure par le degré de liberté offert lors de la première phase, ordonnancement statique du processus général. Dans ce cas, les perturbations peuvent être gérées via un ordonnancement statique sans recourir à un algorithme réactif.

Quant à la flexibilité choisie, elle consiste à choisir une solution adéquate en temps réel au cours de la deuxième phase du processus global de l'ordonnancement.

Dans la problématique traitée, nous étudions la flexibilité choisie du système que nous avons proposé, puisque la flexibilité « offerte » n'existe (quasiment) pas. En effet, les plannings hospitaliers réalisés « *a priori* » sont dimensionnés au plus juste et n'*offrent* aucun degré de

liberté, hormis les heures supplémentaires. La seule exception notable concerne le bloc opératoire où des plages libres sont aménagées afin de pouvoir accueillir de potentielles urgences.

Rossi (Rossi, 2003) définit le coût de la flexibilité choisie comme « *le coût qu'il faut payer pour transformer une solution calculée statiquement (hors ligne) en une solution dynamique (en ligne), autrement dit le nombre de modifications apportées à la solution hors ligne* ».

. Nous pouvons considérer, suivant cette définition, qu'une modification que le système ne peut intégrer à un coût infini et que moins il y en aura, plus le système pourra être considéré comme flexible.

Pour étudier la flexibilité de notre système, nous reprenons l'ensemble des instances de tests, I_A. Nous étudions le taux des activités non affectées comme indicateur de performance (Figure 27).

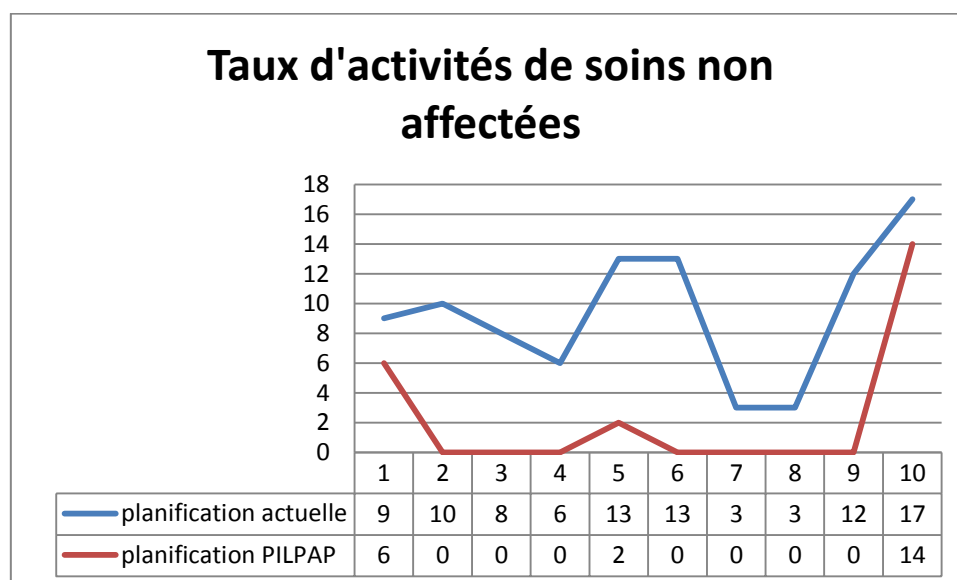


Figure 27 : Flexibilité du système « PILPAP » : taux d'activités de soins non affectées

Nous remarquons que pour la dixième instance, le système atteint ses limites. L'approche réactive que nous proposons ne suffit plus pour atteindre un niveau de flexibilité très élevé. Mais, il est à noter que dans cette instance, le système est particulièrement contraint avec un fort taux de patients classe 0 (urgence absolue) et que les disponibilités des ressources tant humaines que matérielles ne sont pas extensibles. Cependant, avec une moyenne de 2,2% d'activités de soins non affectées, nous pouvons largement considérer que notre système est flexible. D'autant plus, qu'il faut garder à l'esprit que notre simulation ne s'étend que sur deux semaines et que les agents considèrent en fait la troisième semaine comme inexistante (ils ne peuvent donc rien planifier au-delà des deux semaines d'horizon). De fait, même des

patients non électifs peuvent poser des problèmes lorsque le taux d'occupation de chaque jour approche les 100%. Sans cette contrainte, purement informatique et liée à la simulation, il est clair que le taux de non-affectation serait encore plus faible.

Nous soulignons que les patients électifs que notre système n'arrive pas à programmer pour diverses raisons, nous acceptons une dégradation du système (heures supplémentaires et/ou décalage des rendez-vous). Ils sont alors pris en charge immédiatement. Quant aux patients non électifs, nous supposons qu'ils seront programmés plus tard en-dehors de notre plage de simulation.

5. Conclusions

Dans cette partie, nous avons montré que la solution de pilotage que nous proposons est robuste et flexible en nous basant sur les définitions proposées par Rossi. Ce qui montre que les règles de pilotage, que nous avons définies sont en adéquation avec nos attentes et ceux de la direction du centre hospitalier Robert Pax, à savoir réduire les heures supplémentaires, maximiser les taux d'occupation des acteurs et des ressources et augmenter la satisfaction patients en réduisant les temps d'attentes.

Nous avons généré dans un premier lieu un planning initial optimal en nous appuyant sur les données que nous avons collectées et une implémentation de l'algorithme de recuit simulé.

La plateforme JADE nous a permis de simuler le fonctionnement du système et essentiellement la réaction du système face aux perturbations en ajoutant ou en supprimant des agents, chose qui valide notre choix d'utiliser cette plateforme.

Les résultats des simulations sont satisfaisants puisque les objectifs que nous avons fixés sont atteints. En effet, le nombre d'activités de soins ordonnancées a augmenté, le recours aux heures supplémentaires coûteuses a diminué, et par conséquent le taux d'occupation du personnel hospitalier et des ressources a augmenté.

De plus, un système à base d'agent nous offre la possibilité d'adapter en temps réel les règles du pilotage et les réajuster en fonction de l'évolution de l'hôpital Robert Pax. En effet, comme toute structure, un établissement de soins ne cesse d'évoluer vers de nouvelles organisations pour améliorer la qualité des services et optimiser les ressources. Dans cette optique, la simulation à base d'agents peut être un moyen efficace pour étudier l'impact des modifications sans avoir à les mettre en place.

VI. Synthèse

Une fois le système de pilotage modélisé, nous avons implémenté notre solution en nous appuyant sur la plateforme JADE développé en JAVA et qui supporte les protocoles que nous avons définis.

L'implémentation du système nous a permis de mener des expérimentations par simulation de scénarii. Nous avons choisi les scénarii les plus probables pour représenter au mieux le fonctionnement de l'hôpital Robert Pax. Pour ce, les réunions avec les cadres de santé nous ont été d'une grande utilité ainsi que les données réelles récoltées auprès du médecin DIM. Ensuite, nous avons énuméré les scénarii les plus probables pour pouvoir tester le comportement du système face aux aléas et aux incertitudes.

Les résultats des simulations des scénarii que nous avons menées nous ont permis de valider l'approche réactive proposée. La résolution par interaction d'agents permettra aux cadres de santé d'avoir une vision à la fois globale et détaillée du planning des activités de soins à réaliser par le personnel hospitalier, et par conséquent les plannings de chaque acteur, chaque ressource et chaque patient, tout en ayant un niveau d'optimalité bien supérieur à ce qui se fait actuellement et même aux résultats pouvant être obtenus avec une méta-heuristique globale.

De plus, ces simulations nous ont aussi permis de démontrer l'intérêt de la mise en place de l'approche proposée dans les établissements de soins. En effet, dans sept scénarios sur dix le recours aux heures supplémentaires est nul en utilisant notre approche alors qu'avec un mode de fonctionnement « classique » dans tous les scénarios étudiés, le recours aux heures supplémentaires pour absorber les perturbations est inévitable.

De plus, nous avons montré via une étude de robustesse et de flexibilité que notre système est **robuste et flexible**.

Conclusion générale

I. Conclusions

Le système de santé français fait face à de nombreuses réformes qui exigent de nouvelles actions afin de maîtriser les dépenses et assurer une meilleure qualité de prise en charge des patients de plus en plus exigeants. De nouvelles approches de gestion et d'organisation des établissements de soins doivent être adoptées pour résoudre les problèmes relatifs à la gestion des parcours patients. L'objectif général de nos travaux de thèse est de proposer une nouvelle approche de pilotage réactif des parcours patients au sein des systèmes hospitaliers et d'appliquer notre solution au centre hospitalier Robert Pax de Sarreguemines en France.

Nous avons proposé un système d'aide à la décision destiné aux gestionnaires des établissements de soins. Pour résoudre cette problématique, nous avons opté pour une approche de pilotage centrée-patient basée sur le paradigme agent. En effet, nous nous sommes inspirés des approches de pilotage centrées sur le produit qui ont fait leurs preuves dans le domaine industriel. De plus, nos travaux s'appuient sur les avancées des systèmes multi-agents afin d'optimiser les parcours patients dans un environnement incertain et distribué.

Nous nous sommes basés sur une modélisation des parcours de soins et sur les caractéristiques des systèmes multi-agents pour définir un système complexe et fortement distribué à base d'agents.

Le système que nous avons proposé permet une gestion intégrale du parcours patient en proposant une prise en charge rapide et efficace des patients ainsi qu'une utilisation optimisée des ressources humaines et matérielles dont dispose l'hôpital grâce à la coopération du personnel hospitalier, via la communication entre agents, et la génération dynamique et réactive des parcours de soins et des plannings du personnel. Nous avons alors défini une architecture hétérarchique, modulable et centrée patient.

En conclusion, nous avons alors proposé un **système multi-agents de pilotage réactif dynamique et distribué centré patient du parcours patient au sein des systèmes hospitaliers**.

Les résultats des simulations sont satisfaisants puisque les objectifs que nous avons fixés sont atteints. En effet, le nombre d'activités de soins ordonnancées a augmenté, le recours aux

heures supplémentaires coûteuses a diminué, et par conséquent le taux d'occupation du personnel hospitalier et des ressources a augmenté.

De plus, un système à base d'agent nous offre la possibilité d'adapter en temps réel les règles du pilotage, de les réajuster en fonction de l'évolution de l'hôpital Robert Pax et même tester virtuellement l'impact de ces modifications sans pour autant prendre des risques.

II. Perspectives

Plusieurs perspectives sont d'ores et déjà envisagées pour la suite de ce travail à savoir la conception et le développement d'Interfaces Homme-Machine (IHM) ergonomiques destinées au personnel médical ainsi qu'aux patients facilitant l'utilisation de l'outil que nous avons développé et ainsi pouvoir déployer « PILPAP » en milieu réel.

Nous pouvons utiliser ces interfaces afin de recueillir les informations qui nous seront utiles pour la pérennité de « PILPAP ».

Le déploiement de la solution nous sera d'une grande utilité pour affiner les stratégies de re-planification adoptées. En effet, nous pouvons avoir un retour d'expérience des patients externes en termes d'acceptation et de refus des modifications de rendez-vous et de timeout fixé. Ainsi, nous pouvons réadapter nos stratégies pour répondre au mieux aux attentes des patients.

De plus, nous envisageons de développer les couches inférieures de pilotage des différents services médicaux, comme les urgences et le bloc opératoire, et d'appui, comme l'hôtellerie.

Ce présent travail peut être réadapté pour traiter d'autres problématiques liées à l'hospitalisation à domicile vu qu'il s'agit d'un système ouvert et modulaire. Des travaux de recherches s'intéressent au secteur médico-social notamment l'aide aux personnes notamment la gestion des repas préparés et livrés à domicile, les soins à domicile et la gestion du transport des personnes en situation de handicap.

Une autre piste de recherche s'ouvre à l'issue de ces travaux qui est l'application des techniques de l'exploitation des données pour améliorer la prise de décision au niveau stratégique en identifiant et en comprenant mieux les parcours des patients. En effet, les techniques de data mining (Berry & Linoff, 1997) sont de plus en plus utilisées en marketing afin de modéliser le comportement des clients ou bien identifier des groupes de personnes qui ont le même comportement pour une campagne de prospection ciblée et efficace. À cet instar, ces techniques ont été utilisées dans le domaine hospitalier pour évaluer l'efficacité d'un

traitement par exemple, ou d'améliorer la relation avec les patients ou encore la détection des fraudes (Koh & Tan, 2011).

Annexe 1 : Modélisation UML

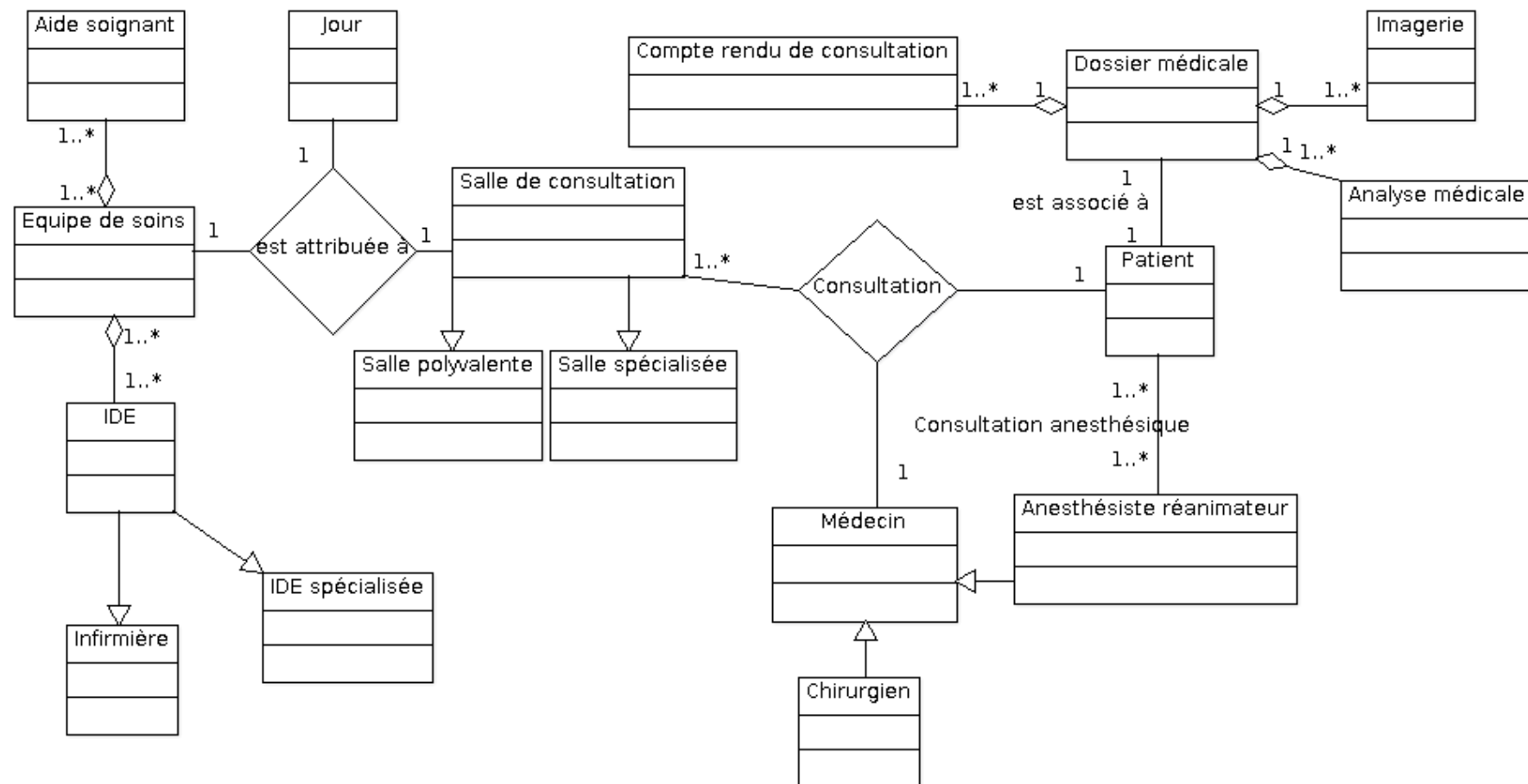


Figure 28 : Diagramme de classes : Consultation

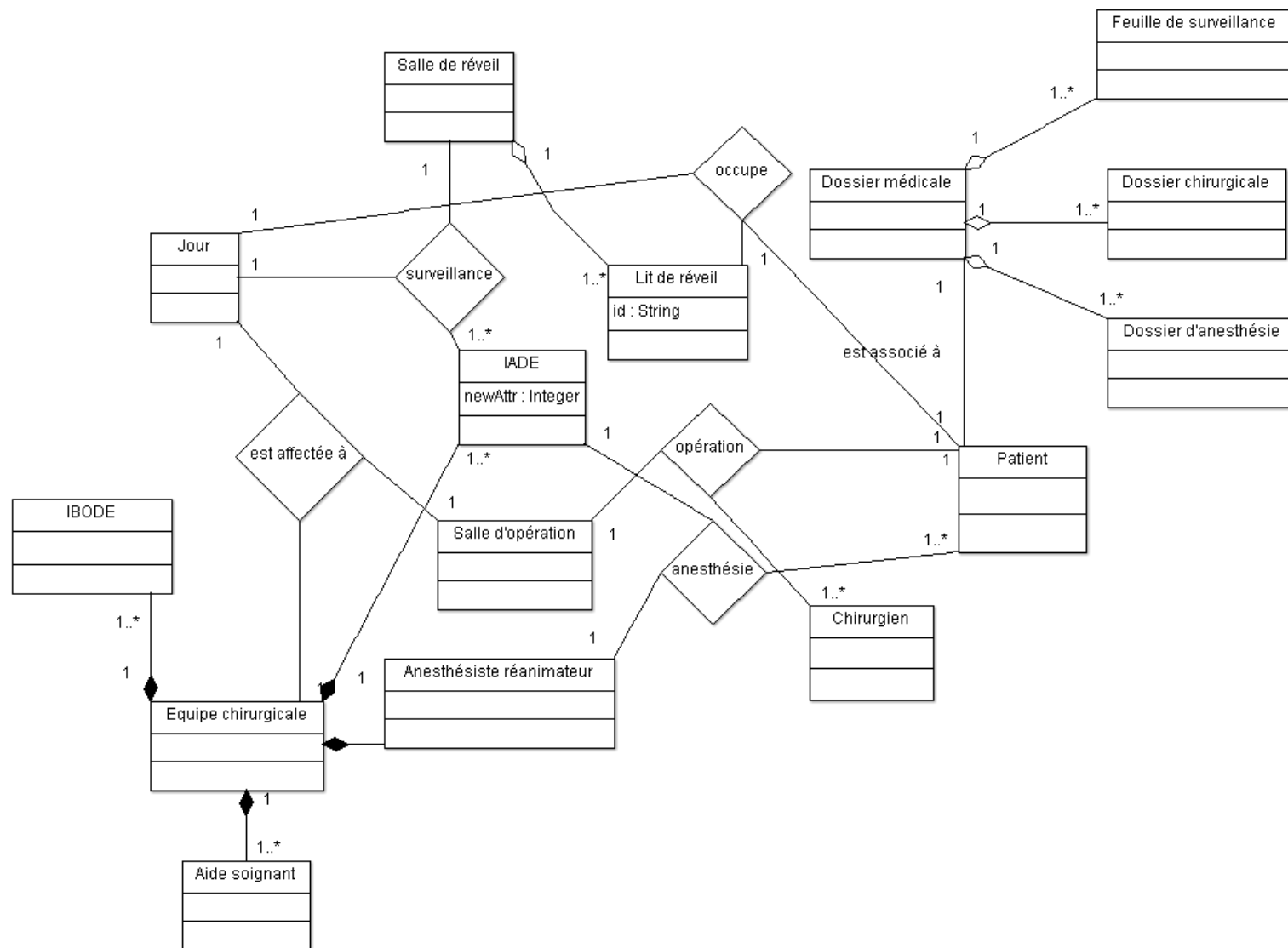


Figure 29 : Diagramme de classes : Chirurgie

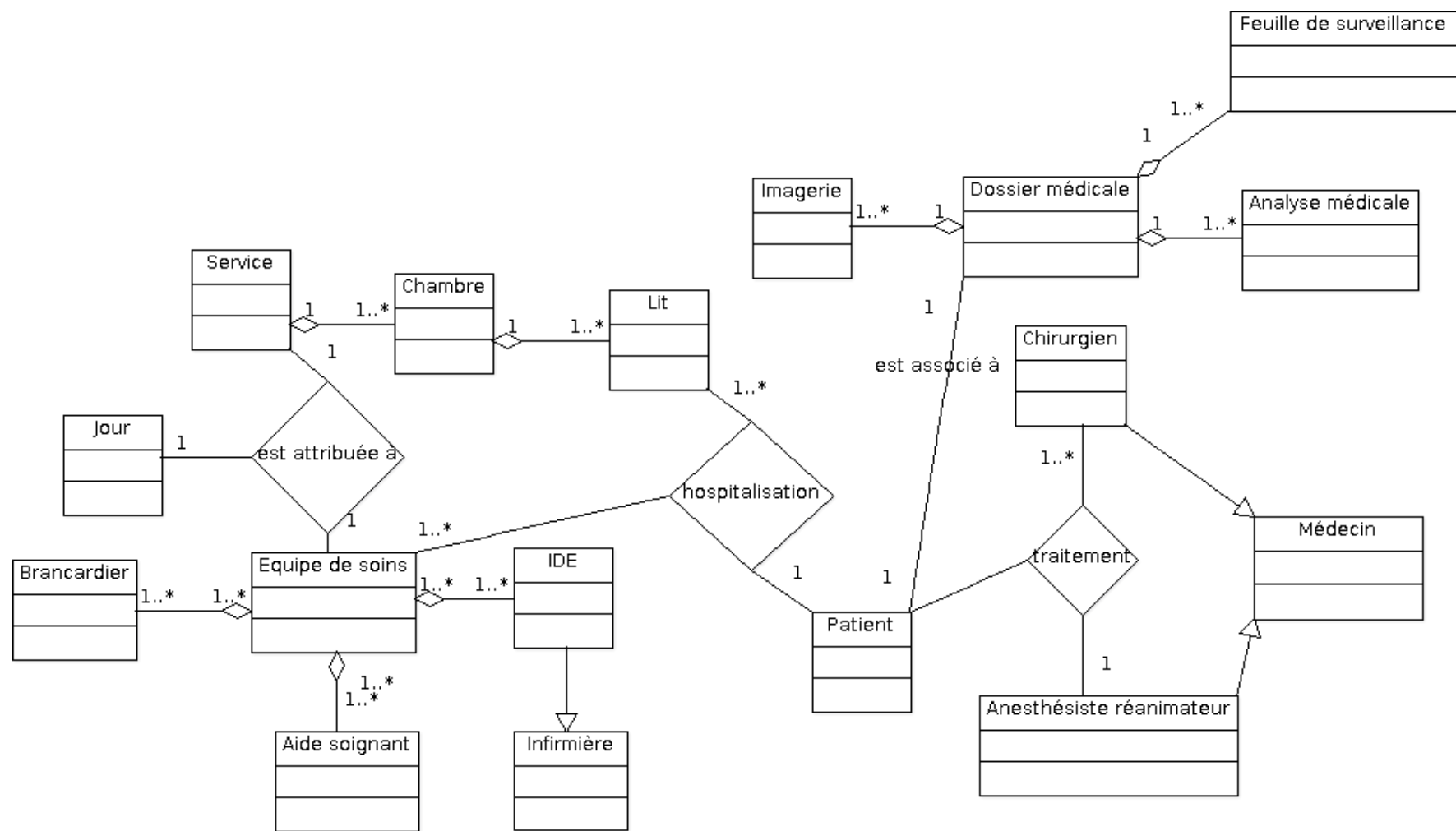


Figure 30 : Diagramme de classe : Hospitalisation

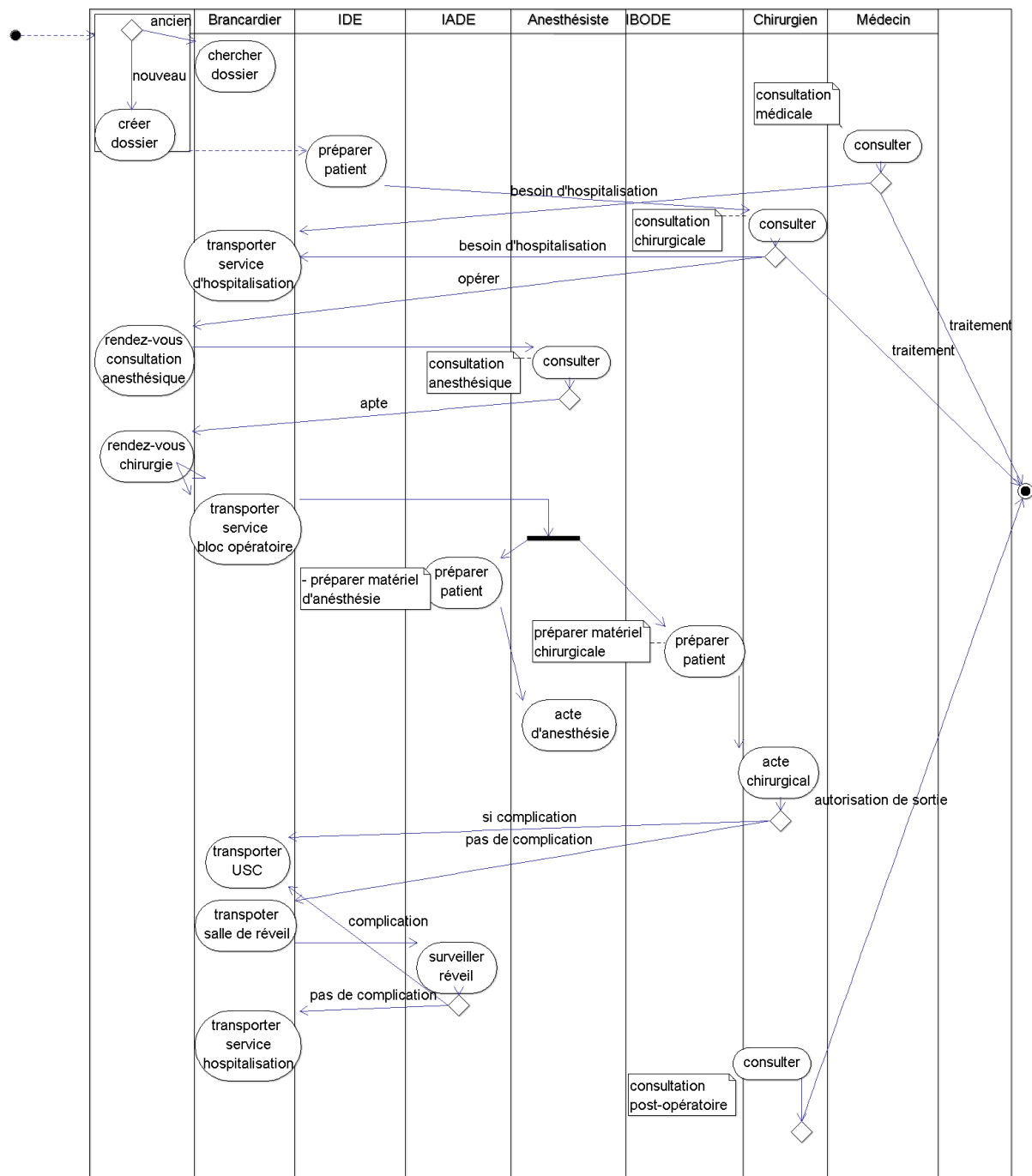


Figure 31 : Diagramme d'activité général

Annexe 2 : Données

	ipp character varying(255)	type character varying(255)	nom character varying(255)	sex character varying(255)	age character varying(255)	adresse character varying(255)	tel character varying(100)	login text	pass character varying(255)	urgence character varying(255)	prs character varying[]
1	BS539652	hospitalisé(e)	Joelle Bond	femme	01-04-49	9937 Quis Road	08 73 86 78 95	#ROW2	PW5154	3	{cardio_2}
2	JC598634	hospitalisé(e)	Tamara Irwin	homme	26-06-65	2113 Ullamcorper Avenue	05 78 13 47 66	#ROW2	ZC7691	1	{cardio_3}
3	HF332006	hospitalisé(e)	Mia Burris	homme	04-09-23	Ap #797-5188 Ante Rd.	05 11 99 84 29	#ROW2	JY3159	2	{cardio_3}
4	NT865511	hospitalisé(e)	Quincy Pearson	homme	23-08-05	504-1944 Etiam Road	01 98 65 80 47	#ROW2	BY4031	1	{cardio_2}
5	XQ143402	hospitalisé(e)	Giselle Gilmore	femme	20-09-09	920-197 Urna. St.	01 75 24 20 43	#ROW2	PF2750	1	{cardio_2}
6	RT896182	hospitalisé(e)	Kendall Welch	homme	24-01-77	169-6530 Donec Ave	06 27 58 98 09	#ROW2	VL8077	2	{cardio_3}
7	MA016696	hospitalisé(e)	Evelyn Stein	femme	18-12-52	P.O. Box 961, 3957 Ac Av.	02 89 65 17 89	#ROW2	IA2341	3	{cardio_2}
8	CZ337721	hospitalisé(e)	Irma Marsh	femme	24-03-02	914-7731 Vulputate, Street	05 09 85 92 73	#ROW2	BI5262	3	{cardio_2}
9	DR512298	hospitalisé(e)	Hanna Burt	homme	30-07-81	Ap #458-4953 Tincidunt Ave	07 89 00 02 79	#ROW2	YV3301	2	{cardio_3}
10	TS081940	hospitalisé(e)	Darrel Espinoza	femme	15-10-31	3808 Vulputate, St.	06 08 09 80 10	#ROW2	DK0181	3	{cardio_1}
11	QB181062	hospitalisé(e)	Gemma Elliott	femme	10-07-92	Ap #209-8203 Lorem Street	09 79 04 66 97	#ROW2	HT1820	3	{cardio_3}
12	LJ141313	hospitalisé(e)	Tamekah Cherry	homme	05-02-73	Ap #118-7913 Neque. Road	03 53 06 11 40	#ROW2	RS1780	3	{cardio_1}
13	NY362567	hospitalisé(e)	Gemma English	femme	03-10-53	P.O. Box 692, 2896 Commodo Road	07 01 53 36 01	#ROW2	KY3997	1	{cardio_3}
14	YD632342	hospitalisé(e)	Tanya Walsh	homme	13-08-05	783-1928 Sed Rd.	07 88 46 10 99	#ROW2	OT6642	1	{cardio_1}
15	RT841915	hospitalisé(e)	Lois Bryan	homme	19-03-01	Ap #439-4457 Pede St.	08 25 27 41 65	#ROW2	KP3026	3	{cardio_1}
16	ZH095074	hospitalisé(e)	Zenaida Sexton	homme	13-06-78	549-5639 Quis Street	09 79 04 57 88	#ROW2	IT2581	1	{cardio_2}
17	FB218292	hospitalisé(e)	Halee Hickman	femme	23-02-84	Ap #620-3427 Morbi Street	09 39 33 90 31	#ROW2	NL4611	3	{cardio_1}
18	HX496311	hospitalisé(e)	Liberty Marquez	femme	18-07-64	Ap #508-5196 At, Avenue	05 10 14 77 78	#ROW2	BO2638	2	{cardio_1}
19	TO785410	hospitalisé(e)	Jemima Goodwin	homme	07-12-38	4003 Ornare, Street	06 67 30 71 77	#ROW2	QI8195	1	{cardio_2}
20	SM592785	hospitalisé(e)	Keiko Snow	homme	01-03-62	136-8421 Nisi St.	03 37 15 54 98	#ROW2	WN8507	3	{cardio_1}
21	IH345346	hospitalisé(e)	Jeanette Middleton	homme	26-02-60	P.O. Box 432, 5884 Elementum Road	05 89 48 21 08	#ROW2	YS5234	1	{cardio_3}
22	CK281733	hospitalisé(e)	Mari Chen	femme	04-07-23	228-6456 Vitae, Road	08 22 66 12 64	#ROW2	BO5196	3	{cardio_2}
23	WX784877	hospitalisé(e)	Imelda Holder	homme	20-02-09	Ap #406-4801 Per Rd.	09 17 05 55 63	#ROW2	IZ0286	1	{cardio_2}
24	HD642382	hospitalisé(e)	Nita Atkinson	homme	16-10-69	P.O. Box 282, 3723 Lorem St.	03 70 31 00 78	#ROW2	GT1199	3	{cardio_3}
25	BJ769757	hospitalisé(e)	Shelly Patterson	femme	22-10-09	2295 Pretium St.	05 18 61 09 15	#ROW2	QA6776	1	{cardio_2}
26	CO353330	hospitalisé(e)	Sophia Sims	homme	12-05-06	P.O. Box 542, 7675 Nec St.	01 31 70 63 53	#ROW2	WC1415	3	{cardio_3}
27	EM635645	hospitalisé(e)	Giselle Hardin	homme	19-07-81	8503 Class Rd.	06 82 34 19 19	#ROW2	PQ7183	3	{cardio_2}
28	MO827858	hospitalisé(e)	Cassandra Simmons	homme	03-07-01	P.O. Box 459, 7583 Donec Av.	03 89 92 02 77	#ROW2	WQ4976	1	{cardio_3}

Figure 32 : Table Patient

	id integer	type character varying	nom character varying	duree_travail double precision	dispo json	id_service integer
1	17001	IDE	BECKER Joëlle	80	{"07-01-2013":"11:00-19:00","08-01-2013":"","09-01-2013":"8:30-16:00","10-01-2013":"","11-01-2013":"9:17	
2	17002	IDE	MARTINY Sylvie	80	{"07-01-2013":"8:00-16:00","08-01-2013":"8:00-14:00","09-01-2013":"9:00-18:00","10-01-2013":"","11-01-2013":17	
3	17003	IDE	SEMECAS Marlyse	50	{"07-01-2013":"","08-01-2013":"9:00-18:00","09-01-2013":"","10-01-2013":"8:00-16:00","11-01-2013":"8:0017	
4	17004	IDE	NOWAK Isabelle	80	{"07-01-2013":"8:00-16:00","08-01-2013":"9:00-18:00","09-01-2013":"11:00-19:00","10-01-2013":"8:00-14:017	
5	17005	IDE	BOUR Cathy	60	{"07-01-2013":"11:00-19:00","08-01-2013":"","09-01-2013":"9:00-18:00","10-01-2013":"8:00-16:00","11-01-17	
6	17006	IDE	STEINER Cath	80	{"07-01-2013":"9:30-18:30","08-01-2013":"","09-01-2013":"8:00-16:00","10-01-2013":"8:00-14:00","11-01-217	
7	17007	IDE	FREY Isabelle	80	{"07-01-2013":"","08-01-2013":"8:00-14:00","09-01-2013":"","10-01-2013":"","11-01-2013":"8:00-16:00","117	
8	17008	IDE	BECK Patricia	80	{"07-01-2013":"9:00-18:00","08-01-2013":"11:00-19:00","09-01-2013":"9:00-18:00","10-01-2013":"8:00-14:017	
9	17009	IDE	BECK Brigitte	80	{"07-01-2013":"8:00-16:00","08-01-2013":"","09-01-2013":"11:00-19:00","10-01-2013":"9:00-17:00","11-01-17	
10	17010	IDE	DERR-BIRKENSTOCK	80	{"07-01-2013":"9:00-18:00","08-01-2013":"9:30-18:30","09-01-2013":"","10-01-2013":"9:00-17:00","11-01-217	
11	17011	IDE	RIMLINGER	50	{"07-01-2013":"11:00-19:00","08-01-2013":"","09-01-2013":"8:30-16:00","10-01-2013":"","11-01-2013":"9:17	
12	18001	Brancardier	Randall Crawford	80	{"07-01-2013":"11:00-19:00","08-01-2013":"","09-01-2013":"8:30-16:00","10-01-2013":"","11-01-2013":"9:18	
13	18002	Brancardier	Lars Kent	80	{"07-01-2013":"8:00-16:00","08-01-2013":"8:00-14:00","09-01-2013":"9:00-18:00","10-01-2013":"","11-01-218	
14	18003	Brancardier	SEMECAS Marlyse	50	{"07-01-2013":"","08-01-2013":"9:00-18:00","09-01-2013":"","10-01-2013":"8:00-16:00","11-01-2013":"8:0018	
15	18004	Brancardier	Kato Skinner	80	{"07-01-2013":"8:00-16:00","08-01-2013":"9:00-18:00","09-01-2013":"11:00-19:00","10-01-2013":"8:00-14:018	
16	18005	Brancardier	Jerome Leon	60	{"07-01-2013":"11:00-19:00","08-01-2013":"","09-01-2013":"9:00-18:00","10-01-2013":"8:00-16:00","11-01-18	
17	18006	Brancardier	Byron Morse	80	{"07-01-2013":"9:30-18:30","08-01-2013":"","09-01-2013":"8:00-16:00","10-01-2013":"8:00-14:00","11-01-218	
18	18007	Brancardier	Colby Sellers	80	{"07-01-2013":"","08-01-2013":"8:00-14:00","09-01-2013":"","10-01-2013":"","11-01-2013":"8:00-16:00","118	
19	18008	Brancardier	Xander Everett	80	{"07-01-2013":"9:00-18:00","08-01-2013":"11:00-19:00","09-01-2013":"9:00-18:00","10-01-2013":"8:00-14:018	
20	18009	Brancardier	Ralph Cox	80	{"07-01-2013":"8:00-16:00","08-01-2013":"","09-01-2013":"11:00-19:00","10-01-2013":"9:00-17:00","11-01-18	
21	18010	Brancardier	Steel Atkinson	80	{"07-01-2013":"9:00-18:00","08-01-2013":"9:30-18:30","09-01-2013":"","10-01-2013":"9:00-17:00","11-01-218	
22	18011	Brancardier	Dillon Ramirez	50	{"07-01-2013":"11:00-19:00","08-01-2013":"","09-01-2013":"8:30-16:00","10-01-2013":"","11-01-2013":"9:18	
23	80001	IBODE	Duncan Nielsen	80	{"07-01-2013":"11:00-19:00","08-01-2013":"","09-01-2013":"8:30-16:00","10-01-2013":"","11-01-2013":"9:80	
24	80002	IBODE	Sawyer Torres	80	{"07-01-2013":"11:00-19:00","08-01-2013":"","09-01-2013":"8:30-16:00","10-01-2013":"","11-01-2013":"9:80	
25	80013	IBODE	Bert McCarthy	80	{"07-01-2013":"8:00-16:00","08-01-2013":"8:00-14:00","09-01-2013":"9:00-18:00","10-01-2013":"","11-01-280	
26	80003	IBODE	Rogan Cross	50	{"07-01-2013":"","08-01-2013":"9:00-18:00","09-01-2013":"","10-01-2013":"8:00-16:00","11-01-2013":"8:0080	
27	80004	IBODE	Rahim Barber	80	{"07-01-2013":"8:00-16:00","08-01-2013":"9:00-18:00","09-01-2013":"11:00-19:00","10-01-2013":"8:00-14:080	

Figure 33 : Table Acteur

	code character varying	lib character varying	tarif real	service character varying	acteurs_requis character varying[]	ressources_requises character varying[]	dur integer
1	DKRP004	épreuve effort +ECG discontinue	158	CARDIOLOGIE - CONS	{Cardiologue}	{"Salle d'Echographie cardiaque"}	10
2	HGQD002	Exploration de la lumière de l'intestin grêle par vidéocapsule ingérée	34	GASTRO-ENTEROLOGIE - CONS	{Gastro-Enterologue}	{"Salle endoscopie digestive"}	25
3	VDE	Forfait vidéocapsule	37	GASTRO-ENTEROLOGIE - CONS	{Gastro-Enterologue}	{"Salle endoscopie digestive"}	20
4	JDQD001	Cystomanométrie par cathétérisme urétral, avec profilométrie urétrale	262	UROLOGIE - CONS	{"Chirurgien Urologue"}	{"Salle bilan urodynamique"}	30
5	DEMP002	Contrôle et réglage transcutané secondaires d'un stimulateur cardiaque	25	CARDIOLOGIE - CONS	{Cardiologue}	{"Salle d'Echographie cardiaque"}	10
6	IVVP01	Injection IM	45	PEDIATRIE - CONS	{"IDE Plateau technique"}	{"Salle de petites chirurgies"}	15
7	DZQM006	Échographie-doppler transthoracique du coeur et des vaisseaux intrathoraciques	205	CARDIOLOGIE - CONS	{Cardiologue}	{"Salle d'Echographie cardiaque"}	25
8	JRQP001	Débitmétrie mictionnelle	42	UROLOGIE - CONS	{"Chirurgien Urologue"}	{"Salle bilan urodynamique"}	25
9	JDQE003	Urétrocystoscopie à l'endoscope rigide	255	UROLOGIE - CONS	{"Chirurgien Urologue"}	{"Salle bilan urodynamique"}	25
10	JDQE001	Fibroskopie urétrovésicale	170	UROLOGIE - CONS	{"Chirurgien Urologue"}	{"Salle bilan urodynamique"}	30
11	C2	AVIS PONCTUEL DE CONSULTANT	41	ANESTHESIE - CONS	{"Anesthésiste Réanimateur"}	{"Salle de consultation"}	25
12	AMI1,5	acte Infirmier pour le prélèvement sanguin	131	ANESTHESIE - CONS	{Infirmier}	{"Salle de consultation"}	10
13	DEQP003	Électrocardiographie sur au moins 12 dérivation	64	ANESTHESIE - CONS	{"Anesthésiste Réanimateur"}	{"Salle de consultation"}	10
14	AAQP007	EEG sur 8dériv. +enreg. 1durée minimale 20mn	76	PNEUMOLOGIE - EF	{Neurologue}	{"Salle d'Epreuve d'Effort"}	20
15	GLQP002	mesure EFR pléthymo.	172	PNEUMOLOGIE - CONS	{Pneumologue}	{"Salle d'Epreuve d'Effort"}	20
16	CSP	Consultation Spécialiste Pédiatrie	213	PEDIATRIE - CONS	{Pédiatre}	{"Salle de consultation"}	25
17	IVVP06	Prélèvement par ponction veineuse directe chez un enfant < 5 ans	146	PEDIATRIE - CONS	{"IDE Plateau technique"}	{"Salle de petites chirurgies"}	30
18	ALQP006	Test d'évaluation d'un déficit cognitif	129	MED POLY - CONS	{Géiatre}	{"Salle de consultation"}	10
19	ALQP003	Test d'évaluation d'une dépression	269	MED POLY - CONS	{Géiatre}	{"Salle de consultation"}	25
20	GLQP008	mesure CV lente +expiration forcée +gazométrie sang. art.	142	PNEUMOLOGIE - CONS	{Pneumologue}	{"Salle d'Epreuve d'Effort"}	15
21	IVVP07	Prélèvement par ponction veineuse directe chez un enfant >= 5ans	265	PEDIATRIE - CONS	{"IDE Plateau technique"}	{"Salle de petites chirurgies"}	10
22	DEQP005	ECG sur au moins 2dériv. +enreg. continu pdt au moins/24h	281	CARDIOLOGIE - CONS	{Cardiologue}	{"Salle d'Epreuve d'Effort"}	15
23	MZMP001	Confection d'une contention souple d'une articulation du membre supérieur	106	CHIR DE SPECIALITE - HEBERG.	{"Chirurgie orthopédique et trau"}	{"Salle de plâtre"}	15
24	QZJA012	parage +/- suture prof. 3-10cm gd axe sf face +main	174	CHIR DE SPECIALITE - HEBERG.	{"Chirurgie orthopédique et trau"}	{"Salle de plâtre"}	15
25	HAF015	exérèse lés. bouche/oropharynx <2cm ab. bucc.	195	ORL - CONS	{Médecin ORL}	{"Salle ORL"}	10

Figure 34 : Table Activités de soins

	id [PK] serial	date character varying	ipp character varying	id_acteur integer[]	id_ressource integer[]	service character varying	dur real	id_acte character varying
1	52901	07-01-2013#9:15	BS539652	{2005}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
2	52902	07-01-2013#10:00	BS539652	{2005}	{2001}	CARDIOLOGIE - CONS	15	DEQP005
3	52903	08-01-2013#14:15	BS539652	{2001}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
4	52904	08-01-2013#14:30	BS539652	{2001}	{2001}	CARDIOLOGIE - CONS	15	DEQP005
5	52905	07-01-2013#9:15	JC598634	{2005}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
6	52906	07-01-2013#9:50	JC598634	{2006}	{2001}	CARDIOLOGIE - CONS	10	EDQM001
7	52907	11-01-2013#8:00	JC598634	{2002}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
8	52908	08-01-2013#10:15	JC598634	{2006}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
9	52909	08-01-2013#10:25	JC598634	{2006}	{2001}	CARDIOLOGIE - CONS	10	EDQM001
10	52910	14-01-2013#9:15	JC598634	{2005}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
11	52911	07-01-2013#13:15	HF332006	{2004}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
12	52912	07-01-2013#13:50	HF332006	{2004}	{2002}	CARDIOLOGIE - CONS	10	EDQM001
13	52913	11-01-2013#8:15	HF332006	{2002}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
14	52914	08-01-2013#10:40	HF332006	{2006}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
15	52915	08-01-2013#10:50	HF332006	{2006}	{2001}	CARDIOLOGIE - CONS	10	EDQM001
16	52916	14-01-2013#9:15	HF332006	{2006}	{2006}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
17	52917	07-01-2013#14:15	NT865511	{2004}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
18	52918	07-01-2013#15:00	NT865511	{2004}	{2002}	CARDIOLOGIE - CONS	15	DEQP005
19	52919	08-01-2013#11:05	NT865511	{2006}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
20	52920	08-01-2013#11:15	NT865511	{2006}	{2001}	CARDIOLOGIE - CONS	10	EDQM001
21	52921	14-01-2013#9:15	NT865511	{2005}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
22	52922	07-01-2013#14:45	XQ143402	{2004}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
23	52923	07-01-2013#15:00	XQ143402	{2004}	{2002}	CARDIOLOGIE - CONS	15	DEQP005
24	52924	08-01-2013#11:30	XQ143402	{2006}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
25	52925	08-01-2013#11:40	XQ143402	{2006}	{2001}	CARDIOLOGIE - CONS	10	EDQM001
26	52926	14-01-2013#9:15	XQ143402	{2006}	{2006}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
27	52927	07-01-2013#15:15	RT896182	{2004}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
28	52928	07-01-2013#15:40	RT896182	{2004}	{2002}	CARDIOLOGIE - CONS	10	EDQM001
29	52929	11-01-2013#8:30	RT896182	{2002}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC
30	52930	08-01-2013#11:55	RT896182	{2006}	{2005}	CARDIOLOGIE - CONS	15	CSC

Figure 35 : Table Planification

Annexe 3 : Recuit simulé

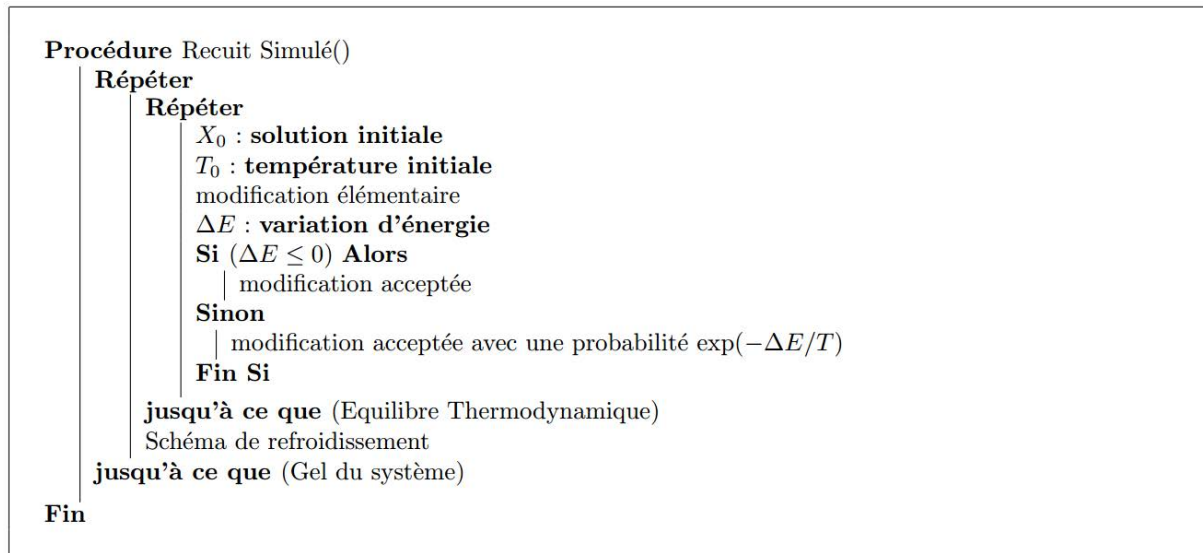
1. Généralités

L'algorithme de recuit simulé est inspiré d'un processus métallurgique. L'objectif est d'améliorer la structure du métal. Pour ce, ce dernier est réchauffé, tout d'abord, à une température suffisante pour éliminer les tensions internes causées par la déformation, puis il est refroidi lentement. En conséquence, le système est figé dans une structure d'énergie minimale grâce au réchauffement lent. En se basant sur ce processus, Metropolis et *al.*, (Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth, Teller, & Teller, 1953) ont établi un algorithme qui simule l'évolution du système physique vers son équilibre thermodynamique à une température donnée T .

(Brooks & Morgan, 1995) ont adapté cet algorithme pour la résolution d'un problème d'optimisation combinatoire. Les auteurs ont établi une analogie entre l'état des particules et les solutions et entre l'état de l'énergie et le coût. Le recuit simulé s'appuie alors sur l'algorithme de Metropolis-Hastings pour décrire l'évolution d'un système thermodynamique et sur la statistique de Boltzmann pour décrire les phénomènes physiques et quantiques.

L'algorithme de recuit simulé permet de trouver un optimum, en partant d'une solution (ou état) initiale, notée X_0 , par exploration de l'espace de recherche en choisissant une solution (ou état) voisine, notée X^* , dans le voisinage de la solution courante $V(X)$. Pour chaque solution X correspond une énergie $f(X)$ exprimée en fonction des critères à optimiser. Notons $f(X)$ et $f(X^*)$ l'énergie respective des états X et X^* . La transition vers l'état X^* est acceptée si $f(X)$ est supérieure (ou inférieure) à $f(X^*)$. Dans le cas échéant, la transition est acceptée avec une probabilité $= e^{-(f(X^*)-f(X))/T}$, appelée règle d'acceptation de Metropolis. La probabilité d'acceptation d'une solution permet alors à l'algorithme d'admettre des solutions défavorables afin de sortir d'éventuel optimum local. Sa valeur est d'autant plus grande que la température est élevée. La température varie au cours de la recherche selon un *schéma de refroidissement* (T est élevée au départ, puis diminue jusqu'à tendre vers 0). Dans le recuit simulé standard, la température décroît par paliers. Le recuit simulé est alors un algorithme stochastique et itératif.

Le schéma général de l'algorithme de recuit simulé est présenté dans Algorithme 1 :



Algorithme 1 : Schéma général de l'algorithme de recuit simulé

Le recuit simulé est une méthode qui a montré son efficacité pour résoudre des problèmes d'optimisation difficile grâce à son implémentation simple et ses propriétés de convergence. Cependant, la difficulté réside dans la définition de l'ensemble de ses paramètres (solution initiale, fonction de voisinage, schéma de refroidissement, et le critère d'arrêt).

2. Paramètres

La mise en œuvre du recuit simulé nécessite également de choisir une approche pour varier la température. Deux approches sont considérées dans la littérature :

- Par paliers

Dans ce type d'approches, la température est gardée constante jusqu'à ce que le système atteigne un équilibre statique pour la diminuer à l'itération suivante. Nous parlons dans ce cas de paliers de température.

- Continue

La température décroît d'une façon continue d'une itération à l'autre dans cette approche. Nous avons adopté la première approche pour varier la température. Le modèle de décroissance est basé sur une suite géométrique.

$$t_{i+1} = k \times t_i$$

Afin d'atteindre le gel du système, la température doit converger vers 0. Il suffit alors que la raison de cette suite géométrique k soit comprise entre 0 et 1 pour qu'elle tende vers 0

Dans le recuit simulé par palier, deux paramètres clés sont à déterminer : la température initiale T_0 et l'équilibre statique. Le premier paramètre fixe le pourcentage d'acceptation initial, alors que le deuxième détermine le moment de changement de palier, c'est-à-dire, le moment de changer la température. Généralement, ils sont déterminés empiriquement.

Le choix de la température initiale est très important. La valeur de T_0 doit être suffisamment grande pour accepter de mauvaises solutions et par conséquent élargir l'espace de recherche et sortir éventuellement d'un optimum local. Cependant, le choix d'une très grande valeur pour la température initiale risque d'augmenter considérablement le temps de calcul. Nous distinguons dans la littérature plusieurs approches pour le calcul de T_0 . Les plus répandues sont les propositions de (Kirkpatrick & Vecchi, 1983) et de (Johnson, Aragon, McGeoch, & Schevon, 1989).

À chaque itération, une nouvelle solution est obtenue par la fonction de voisinage décrite ci-dessus. Soit celle-ci optimise le critère d'optimisation, soit elle le dégrade avec une variation de l'énergie Δ_E . Si cette variation améliore la fonction objectif, la solution est systématiquement acceptée. Dans le cas échéant, elle a une probabilité p d'être acceptée. Cette probabilité d'acceptation d'une solution dégradante dépend de la variation de l'énergie (ou fonction objectif) et du degré d'avancement de l'exécution (ou température du système T). La loi de probabilité p est dictée par la distribution de Boltzmann.

$$p = \begin{cases} 1 & \text{si } \Delta_E \leq 0 \\ e^{\Delta_E/T} & \text{si } \Delta_E > 0 \end{cases}$$

En effet, le choix d'une « mauvaise » solution permet d'explorer l'espace de solutions et d'éviter un optimum local.

À chaque itération, une nouvelle solution est obtenue par la fonction de voisinage décrite ci-dessus. Soit celle-ci optimise le critère d'optimisation, soit elle le dégrade avec une variation de l'énergie Δ_E . Si cette variation améliore la fonction objectif, la solution est systématiquement acceptée. Dans le cas échéant, elle a une probabilité p d'être acceptée. Cette probabilité d'acceptation d'une solution dégradante dépend de la variation de l'énergie (ou fonction objectif) et du degré d'avancement de l'exécution (ou température du système T). La loi de probabilité p est dictée par la distribution de Boltzmann.

$$p = \begin{cases} 1 & \text{si } \Delta_E \leq 0 \\ e^{\Delta_E/T} & \text{si } \Delta_E > 0 \end{cases}$$

En effet, le choix d'une « mauvaise » solution permet d'explorer l'espace de solutions et d'éviter un optimum local.

Le processus de recuit simulé prend fin dès que le critère d'arrêt est rempli. Dans la littérature, plusieurs critères d'arrêt ont été utilisés pour implémenter le recuit simulé à savoir : un nombre maximal d'itérations (qui peut être dynamique ou statique), un compteur qui détermine si l'algorithme stagne ne doit pas dépasser un seuil donné, ou bien une température minimale.

Bibliographie

- Aarts, E. H., & Van Laarhoven, P. J. (1985). Statistical cooling: A general approach to combinatorial optimization problems. 4(40), 193-226.
- AFIS. (2015). Association Française d'Ingénierie Système. Consulté le Septembre 2015, sur <https://www.afis.fr/nmis/Pages/Ing%C3%A9nierie%20Syst%C3%A8me/Le%20syst%C3%A8me%20et%20sa%20d%C3%A9finition.aspx>
- Akcali, E., Côté, M. J., & Lin, C. (2006). A network flow approach to optimizing hospital bed capacity decisions. *Health Care Management Science*, 9(4), 391–404.
- Aknine, S., Pinson, S., & Shakun, M. F. (2004). An extended multi-agent negotiation protocol. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 8(1), 5–45.
- Augusto, V., Xie, X., & Perdomo, V. (2010). Operating theatre scheduling with patient recovery in both operating rooms and recovery beds. *Computers & Industrial Engineering*, 58(2), 231–238.
- Austin, J. L. (1975). How to do things with words. *Oxford University Press*.
- Bachouch, R. Ben, Guinet, A., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Gestion des lits mutualisés d'un établissement hospitalier. In *7ème Congrès International de Génie Industriel* (p. Actes--CDROM).
- Bazerman, M. H. (2005). Negotiation, decision making, and conflict management. *Edward Elgar Publishing*, 2005.
- Beliën, J., & Demeulemeester, E. (2007). Building cyclic master surgery schedules with leveled resulting bed occupancy. *European Journal of Operational Research*, 176(2), 1185–1204.
- Beliën, J., Demeulemeester, E., & Cardoen, B. (2009). A decision support system for cyclic master surgery scheduling with multiple objectives. *Journal of Scheduling*, 12(2), 147–161.
- Bellifemine, F., Poggi, A., & Rimassa, G. (1999). JADE A FIPA compliant agent framework. *Proceedings of PAAM*, 99, 97–108.
- Benomrane, S., Ben Ayed, M., & Alimi, A. M. (2013). An agent-based knowledge discovery

- from databases applied in healthcare domain. In *Advanced Logistics and Transport (ICALT), 2013 International Conference on*, 176–180.
- Birge, J. R., & Louveaux, F. (2011). *Introduction to stochastic programming*. Springer Science & Business Media.
- Boldy, D. (1976). A review of the application of mathematical programming to tactical and strategic health and social services problems. *Operational Research Quarterly*, 439–448.
- Boudy, J., Baldinger, J. L., Delavault, F., Muller, M., Farin, I., Andreao, R. V, ... others. (2006). Telemedicine for elderly patient at home. In *Smart Homes and Beyond: ICOST 2006: 4th International Conference on Smart Homes and Health Telematics*, vol. 19, 74.
- Bouguerra, A. (2016). Online assignment strategies for emergent, urgent and work-in-cases surgeries in an operating theatre In *Control, Decision and Information Technologies (CoDIT) , International Conference on*, 438-443. IEEE
- Bouguerra, A., Sauvey, C., & Sauer, N. (2015). Mathematical model for maximizing operating rooms utilization. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 118–123.
- Bouron, M. T. (1992). Structures de communication et d'organisation pour la coopération dans un univers multi-agents. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, *Université Pierre et Marie Curie (Paris VI)*.
- Bousbia, S. & Trentesaux, D. (2002). Self-organization in distributed manufacturing control: state-ofthe-art and future trends. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 5, 6.
- Bozdag, E. (2008). A survey of extensions to the contract net protocol. *Technical report, CiteSeerX-Scientific Literature Digital Library and Search Engine*
- Brailsford, S., & Vissers, J. (2011). OR in healthcare: A European perspective. *European Journal of Operational Research*, 212(2), 223–234.
- Brooks, B. W., & Rose, R. L. (2004). A contextual model of negotiation orientation. *Industrial Marketing Management*, 33(2), 125–133.
- Bussmann, S., & Demazeau, Y. (1994). An agent model combining reactive and cognitive capabilities. In *Intelligent Robots and Systems' 94. 'Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS'94. Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on*,

vol. 3, 2095–2102.

- Bussmann, S., & Muller, J. (1992). A negotiation framework for co-operating agents. *Proceedings of CKBS-SIG*, 1–17.
- Campbell, W. B., Lee, E. J. K., de Sijpe, K., Gooding, J., & Cooper, M. J. (2002). A 25-year study of emergency surgical admissions. *Annals of the Royal College of Surgeons of England*, 84(4), 273.
- Cervantes, L., Lee, Y.-S., Yang, H., Ko, S., & Lee, J. (2006). Agent-based intelligent decision support for the home healthcare environment. In *Advances in Hybrid Information Technology*, 414–424. Springer.
- Chan, Y.-C. P. (2002). La planification du personnel: acteurs, actions et termes multiples pour une planification opérationnelle des personnes. *Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I*.
- Chen, T.-L., Cheng, S.-H., Liu, C.-H., Fang, T.-Y., Chen, T.-L., & Chen, C.-S. (2010). The study of secure agent-based scheme on health information systems. In *Information Theory and Information Security (ICITIS), 2010 IEEE International Conference on*, 481–484.
- Corchado, J. M., Bajo, J., & Abraham, A. (2008). GerAmi: Improving healthcare delivery in geriatric residences. *Intelligent Systems, IEEE*, 23(2), 19–25.
- Corchado, J. M., Bajo, J., De Paz, Y., & Tapia, D. I. (2008). Intelligent environment for monitoring Alzheimer patients, agent technology for health care. *Decision Support Systems*, 44(2), 382–396.
- Cruz-Correia, R., Vieira-Marques, P., Costa, P., Ferreira, A., Oliveira-Palhares, E., Araújo, F., & Costa-Pereira, A. (2005). Integration of Hospital data using Agent Technologies--a case study. *Ai Communications*, 18(3), 191–200.
- Davenport, A. J., & Beck, J. C. (2000). A survey of techniques for scheduling with uncertainty. *Technical report, IBM and Ilog*.
- Decker, K., & Li, J. (1998). Coordinated hospital patient scheduling. In *Multi Agent Systems, 1998. Proceedings. International Conference on*, 104–111.
- Della Mea, V. (2001). Agents acting and moving in healthcare scenario- a paradigm for

- telemedical collaboration. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 5(1), 10–13.
- Demazeau, Y., & Müller, J.-P. (1990). Decentralized Ai, vol. 2. *Elsevier*.
- Demeester, P., Souffriau, W., De Causmaecker, P., & Berghe, G. Vanden. (2010). A hybrid tabu search algorithm for automatically assigning patients to beds. *Artificial Intelligence in Medicine*, 48(1), 61–70.
- Ducq, Y., Deschamps, J., & Vallespir, B. (2005). Re-engineering d'un système hospitalier par l'utilisation de la méthodologie GRAI. *Journal Européen Des Systèmes Automatisés*, 39(5/6), 605.
- Esmaeili, M., Aryanezhad, M.-B., & Zeephongsekul, P. (2009). A game theory approach in seller--buyer supply chain. *European Journal of Operational Research*, 195(2), 442–448.
- Fei, H., Meskens, N., & Chu, C. (2010). A planning and scheduling problem for an operating theatre using an open scheduling strategy. *Computers & Industrial Engineering*, 58(2), 221–230.
- Ferber, J. (1995). Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective. *Intelligence Artificielle. Interéditions*.
- Ferber, J. (1999). *Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence*. (R. Addison-Wesley, Ed.).
- Ferrin, M. J., Miller, D. M., & Messer, M. G. (2004). Fixing the emergency department: a transformation journey W'rh edsim. In P. of the 2004 W. Simulation (Ed.), *Fixing the emergency department: a transformation journey*.
- Finin, T., Fritzson, R., McKay, D., & McEntire, R. (1994). KQML as an agent communication language. In *Proceedings of the third international conference on Information and knowledge management*, 456-463.
- FIPA. (2002). FIPA Interaction Protocol Library Specification. *Specification, Foundation for Intelligent Physical Agents*
- González-Vélez, H., Mier, M., Julià-Sapé, M., Arvanitis, T. N., García-Gómez, J. M., Robles, M., ... others. (2009). HealthAgents: distributed multi-agent brain tumor diagnosis and prognosis. *Applied Intelligence*, 30(3), 191–202.

- Gorunescu, F., McClean, S. I., Millard, P. H., & others. (2002). A queueing model for bed-occupancy management and planning of hospitals. *Journal of the Operational Research Society*, 53(1), 19–24.
- Green, L. V., Savin, S., & Wang, B. (2006). Managing Patient Service in a Diagnostic Medical Facility. *Operations Research*, 54(1), 11–25.
- Green, L. V., & Savin, S. (2008). Reducing delays for medical appointments: A queueing approach. *Operations Research*, 56(6), 1526–1538.
- Guessoum, Z. (1998). Dima, une plate-forme multi-agents en smalltalk. *Revue Objet*, 3(4), 393–410.
- Guinet, A., & Chaabane, S. (2003). Operating theatre planning. *International Journal of Production Economics*, 85(1), 69–81.
- Gutknecht, O., Ferber, J., & Michel, F. (2000). MadKit: une architecture de plate-forme multi-agent générique. *Rapport de Recherche*, 61.
- Hassas, S. (2003). Systèmes complexes à base de multi-agents situés. *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches*. University Claude Bernard Lyon.
- Hayes-Roth, B. (1985). A blackboard architecture for controlNo Title. *Artificial Intelligence*, 26(3), 251–321.
- Heine, C., Herrler, R., Petsch, M., & Anhalt, C. (2003). ADAPT: Adaptive Multi-Agent Process Planning and Coordination of Clinical Trials. *AMCIS 2003 Proceedings*, 235.
- Huang, S.-L., & Lin, C.-Y. (2010). The search for potentially interesting products in an e-marketplace: An agent-to-agent argumentation approach. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4468–4478.
- Hudson, D. L., & Cohen, M. E. (2010). Intelligent agents in home healthcare. *Annals of Telecommunications-Annales Des Télécommunications*, 65(9–10), 593–600.
- Hulshof, P. J. H., Boucherie, R. J., Hans, E. W., & Hurink, J. L. (2013). Tactical resource allocation and elective patient admission planning in care processes. *Health Care Management Science*, 16(2), 152–166.
- Hutzschenreuter, A. K., Bosman, P. A. N., Blonk-Altena, I., van Aarle, J., & La Poutré, H. (2008). Agent-based patient admission scheduling in hospitals. In *Proceedings of the 7th*

international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: industrial track, 45–52.

- I. Franchistéguy, J. M. Larrasquet, S. T. (1999). La prise en charge des patients dans les établissements de santé : un exemple type de production de service complexe. In *La prise en charge des patients dans les établissements de santé : un exemple type de production de service complexe*. Montréal, Canada: 3ème congrès de Génie Industriel.
- Iqbal, S., Altaf, W., Aslam, M., Mahmood, W., & Khan, M. U. G. (2016). Application of intelligent agents in health-care: review. *Artificial Intelligence Review*, 1–30.
- Iser, J. H., Denton, B. T., & King, R. E. (2008). Heuristics for balancing operating room and post-anesthesia resources under uncertainty. In *Simulation Conference, 2008. WSC 2008. Winter*, 1601–1608.
- Isern, D., Moreno, A., Sánchez, D., Hajnal, Á., Pedone, G., & Varga, L. Z. (2011). Agent-based execution of personalised home care treatments. *Applied Intelligence*, 34(2), 155–180.
- International Organization for Standards (1986). The Ottawa Report on Reference Models for Manufacturing Standards, *ISO TC184/SC5/WG1 N51*, Version 1.1.
- Jebali, A., Ladet, P., & Alouane, A. H. (2003). Une méthode pour la planification des admissions dans les systèmes hospitaliers. In *4ème Conférence francophone de Modélisation et Simulation MOSIM*, vol. 3, 23–25.
- Jennings, N. R. (1996). Coordination techniques for distributed artificial intelligence. *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, 187–210.
- Jennings, N. R., Sycara, K., & Wooldridge, M. (1998). A roadmap of agent research and development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1(1), 7–38.
- Ji, Y., Shen, F., & Tran, J. (2012). A High Performance Agent-Based System for Reporting Suspected Adverse Drug Reactions. In *Information Technology: New Generations (ITNG), 2012 Ninth International Conference on*, 490–495.
- Jouvin, D. (2003). Délégation de Rôle et Architectures Dynamiques de systèmes Multi-agents conversationnels. *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Lyon 1*.
- Kali, P., & Wallace, S. W. (1994). *Stochastic programming*. Springer.

- Kao, E. P. C. (1974). Modeling the movement of coronary patients within a hospital by semi-Markov processes. *Operations Research*, 22(4), 683–699.
- Kirn, S., Herrler, R., Heine, C., & Krempels, K.-H. (2003). Agent. Hospital-agent-based open framework for clinical applications. In *Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, 2003. WET ICE 2003. Proceedings. Twelfth IEEE International Workshops on*, 36–41.
- Koestler, A, 1967. Ghost in the Machine, *The Danube Edition, Hardcover*.
- Kraus, S., Sycara, K., & Evenchik, A. (1998). Reaching agreements through argumentation: a logical model and implementation. *Artificial Intelligence*, 104(1), 1–69.
- Kremenyuk, V. A., & Faure, G.-O. (1991). *International negotiation: Analysis, approaches, issues*. Jossey-Bass San Francisco.
- Labrou, Y., & Finin, T. (1997). *A Proposal for a new KQML Specification*.
- Lamiri, M., Xie, X., Dolgui, A., & Grimaud, F. (2008). A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1026–1037.
- Laskowski, M., McLeod, R. D., Friesen, M. R., Podaima, B. W., & Alfa, A. S. (2009). Models of emergency departments for reducing patient waiting times. *PloS One*, 4(7), e6127.
- Lavieri, M. S., Regan, S., Puterman, M. L., & Ratner, P. A. (2015). Introduction to the Use of Linear Programming in Strategic Health Human Resource Planning. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.
- Lesser V.R., C. D. D. (1987). distributed Problem Solving. *Encyclopedia of AI*, 26(1), 245–251.
- Lin, C., Jhao, Y., Cheng, S., & Yeh, W. (2012). The intelligent agents in the study of web-based medical information search system. In *Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), 2012 International Conference on*, vol. 5, 1801–1806.
- Lopez, D. M., & Blobel, B. G. M. E. (2009). A development framework for semantically interoperable health information systems. *International Journal of Medical Informatics*, 78(2), 83–103.

- Luenberger, D. G., & Ye, Y. (1984). *Linear and nonlinear programming* (Vol. 2). Springer.
- Makki, S. S., Tweeten, L., & Gleckler, J. (1994). Agricultural trade negotiations as a strategic game. *Agricultural Economics*, 10(1), 71–80.
- Malone, T. W., & Crowston, K. (1994). The interdisciplinary study of coordination. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 26(1), 87–119.
- Marcon, E. (2003). Aide à la décision pour les systèmes hospitaliers: application à la réingénierie et au pilotage des plateaux médico-techniques. *Mémoire D'habilitation à Diriger Des Recherches, Université Jean Monnet de Saint Etienne*.
- Marcon, E. (2004). Dimensionnement des ressources des plateaux médicotéchniques des établissements hospitaliers: Une étude bibliographique et quelques perspectives de recherche. *Journal Européen Des Systèmes Automatisés*, 38(6), 631–656.
- Marcon, E., & Dexter, F. (2006). Impact of surgical sequencing on post anesthesia care unit staffing. *Health Care Management Science*, 9(1), 87–98.
- Marcon, E., Guinet, A., & Tahon, C. (2008). Gestion et performance des systèmes hospitaliers. *Lavoisier, 14 rue de Provigny, F-94236 CACHAN Cedex*
- Mazier, A., Xie, X., & Sarazin, M. (2010). Real-time patients assignment: A method for improving emergency department flow. In *Health Care Management (WHCM), 2010 IEEE Workshop on*, 1–6.
- Meskens, N., Duvivier, D., & Hanset, A. (2013). Multi-objective operating room scheduling considering desiderata of the surgical team. *Decision Support Systems*, 55(2), 650–659.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., & Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The journal of chemical physics*, 21(6), 1087-1092.
- Minar, N., Burkhart, R., Langton, C., Askenazi, M., & Others. (1996). The swarm simulation system: A toolkit for building multi-agent simulations. *Technical report, Swarm Development Group*
- Moreno, A., Bocio, J., & Salou, C. De. (2001). Management of Hospital Teams for Organ Transplants Using Multi-agent Systems. In *Conference on Artificial Intelligence in Medicine in Europe*, 374–383.

- Müller, J. P., & Pischel, M. (1994). An architecture for dynamically interacting agents. *International Journal of Intelligent and Cooperative Information Systems*, 3(1), 25–45.
- Nealon, J., & Moreno, A. (2003). Agent-based applications in health care. In *Applications of software agent technology in the health care domain*, 3–18. Springer.
- Nieto, J. A. F., Gutiérrez, M. E. B., & Lancho, B. P. (2009). Developing home care intelligent environments: from theory to practice. In *7th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS 2009)*, 11–19.
- Pagel, C., Utley, M., & Gallivan, S. (2008). The dynamic forecasting for short to medium term workload based on current case mix. *Operations Research for Health Care Delivery Engineering*.
- Patriarca-Almeida, J. H., Vieira-Marques, P. M., & Cruz-Correia, R. J. (2011). Simulation environment for the optimization of the data retrieval capabilities of an agent based system in a healthcare setting. In *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing*, 124–132. Springer.
- Patrick, J., Puterman, M. L., & Queyranne, M. (2008). Dynamic multipriority patient scheduling for a diagnostic resource. *Operations Research*, 56(6), 1507–1525.
- Paulussen, T. O., Jennings, N. R., Decker, K. S., & Heinzl, a. (2003). Distributed patient scheduling in hospitals. *IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1224–1229.
- Paulussen, T., Zöller, a, & Rothlauf, F. (2006). Agent-based patient scheduling in hospitals. *Multiagent Engineering*, 255-275.
- Pham, D.-N., & Klinkert, A. (2008). Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1011–1025.
- Philip, C., & Hector, L. (1990). Intention Is Choice With Commitment. *Journal of Artificial Intelligence (AI)*, 41(3).
- Rahmat, M. H., Annamalai, M., Halim, S. A., & Ahmad, R. (2013). Agent-based modelling and simulation of emergency department re-triage. In *Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC), 2013 IEEE*, 219–224.
- Ramis, F. J., Palma, J. L., & Baesler, F. F. (2001). The use of simulation for process

- improvement at an ambulatory surgery center. In *Simulation Conference, 2001. Proceedings of the Winter*, vol. 2, 1401–1404.
- Rao, A. S., & Georgeff, M. P. (1995). Formal models and decision procedures for multi-agent systems. *Australian Artificial Intelligence Institute Melbourne*, Australia.
- Rao, S. S. (1987). Game theory approach for multiobjective structural optimization. *Computers & Structures*, 25(1), 119–127.
- Rodier, S. (2008). Dimensionnement du futur Plateau Médico-Technique du NHE: étude de l'existant et démarche prospective. *Rapport Interne*.
- Rodier, S. (2010). 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 Doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II*.
- Rosenschein, J. S. (1986). Rational interaction: cooperation among intelligent agents. *Stanford University*.
- Rosenschein, J. S., & Breese, J. S. (1988). Communication-free interactions among rational agents: A probabilistic approach. *Hebrew University of Jerusalem. Leibniz Center for Research in Computer Science. Institute of Mathematics and Computer Science*.
- Rosenschein, J. S., & Zlotkin, G. (1994). Rules of encounter: designing conventions for automated negotiation among computers. *MIT press*.
- Roussy, G. (2016). Systèmes hospitaliers, Actes du séminaire Contradictions et Dynamique des Organisations - CONDOR - IX, (March).
- Royston, G. (1998). Shifting the balance of health care into the 21st century. *European Journal of Operational Research*, 105(2), 267–276.
- Schmidt, R., Montani, S., Bellazzi, R., Portinale, L., & Gierl, L. (2001). Cased-based reasoning for medical knowledge-based systems. *International Journal of Medical Informatics*, 64(2), 355–367.
- Searle, J. R. (1969). Speech acts: An essay in the philosophy of language. *Cambridge university press*.
- Shirabad, J. S., Wilk, S., Michalowski, W., & Farion, K. (2012). Implementing an integrative multi-agent clinical decision support system with open source software. *Journal of*

- Medical Systems*, 36(1), 123–137.
- Smith, R. G. (1980). The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers*, (12), 1104–1113.
- Smith, R. G., & Davis, R. (1981). Frameworks for cooperation in distributed problem solving. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 11(1), 61–70.
- Sawadogo, M. (2011). Intégration de l'impact environnemental, sociétal et économique du transport intermodal au sein des chaînes logistiques vertes: optimisation multiobjectif par les colonies de fourmis. *Thèse de Doctorat, Université Paul Verlaine de Metz*.
- Stainsby, H., Taboada, M., & Luque, E. (2009). Towards an agent-based simulation of hospital emergency departments. In *Services Computing, 2009. SCC'09. IEEE International Conference on*, 536–539.
- Stuber, A., Hassas, S., & Mille, A. (2005). Language games for meaning negotiation between human and computer agents. In *Engineering Societies in the Agents World VI*, 275–287. Springer.
- Suresh, V., Chaudhuri, D. (1993). Dynamic scheduling—A review. *International Journal of Production Economics*, 32, 53–63.
- Sycara, K. (1989). Multi-agent compromise via negotiation. *Distributed Artificial Intelligence*, 2(1), 119–139.
- Sycara, K. P. (1988). Resolving Goal Conflicts via Negotiation. In *AAAI*, vol. 88, 245–250.
- Sycara, K. P. (1990). Negotiation planning: An AI approach. *European Journal of Operational Research*, 46(2), 216–234.
- Sycara, K. P. (1990). Persuasive argumentation in negotiation. *Theory and Decision*, 28(3), 203–242.
- Thomson, S., Nunez, M., Garfinkel, R., & Dean, M. D. (2009). Efficient short term allocation and reallocation of patients to floor of a hospital during demand surges. *Operations Research*, 57(2).
- Trust, N. P. H. (1955). *Studies in the Functions and Design of Hospitals*. Oxford University Press.
- Querrec R., Tarot S., Chevaillier P. & Tisseau J. (1997). Simulation d'une cellule de

- production. Utilisation d'un modèle à base d'agents contrôlés par réseaux de Petri. *Colloque de recherche doctorale AGIS'97 – Automatique, Génie informatique, Image, Signal*, Angers, 209-214.
- Ury, C. J., Johnson, C. V., & Meldrem, J. A. (1998). Teaching a heuristic approach to information retrieval. *Research Strategies*, 15(1), 39–47.
- Van Brussel H., Wyns J., Valckenaers P., Bongaerts L. & Peeters P. (1998). Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA, *Computers in industry*, Vol. 37, pp. 255-274, 1998.
- Vermeulen, I. B., Bohte, S. M., Elkhuisen, S. G., Lameris, H., Bakker, P. J. M., & La Poutré, H. (2009). Adaptive resource allocation for efficient patient scheduling. *Artificial Intelligence in Medicine*, 46(1), 67–80.
- Visser, J. M. H. (1998). Patient flow-based allocation of inpatient resources: a case study. *European Journal of Operational Research*, 105(2), 356–370.
- Von Martal, F. (1990). Interactions among autonomous planning agents. *Decentralized AI*, 105–119.
- Wang, Q., & Parlar, M. (1989). Static game theory models and their applications in management science. *European Journal of Operational Research*, 42(1), 1–21.
- Wang, T., Guinet, A., Belaidi, A., & Besombes, B. (2009). Modelling and simulation of emergency services with ARIS and Arena. Case study: the emergency department of Saint Joseph and Saint Luc Hospital. *Production Planning and Control*, 20(6), 484–495.
- Wang, T., Guinet, A., & Besombes, B. (2009). A sizing tool for allocation planning of hospital bed resources. In *Intelligent patient Management*, 113–125. Springer.
- Wolters, H., & Schuller, F. (1997). Explaining supplier-buyer partnerships: a dynamic game theory approach. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 3(3), 155–164.
- Zaffalon, L. & Berguet, P. (1995). Programmation concurrente et temps réel avec ADA95. *Collection Informatique, Presse polytechniques et universitaires romandes*.

