



**HAL**  
open science

# Méthodes d'ordonnancement et d'orchestration dynamique des tâches de soins pour optimiser la prise en charge des patients dans les urgences hospitalières

Faten Ajmi

► **To cite this version:**

Faten Ajmi. Méthodes d'ordonnancement et d'orchestration dynamique des tâches de soins pour optimiser la prise en charge des patients dans les urgences hospitalières. Automatique / Robotique. Ecole Centrale de Lille, 2019. Français. NNT : 2019ECLI0009 . tel-02393018

**HAL Id: tel-02393018**

**<https://theses.hal.science/tel-02393018v1>**

Submitted on 4 Dec 2019

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

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

N° d'ordre : 379

CENTRALE LILLE

**THESE**

Présentée en vue  
d'obtenir le grade de

**DOCTEUR**

En

**Spécialité : Automatique, Génie Informatique,  
Traitement du Signal et Image**

Par

**Faten AJMI**

**DOCTORAT DELIVRE PAR CENTRALE LILLE**

Titre de la thèse :

**Méthodes d'ordonnancement et d'orchestration dynamique des tâches de soins pour  
optimiser la prise en charge des patients dans les urgences hospitalières**

**Soutenue le 11 juillet 2019 devant le jury d'examen :**

<b>Président</b>	Mariagrazia DOTOLI	Professeur, DEI-Politenico di Bari, Italie
<b>Rapporteur</b>	Aziz MOUKRIM	Professeur, Centrale de recherche Royallieu, France
<b>Rapporteur</b>	Alassane B.NDIAYE	Professeur, QALINCA-LABS, Belgique
<b>Examineur</b>	Alain QUILLIOT	Professeur, ISIMA, France
<b>Examineur</b>	Jean-Marie RENARD	DR.PH, CERIM-Université de Lille, France
<b>Directeur de thèse</b>	Slim HAMMADI	Professeur, Laboratoire CRIStAL, France
<b>Co-directeur de thèse</b>	Hayfa ZGAYA-BIAU	HDR,MCF, CERIM-Université de Lille, France

Thèse préparée dans le Laboratoire CRIStAL

Ecole Doctorale SPI 072



Cette thèse a été préparée dans le laboratoire CRIStAL au sein de l'établissement Centrale Lille:

**CRIStAL UMR 9189 CNRS**

Université de Lille  
Bâtiment M3 extension  
Avenue Carl Gauss  
59655 Villeneuve d'Ascq Cedex  
France

☎ +33(0)3 28 77 85 41

Site <https://www.cristal.univ-lille.fr/>



**Centrale Lille**

Cité Scientifique – CS 20048 59651 Villeneuve d'Ascq  
Cedex - France

☎ +33 (0) 3 20 33 54 87

Site <https://www.centralelille.fr/>





*A mes chers parents,  
A mon frère et mes sœurs,  
A mon futur époux Amine,  
A toute ma famille,  
A tous ceux et celles qui me sont chers,  
Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon  
incommensurable amour.*



# Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse Monsieur Slim Hammadi, Professeur à l'École Centrale de Lille, et ma codirectrice Madame Hayfa Zgaya-Biau, MCF et H.D.R à l'ILIS de l'Université de Lille 2, de m'avoir soutenue, encouragée et encadrée tout au long de cette thèse et des efforts qu'ils ont consentis et les précieux conseils qu'ils ont prodigués qui ont permis l'aboutissement de ce travail.

Mes plus sincères remerciements s'adressent à Monsieur Aziz Moukrim, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne-Centrale de recherche Royallieu et Monsieur Alassane B.Ndiaye, Professeur à l'École Polytechnique de l'Université libre de Bruxelles d'avoir accepté de rapporter cette thèse. Je les remercie énormément pour le temps consacré à cet effet malgré toutes les responsabilités qu'ils ont.

Je remercie également les autres membres du jury pour avoir accepté d'être les examinateurs de cette thèse ; j'adresse donc des remerciements tout à fait particuliers à Madame Mariagracia DOTOLI, Professeure à Politecnico di Bari. Je remercie autant Monsieur Jean-Marie RENARD, Praticien Hospitalier et Maître de Conférences à l'Université de Lille 2. Je remercie vivement Monsieur Alain Quilliot directeur du LIMOS, Président de la GDR RO et Professeur d'Informatique à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude aux membres du CHRU de Lille, plus particulièrement Messieurs Jean-Marie RENARD et Grégoire SMITH de m'avoir accueillie au sein de cet établissement et de m'avoir fourni des données utiles et des explications précieuses qui m'ont aidée à travailler sur un sujet passionnant.

Enfin, j'exprime toute ma gratitude envers tous ceux qui n'ont pas hésité à m'aider, ainsi que le personnel de l'administration du CRISAL pour leur disponibilité et serviabilité.



# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>vii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des Figures</b>	<b>xiii</b>
<b>Liste des Tableaux</b>	<b>xvii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Les systèmes hospitaliers : des systèmes caractérisés par la tension</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction . . . . .	5
1.2 Le système de soins en France . . . . .	5
1.2.1 Organisation et acteurs institutionnels du système de santé . . . . .	7
1.2.2 Politique budgétaire . . . . .	8
1.2.3 Réglementation et planification . . . . .	9
1.2.4 Les dysfonctionnements liés à l'insuffisance des moyens . . . . .	10
1.2.5 L'évaluation du système hospitalier . . . . .	11
1.3 Les structures des urgences dans le monde et spécifiquement en France . . . . .	12
1.4 Problème majeur : la tension dans les SU . . . . .	14
1.4.1 Définitions de la tension . . . . .	14
1.4.2 Les causes de la tension . . . . .	15
1.4.2.1 Causes internes . . . . .	16
1.4.2.2 Causes externes . . . . .	16
1.5 La contribution de système d'information à la performance du SU . . . . .	17
1.6 La logistique hospitalière . . . . .	18
1.7 Problématique . . . . .	21
1.8 Conclusion . . . . .	22
<b>2 Approches et outils de modélisation et d'optimisation : Etat de l'art en santé</b>	<b>23</b>
2.1 Introduction . . . . .	23
2.2 Méthodes de modélisation . . . . .	23
2.2.1 Modélisation UML (Unified Modelling Language) . . . . .	24
2.2.2 Modélisation Workflow . . . . .	25
2.2.3 Les systèmes Multi-Agents (SMA) . . . . .	26
2.2.3.1 Définitions et concepts . . . . .	26
2.2.3.2 Les systèmes Multi-Agents dans le domaine de la santé . . . . .	29
2.3 Méthodes d'optimisation . . . . .	29
2.3.1 Définitions et concepts . . . . .	29

2.3.1.1	Optimisation mono-objectif . . . . .	31
2.3.1.2	Optimisation multi-objectif . . . . .	31
2.3.2	Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation . . . . .	32
2.3.2.1	Méthodes exactes . . . . .	32
2.3.2.2	Méthodes approchées . . . . .	33
2.3.3	Optimisation en santé . . . . .	36
2.3.3.1	Contraintes liées à la nature des SU . . . . .	37
2.3.3.2	Contraintes liées aux personnels de soin . . . . .	37
2.3.3.3	Facteurs à améliorer pour l'efficacité opérationnelle du SU . . . . .	39
2.3.3.4	L'ordonnancement en temps réel . . . . .	39
2.4	Les indicateurs de performance clés (IPC) . . . . .	40
2.4.1	La durée totale du séjour (DTS) . . . . .	41
2.4.2	Le temps d'attente primaire (TAP) . . . . .	43
2.4.3	Les abandons des SU (ASU) . . . . .	44
2.4.4	La réorientation des ambulances (RA) . . . . .	47
2.4.5	Autres IPC . . . . .	47
2.4.6	Combinaison entre IPC . . . . .	48
2.5	Positionnement . . . . .	49
2.6	Conclusion . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Modélisation du parcours patient au SUA</b> . . . . .	<b>53</b>
3.1	Introduction . . . . .	53
3.2	Les principes généraux du workflow et sa mise en œuvre en santé . . . . .	53
3.2.1	L'utilisation du workflow dans le domaine de la santé . . . . .	54
3.2.2	Les avantages de l'automatisation des processus en santé . . . . .	55
3.2.3	Le schéma classique du workflow . . . . .	56
3.3	Les limites du BPMN . . . . .	58
3.4	Approche collaborative du workflow . . . . .	58
3.5	Les modes d'exécution des workflows collaboratifs en santé . . . . .	59
3.6	Terrain d'expérimentation : le service des urgences adultes (SUA) . . . . .	59
3.6.1	Étude multidimensionnelle . . . . .	61
3.6.2	Système de gestion au SUA . . . . .	63
3.7	Représentation du parcours patient dans le SUA . . . . .	63
3.8	Workflow collaboratif pour modéliser le parcours patient dans le SUA . . . . .	64
3.8.1	L'importance des visites du SUA pour la modélisation . . . . .	64
3.8.2	Le choix de l'outil de la modélisation . . . . .	65
3.8.3	Modélisation du parcours patient du SUA . . . . .	66
3.8.3.1	Modèle global . . . . .	66
3.8.3.2	Les sous-processus . . . . .	69
3.8.3.3	Les modes de transitions entre les tâches . . . . .	71
3.8.3.4	Les connecteurs . . . . .	72
3.9	Le workflow collaboratif à base d'agents . . . . .	72
3.10	Agents coopérant pour l'exécution des instances du workflow collaboratif . . . . .	73
3.11	Les interactions entre les agents pour piloter les instances du workflow collaboratif . . . . .	74
3.12	Les difficultés d'exécution du workflow collaboratif . . . . .	74
3.12.1	Validation de la cohérence globale . . . . .	75
3.12.2	Les états oscillants du workflow . . . . .	75
3.13	Gestion de points de décision du Workflow collaboratif . . . . .	76

3.14 Synthèse . . . . .	76
3.15 Le dynamisme des agents pour le Workflow collaboratif . . . . .	77
3.16 Identification des IPC pertinents suite au modèle workflow . . . . .	77
3.17 Conclusion . . . . .	80
<b>4 Approche d'ordonnancement et d'orchestration dynamique des tâches de soins</b>	<b>81</b>
4.1 Introduction . . . . .	81
4.2 Formulation mathématique du problème d'ordonnancement dans le SUA . . . . .	82
4.2.1 Paramètres et variables de décision . . . . .	82
4.2.2 La fonction objectif . . . . .	83
4.2.3 Les contraintes . . . . .	84
4.3 Environnement d'ordonnancement à horizon glissant . . . . .	85
4.3.1 Hypothèses . . . . .	86
4.3.2 Mesures de performance . . . . .	87
4.4 Processus d'ordonnancement . . . . .	88
4.4.1 Algorithme mémétique d'ordonnancement proposé (AMOR) . . . . .	88
4.4.1.1 Définition du chromosome . . . . .	89
4.4.1.2 Construction de la population initiale . . . . .	89
4.4.1.3 Opérateur de croisement contrôlé . . . . .	91
4.4.1.4 Opérateur de mutation contrôlé . . . . .	92
4.4.1.5 Recherche locale . . . . .	94
4.5 Processus d'orchestration dynamique . . . . .	95
4.5.1 Système multi-agent (Le 2 <sup>e</sup> niveau de l'architecture) . . . . .	95
4.5.2 Le niveau du SUA (Le 3 <sup>e</sup> niveau de l'architecture) . . . . .	98
4.5.3 Les paramètres d'environnement du PWIA . . . . .	99
4.5.4 Calcul en temps réel des indicateurs de performance . . . . .	100
4.5.5 Algorithme d'orchestration dynamique . . . . .	101
4.6 Comportement global du système . . . . .	103
4.6.1 Diagramme de séquence . . . . .	103
4.6.2 Orchestration basée sur des indicateurs de performance . . . . .	103
4.7 Synthèse . . . . .	104
4.8 Conclusion . . . . .	105
<b>5 Simulations et Résultats</b>	<b>107</b>
5.1 Introduction . . . . .	107
5.2 Analyse de la BDDH . . . . .	107
5.2.1 Le flux d'arrivée des patients . . . . .	108
5.2.2 La durée totale de séjours : DTS . . . . .	110
5.2.3 Le temps d'attente . . . . .	112
5.2.4 Le nombre de patients urgents . . . . .	115
5.3 Comparaison des IPC en situation normale et en situation de tension . . . . .	117
5.3.1 Comparaison de la DTS en SN et ST . . . . .	117
5.3.2 Comparaison de la CPM en SN et ST . . . . .	117
5.3.3 Comparaison de ASU en SN et ST . . . . .	118
5.3.4 Comparaison entre ST et SN . . . . .	118
5.4 Synthèse sur l'analyse globale de BDDH . . . . .	119
5.5 Simulations et résultats des approches proposées . . . . .	120
5.5.1 Simulations de l'interférence entre les 3 types de patients . . . . .	120
5.5.2 Résultats et simulations du processus d'ordonnancement . . . . .	124

---

5.5.3	L'implémentation de notre architecture d'orchestration . . . . .	125
5.5.3.1	Le choix de la structure de l'agent . . . . .	125
5.5.3.2	Outils et paramètres . . . . .	127
5.5.4	Résultats et simulations de processus d'orchestration . . . . .	128
5.5.4.1	Scénarii de petites tailles . . . . .	128
5.5.4.2	Scénarii de grandes tailles . . . . .	130
5.6	Conclusion . . . . .	137
	<b>Conclusion générale</b>	<b>139</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>141</b>

# Liste des Figures

1.1	Le système de soins Français : un modèle mixte . . . . .	9
1.2	Mutation de type d'hospitalisation vers l'hospitalisation partielle plutôt que de l'hospitalisation complète [ <i>Les établissements de santé - édition 2017 - Ministère des Solidarités et de la Santé 2018</i> ] . . . . .	11
1.3	Evolution du nombre de passages annuels aux urgences depuis 1996 [ <i>Les établissements de santé - édition 2017 - Ministère des Solidarités et de la Santé 2018</i> ] . . . . .	13
1.4	Les coûts de la logistique hospitalière [G. CHOW, 1994] . . . . .	19
1.5	La logistique hospitalière . . . . .	20
2.1	Interaction de l'agent avec l'environnement [AFOUTNI, 2015] . . . . .	27
2.2	La classification des méthodes d'optimisation générale [COLLETTE et al., 2011] . . . . .	30
2.3	Méthode de Branch and Bound . . . . .	33
2.4	L'encadrement de la solution dans l'algorithme d'approximation . . . . .	34
2.5	Parcours de la prise en charge du patient dans le SUA. . . . .	46
3.1	Processus de gestion du Workflow. . . . .	54
3.2	Exécution du workflow collaboratif . . . . .	60
3.3	La structure du SUA du CHRU de LILLE. . . . .	61
3.4	Parcours patient dans le SUA . . . . .	64
3.5	Formulaire d'accueil du SUA. . . . .	65
3.6	Formulaire Box d'orientation du SUA. . . . .	66
3.7	Modèle global du parcours patient dans le SUA . . . . .	67
3.8	Sous-processus circuit court SUA . . . . .	69
3.9	Sous-processus circuit long SUA. . . . .	70
3.10	Exemple de transitions . . . . .	71
3.11	le parcours patient et sa relation avec les IPC . . . . .	79
4.1	Vérification des contraintes (4.3), (4.4), (4.5) et (4.6) . . . . .	85
4.2	La dynamique du flux patient entre les différents lieux du SUA . . . . .	85
4.3	Environnement d'ordonnancement [f. AJMI et al., 2017] . . . . .	86
4.4	Approche d'ordonnancement . . . . .	89
4.5	Une représentation d'un hypercube à quatre dimensions . . . . .	90
4.6	Affectation hypercube d'une seule tâche . . . . .	90
4.7	Affectation hypercube des tâches séquentielles . . . . .	90
4.8	Affectation hypercube des tâches multi-compétences . . . . .	90
4.9	Exemple de croisement des chromosomes . . . . .	93
4.10	Exemple d'affectation des tâches de soins hypercube en quatre dimensions conformant aux contraintes . . . . .	93

4.11 Mutation . . . . .	94
4.12 L'architecture à trois niveaux proposée . . . . .	96
4.13 Exemple d'instance du workflow avec une tâche en cours . . . . .	98
4.14 Exemple d'une instance du workflow avec une tâche terminée . . . . .	98
4.15 Diagramme de séquence . . . . .	104
5.1 Extrait de la base de données brut 2016-2017 du SUA. . . . .	108
5.2 Variation du nombre de patients en fonction des mois . . . . .	109
5.3 Le nombre d'arrivées de patients par jour . . . . .	109
5.4 Variation de la durée de séjour (moyenne par mois) . . . . .	110
5.5 Ratio du nombre de patients avec (DTS>10) et du nombre des patients total par mois . . . . .	111
5.6 Moyenne de la DTS par jour (Janvier 2017) . . . . .	111
5.7 Moyenne de la DTS par jour de la semaine (janvier 2017) . . . . .	112
5.8 Moyenne de la DTS par rapport à l'heure d'entrée (Janvier 2017) . . . . .	113
5.9 Nombre des patients par jour de la semaine (Janvier 2017) . . . . .	113
5.10 Comparaison des temps de consultation restants moyens par patient et par heure	113
5.11 Comparaison de la durée d'attente primaire par patient et par heure . . . . .	114
5.12 Répartition du temps d'attente primaire restant en fonction du temps de consultation restant (moyenne par patient) Axe des abscisses en heures de consultation restantes Axe des ordonnées en heures d'attente primaire restantes . . . . .	114
5.13 Temps d'attente moyen quand l'attente dépasse 2h au SUA . . . . .	115
5.14 Comparaison entre le flux d'arrivée des patients urgents (1) et les patients non urgents (2) . . . . .	116
5.15 Distribution cumulative de la DTS entre SN et ST . . . . .	117
5.16 L'évolution des CPM en fonction du flux de patients et du temps . . . . .	118
5.17 Distribution cumulative d'ASU entre SN et ST . . . . .	118
5.18 Comparaison du TAC moyen avec et sans notre approche . . . . .	122
5.19 Comparaison de la moyenne de la DTS avec et sans notre approches . . . . .	123
5.20 Gantt sans notre approche . . . . .	123
5.21 Gantt avec phase 1 de notre approche . . . . .	123
5.22 Gantt avec les deux phases de notre approche . . . . .	123
5.23 Gantt sans notre approche expliquant le fonctionnement actuel au SUA lorsqu'un patient vient d'un autre lieu du SUA . . . . .	124
5.24 Gantt avec notre approche expliquant le fonctionnement lorsqu'un patient vient d'un autre lieu du SUA . . . . .	124
5.25 Le temps d'attente en fonction du nombre de patients . . . . .	126
5.26 La charge de travail du personnel médical en fonction des instances . . . . .	127
5.27 La plate-forme multi-agents et les outils utilisés . . . . .	128
5.28 Le parcours patient . . . . .	129
5.29 $PWIA_1^0$ . . . . .	130
5.30 $PWIA_2^0$ . . . . .	130
5.31 $PWIA_1^{10}$ . . . . .	131
5.32 $PWIA_2^{10}$ . . . . .	131
5.33 $PWIA_1^{15}$ . . . . .	131
5.34 $PWIA_2^{15}$ . . . . .	131
5.35 $PWIA_1^{60}$ . . . . .	132
5.36 $PWIA_2^{60}$ . . . . .	132

---

5.37 $PWIA_1^{120}$ . . . . .	132
5.38 $PWIA_2^{120}$ . . . . .	132
5.39 $PWIA_1^{150}$ . . . . .	133
5.40 $PWIA_2^{150}$ . . . . .	133
5.41 $PWIA_1^{180}$ . . . . .	133
5.42 $PWIA_2^{180}$ . . . . .	133
5.43 $PWIA_1^{190}$ . . . . .	134
5.44 $PWIA_2^{190}$ . . . . .	134
5.45 $PWIA_1^{200}$ . . . . .	134
5.46 Evolution du PGPM (TAC) . . . . .	135
5.47 Evolution du PGPM (DTS) . . . . .	136
5.48 Evolution du PGPM (CSR) . . . . .	136



# Liste des Tableaux

2.1	Les avantages et les inconvénients de l'UML . . . . .	24
2.2	Tableau de comparaison entre les outils BPM . . . . .	26
2.3	Niveaux emergency severity index (ESI) . . . . .	45
2.4	Manchester triage scale (MTS) . . . . .	45
2.5	L'échelle canadienne de triage et de gravité des services d'urgence . . . . .	45
2.6	La Classification clinique des maladies aux urgences "CCMU" . . . . .	46
2.7	Résumé des articles clés discutés dans cet état de l'art . . . . .	49
3.1	Les types des conditions et d'acheminement de transition du workflow . . . . .	57
3.2	Les Ressources humaines du SUA . . . . .	61
5.1	Types de maladie graves . . . . .	116
5.2	Ressources physiques et humaines du SUA . . . . .	122
5.3	Simulation de plusieurs scénario . . . . .	122
5.4	Type de maladies des 9 patients du première scénario du tableau 5.3 . . . . .	122
5.5	Comparaison des résultats de l'AMOR proposé, de l'algorithme de liste et du fonctionnement pratiqué actuellement au SUA. . . . .	126
5.6	Temps de calcul . . . . .	126
5.7	Tâches du workflow du patient . . . . .	129
5.8	Les valeurs des paramètres d'environnement PWIA <sup>0</sup> (la tâche CT0 du patient 1 est sélectionnée pour exécution) . . . . .	130
5.9	Les valeurs des paramètres d'environnement PWIA <sup>10</sup> (CT0 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 1 et CT0 du patient 2 est sélectionnée pour exécution) . . . . .	131
5.10	Les valeurs des paramètres d'environnement PWIA <sup>15</sup> (CT0 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 2 et CT2 du même patient est sélectionnée pour exécution.) . . . . .	131
5.11	Les valeurs des paramètres d'environnement PWIA <sup>60</sup> (CT2 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 2 et la CT1 du patient 1 est sélectionnée pour exécution.) . . . . .	132
5.12	Les valeurs des paramètres d'environnement PWIA <sup>120</sup> (CT1 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 1 et CT12 du patient 2 est sélectionnée pour exécution.) . . . . .	132
5.13	Les valeurs des paramètres d'environnement PWIA <sup>150</sup> (CT12 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 2 et CT12 du patient 1 est sélectionnée pour exécution.) . . . . .	133
5.14	Les valeurs des paramètres d'environnement PWIA <sup>180</sup> (CT12 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 1 et CT4 du patient 2 est sélectionnée pour exécution.) . . . . .	133
5.15	Les valeurs des paramètres d'environnement PWIA <sup>190</sup> (CT4 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 2 et CT4 du patient 1 est sélectionnée pour exécution.) . . . . .	134
5.16	Les valeurs des paramètres d'environnement PWIA <sup>200</sup> (La CT4 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 1 et toutes les tâches de soins des deux patients sont maintenant exécutées) . . . . .	134



# Introduction générale

Le système de soins actuel souffre d'un manque d'interaction et de cohérence stimulant ainsi la réflexion logistique dans les hôpitaux. Dans ce contexte, cette logistique hospitalière doit coordonner efficacement une multitude de flux de ce système. Néanmoins, les pics d'activité et les engorgements des services sont sources de tensions difficile voire impossible à maîtriser. Ils sont liés aux flux des patients et aux flux des processus de soins. Les tensions aux urgences cause de multiples problèmes pour les patients et le personnel médical, notamment des temps d'attente plus longs, une déviation accrue des ambulances, une durée de séjour plus longue, une augmentation des erreurs médicales, une mortalité accrue des patients et un préjudice accru aux hôpitaux en raison des pertes financières. En effet, l'état de tension au sein des établissements de santé peut être décrit par des indicateurs liés à des facteurs internes tels que l'augmentation du nombre de patients; l'augmentation de la complexité des cas; le manque de structure de soins en dehors des heures ouvrables; le manque de lits; la multiplication des tests diagnostiques, le temps d'attente des patients, etc. Les indicateurs les plus expressifs peuvent être identifiés par des praticiens expérimentés mais l'imprécision des données nécessite souvent la mise en œuvre de systèmes de fouille et d'extraction des connaissances à partir de données distribuées, imprécises et imparfaites afin de permettre l'identification d'indicateurs fiables qui sont utiles pour la prise de décision.

Les systèmes de santé sont donc sous pression pour améliorer les performances en termes de service et de rentabilité. En plus de l'amélioration des processus de prise en charge des patients, les défis concernent également les différentes activités de soutien telles que la gestion des différents flux logistiques. Il est cependant démontré que les innovations logistiques basées sur des techniques d'intelligence artificielle peuvent offrir un potentiel significatif d'amélioration des performances dans le secteur de la santé. L'objectif principal est d'assurer une meilleure prise en charge pour les patients. La mise en place des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC), l'informatisation des données et un système logistique approprié garantissent des meilleurs indicateurs de performance et des bonnes pratiques au niveau des services de soins. Les NTIC s'inscrivent dans un champ de recherche qui se dégage de l'utilisation de capteurs, la technologie RFID, la technologie réalité augmentée et d'autres dispositifs pour améliorer la logistique hospitalière dans le but ultime de réduire les temps d'hospitalisation, améliorer la prestation de soins aux patients, assurer de meilleures conditions de travail pour le personnel, etc. Cependant, l'utilisation des NTIC dans le domaine de la santé présente de nombreux défis. Toute technologie utilisée dans

le domaine de la santé doit garantir la sécurité des patients et la confidentialité des données, ce qui doit être la base du développement des systèmes logistiques impliquant les NTIC.

Par conséquent, la mise en œuvre de soins d'urgence de qualité englobe l'ensemble des ressources de l'infrastructure constituées des différentes entités en interaction. L'amélioration de l'efficacité du parcours du patient nécessite l'optimisation de la logistique intra-service (urgences) et inter-services qu'ils soient ou non au sein de la même structure hospitalière. Le patient qui arrive aux urgences est priorisé en fonction de son niveau de gravité, ce qui détermine son temps d'attente prévisionnel (par exemple : AVC récent : 20 minutes, douleur thoracique : 60 minutes, entorse de cheville : 2 heures). Une fois le patient pris en charge, son parcours peut requérir un plateau technique et/ou des avis spécialisés dont le service dispose ou pas. Le patient doit donc être géré en interne ou en interaction avec d'autres services le plus efficacement possible. A la fin de la prise en charge, le patient est orienté le plus rapidement possible vers son domicile ou vers une autre structure de soins.

Les dysfonctionnements observés à l'heure actuelle dans les services hospitaliers sont dus **en grande partie à une gestion des flux patients inefficace**. Pour corriger cette situation, il faut envisager des restructurations en temps réel qui se traduiront en interne par une meilleure mutualisation des ressources notamment au niveau des disponibilités du personnel soignant, disponibilités des lits, plateaux techniques, moyens de transport, etc. Or, les professionnels de santé ne sont ni préparés ni formés pour résoudre de tels problèmes ; **Il apparaît qu'ils sont démunis en méthodologies et outils d'aide à la décision et de pilotage adaptés aux exigences qu'impliquent ces modes de fonctionnement futurs**.

Au niveau scientifique, la mise en œuvre des méthodes d'optimisation et d'outils d'aide à la décision (SAD) deviennent nécessaires pour une meilleure gestion des flux et des ressources liées aux urgences hospitalières. Ce SAD doit permettre de résoudre d'une part, les problèmes au niveau dimensionnement et configuration et d'autre part les problèmes de planification, d'ordonnancement et de pilotage. La difficulté majeure est liée à la prise en compte de grand nombre de scénarios (incertitude quant à la nature et au volume de l'activité de soins) et notamment au nombre important de critères de performances devant être améliorés (temps d'attente, qualité de soins, confort du personnel médical, coûts, etc.).

Cette thèse a pour but de contribuer à l'étude et au développement d'une méthode d'ordonnement à horizon glissant des tâches de soins à compétences multiples en utilisant un algorithme mémétique. Grâce à un modèle de chromosome en hypercube nous avons intégré les quatre aspects importants liés à un service d'urgence : le patient, le personnel médical, le temps et l'espace. Pour assurer un meilleur suivi du parcours patient, nous avons développé un module d'orchestration dynamique qui permet de piloter un workflow patient en cours d'exécution.

Le présent travail est organisé en 5 chapitres comme suit :

1. Le premier chapitre est consacré à l'étude des systèmes hospitaliers et les services des urgences (SU). Dans cette partie, les différentes étapes de la logistique hospitalière sont décrites en détaillant le système hospitalier français et les SU correspondants. Ceci nous amène à spécifier notre problématique et le terrain d'expérimentation qui est le SUA (service des urgences adultes) du CHRU de Lille.
2. Le deuxième chapitre présente un état de l'art sur les modèles, méthodes et outils utilisés en santé et surtout dans la logistique hospitalière pour gérer les patients. Ainsi que les indicateurs de performances clés qu'il faut améliorer pour optimiser la prise en charge des patients.
3. Nous présentons, dans le troisième chapitre, une étude et une mise en œuvre d'un workflow collaboratif pour modéliser le parcours patient au sein du SUA. Nous montrons ensuite l'établissement des différents modèles workflow pour représenter les différentes unités des SUA ainsi que les différents processus du parcours patient.
4. Dans le quatrième chapitre, nous proposons des approches efficaces pour construire un ordonnancement à horizon glissant des tâches de soins à compétences multiples en utilisant un algorithme mémétique. Nous proposons également des approches pour la mise en place d'une orchestration dynamique du workflow patient à base d'agents en optimisant les indicateurs de performances en cours d'exécution.
5. Le cinquième chapitre est consacré aux résultats des simulations des différents modèles construits tout au long de ce mémoire en utilisant des données réelles issues du SUA. Nous commençons par analyser ces données pour identifier l'évolution des indicateurs de performances et des critères à optimiser au sein du SUA. Ensuite, nous présentons les résultats de l'ordonnancement et de l'orchestration dynamique du workflow.
6. Une conclusion générale et des perspectives ainsi qu'une liste des références bibliographique termineront ce mémoire de thèse.



# Les systèmes hospitaliers : des systèmes caractérisés par la tension

## 1.1 Introduction

Aujourd'hui, la logistique hospitalière change avec l'évolution démographique, socio-économique et réglementaire à cause notamment des nouvelles organisations et de nouveaux modes d'évaluation. Ainsi, la prise de conscience de l'enjeu majeur que représentent la gestion des systèmes de production de soins et la maîtrise des différents flux hospitaliers sont de plus en plus fortes. Dans ce contexte le défi à relever pour les autorités des structures des soins est de rendre l'accès aux soins primaires en France fiable et attractive. Cette situation est due à un déphasage entre la vitesse de l'activité offerte et l'évolution de missions, à une organisation interne et/ou externe mal adaptée, aux contraintes et à une mauvaise gestion des flux patients. Par conséquent, les professionnels de santé sont de plus en plus conscients de la nécessité de développer leur système hospitalier afin d'utiliser leurs ressources le plus efficacement possible et améliorer ainsi non seulement la qualité des soins aux patients mais aussi minimiser les dépenses de santé.

Dans ce chapitre, nous présentons le système de santé en France, avec un focus sur l'étude et l'évaluation des tensions dans les hôpitaux, et notamment dans les services des urgences. De nos jours, l'anticipation et la gestion des tensions deviennent un enjeu majeur afin de trouver des solutions efficaces permettant d'améliorer la prise en charge des patients

## 1.2 Le système de soins en France

Le système de soins en France est basé sur une approche bismarckienne qui garantit, la séparation entre la prestation et le financement des services de santé, le contrôle de la qualité de soins et le suivi de leurs coûts de la part des financeurs, la couverture de la totalité de la population par l'assurance maladie obligatoire et finalement la liberté de choix des assureurs complémentaires.

En contrepartie, cette approche rend le système fortement dépendant aux bases de revenus qui sont issus de la cotisation de la population active, ainsi le nombre important et la diversité des programmes d'assurance compliquent la mise en place d'une politique de santé.

Le secteur hospitalier français est un paysage varié qui représente une cohabitation des structures de trois types de statuts juridiques. Ces statuts ont des modes d'organisation et de gestion, de financement et de régulation, de participation aux missions de service public très différents. De même pour les statuts de ses personnels, ils sont très hétérogènes. Le secteur hospitalier a comme mission de satisfaire les demandes des patients, tout en assurant des soins adaptés et de qualité au meilleur coût (coût/efficacité optimale) [JACOBZONE, 1995]. Les établissements de santé doivent donc répondre simultanément à des besoins divers, compte tenu de leurs disciplines spécifiques, leur personnel médical et non médical, etc.

Selon le ministère de solidarités et de santé [*Les établissements de santé - édition 2017 - Ministère des Solidarités et de la Santé* 2018], en 2015, plus de 3000 établissements de santé français assurent le diagnostic, le surveillance et le traitement des malades. Ces établissements de santé offrent des soins avec ou sans hébergement. Les soins sans hébergement, sont les soins de courte durée, effectués dans le cadre d'un traitement de soins et de surveillances continus (cure médicale, convalescence, etc). Les soins avec hébergement sont les soins de longue durée, effectués pour des personnes dont l'état nécessite des traitements et une surveillance médicale constants. En revanche, la liste de missions de ce système de santé est loin d'être exhaustive. En effet, il doit participer ; à des actions médico-sociales, à la lutte contre l'exclusion sociale, à veiller à la sécurité sanitaire des soins et collaborer au dispositif de vigilance sanitaire des pays, concourir à la recherche médicale, à la formation des différents personnels médicaux, ainsi qu'aux actions de médecine préventive et d'éducation à la santé. La multiplicité des missions divulguées au système hospitalier est donc impressionnante.

Ce système socio-sanitaire est un système complexe, vu qu'il est à l'intersection de 3 différents phénomènes (politique, économique et social). Une part de cette complexité est due à la forte progression des dépenses de santé. Par exemple en 2014, les dépenses en santé en France se sont élevées à 12% de PIB (Produit Intérieur Brut) contre 9,5% en 2000. Ce montant place la France parmi les pays de l'OCDE (organisation de coopération et de développement économiques) qui y consacrent la plus grande part de sa richesse nationale, mais moins que les Etats-Unis, la Suisse et les Pays-Bas.

En outre, au cours de ces dernières décennies, l'augmentation des dépenses en santé est due aux deux principaux facteurs, qui sont, le vieillissement de la population et la dépendance généralisée d'avancées technologiques coûteuses dans les pratiques médicales [WHITE, 2007]. Ces facteurs ont entraîné et vont encore entraîner une augmentation des coûts dans les années à venir. Par conséquent, et en raison de l'augmentation des pathologies chroniques, les structures hospitalières

s'efforcent à améliorer en profondeur leurs modes d'intervention et leur organisation [BOULET, 2000], [GHANES, 2016], [BEN OTHMAN, 2015].

### 1.2.1 Organisation et acteurs institutionnels du système de santé

Le système de santé français se base sur plusieurs structures telles que les structures sanitaires qui sont dédiées pour la prise en charge hospitalière, les structures médico-sociales et sociales qui sont dédiées pour les patients fragiles (âgés ou handicapés) et les structures ambulatoires qui sont dédiées pour les soins de ville. Cette organisation qualifie le système hospitalier français comme un système d'excellence reconnu au niveau international [ADMIN, 2016], [BEN OTHMAN, 2015] dû à l'implication quotidienne de ses professionnels médicaux, paramédicaux, techniques, administratifs, sociaux et à leurs volontés à innover.

Ce système de santé est au premier rang piloté par les pouvoirs publics, c'est le ministère de la santé et des affaires sociales qui assure la cohérence de la prise en charge des patients et des résidents. Au deuxième rang, c'est l'assurance maladie qui couvre le risque maladie et assure le remboursement des dépenses de santé. En effet, L'État intervient directement dans le financement et l'organisation de l'offre sanitaire et médico-sociale. Pour y parvenir, le ministère s'appuie sur les agences sanitaires, opérateurs publics dont ils assurent la tutelle ainsi que sur des partenaires indépendants tel que la haute autorité de santé (HAS). L'État assure non seulement la supervision de l'ensemble des établissements de soins et d'accompagnement et la formation des professionnels de santé, mais il garantit aussi le soutien financier aux établissements sanitaires et médico-sociaux, il fixe les tarifs de prestation pour maîtriser les coûts de soins afin de respecter les objectifs de dépenses nationales.

Au niveau régional, les agences régionales de santé (ARS) veillent à garantir une gestion cohérente des ressources pour permettre un accès égal pour tous les patients ainsi qu'à une prise en charge continue, de qualité et sécurisée. En complémentarité avec les ARS, les directions régionales de la jeunesse, des sports et de la cohésion sociale (SDJSCS) protègent l'accès au service pour la population la plus vulnérable. Les politiques de sécurité sociale y participent également, via les caisses primaires d'assurance maladie (CPAM) et les caisses d'assurance retraite de la santé au travail (CARSAT). Au niveau local, ce sont les structures, les établissements et les professionnels de santé qui s'organisent pour offrir une prise en charge organisée. Ceci est expliqué en premier lieu par les soins chez les médecins généralistes qui peuvent orienter ses patients en deuxième lieu vers un médecin spécialiste ou vers un établissement adapté. Cette organisation est conditionnée par une coordination des soins entre les différents acteurs (médecin de ville et hôpital). Au niveau plus proche, il est fortement difficile de savoir qui est le responsable du bon (ou mauvais) fonctionnement d'un établissement de santé. En effet, le directeur de l'hôpital ne fait qu'exécuter les décisions ministérielles, alors que le maire préside le conseil d'administration de l'établissement sans en être le financeur ni même le véritable décideur. L'agence régionale d'hospitalisation (ARH), est

souvent court-circuitée par des décisions politiques (le maintien de maternités ou le refus de fusion d'établissements proches). Ce qui est en contradiction totale avec les principes d'amélioration de la qualité du service rendu.

### 1.2.2 Politique budgétaire

Annuellement, le parlement vote la loi de financement de la sécurité sociale (LFSS). Cette loi fixe l'objectif national des dépenses d'assurance maladie (ONDAM), qui inclut les soins de différents types. Plusieurs acteurs financent donc ces dépenses dont, l'État, la sécurité sociale, les collectivités locales, les ménages et les organismes de protection complémentaire (mutuelles, sociétés d'assurances, institutions de prévoyance).

Depuis ces deux dernière décennies, l'État français cherche à maîtriser efficacement ses dépenses dans les établissements de santé. En effet, des importantes réformes structurelles et conceptuelles ont été réalisées. En 1996, il y a eu la création de la LFSS et de l'ONDAM. Suivie en 2004, par la création de la réforme du financement des établissements hospitaliers appelée T2A (tarification à l'activité), en plus de la dotation de financement des missions d'intérêt général et d'aide à la contractualisation (MIGAC) qui inclue les missions d'enseignement, de recherche, de référence et d'innovation (MERRI) et finalement la loi hôpital, patient, santé, territoire (HPST) en 2009. Celles-ci ont significativement impacté les modalités d'attribution des financements publics et modifié l'environnement de la santé dans une logique incitative, visant à mobiliser la compétitivité de tous les acteurs de soins. En 2016, il y a eu la suppression de la part fixe des MERRI qui a conduit à une redistribution budgétaire. La distribution de ces fonds aux établissements de santé s'effectue par l'ARS et leurs redistributions au niveau interne sont réalisées par la direction d'établissements [WIERNIK et al., 2018].

La haute qualité des services de soins, la couverture universelle de la population par l'assurance maladie obligatoire et complémentaire et le remboursement quasi complet des médicaments présentent les principaux avantages du système de soins français. Néanmoins, les dépenses de soins et de biens médicaux de système de santé pèsent de plus en plus sur le PIB de l'État. Les auteurs dans [HOPP et al., 2012] confirment que l'hôpital occupe un pourcentage important des dépenses totales de santé. En 2017, et selon le ministère des solidarités et de la santé [*Les dépenses de santé en 2017 - Résultats des comptes de la santé - édition 2018 - Ministère des Solidarités et de la Santé* 2018] ces dépenses se sont évaluées à 199.3 milliards d'euros. Bien que la France consacre 11.5% de son PIB pour la santé publique, son système de soin actuel est face au problème de déséquilibre entre la vitesse de la richesse nationale et l'augmentation du volume de soins demandés. Du fait que, le taux de croissance de la consommation de soins et de biens médicaux atteint le 2.3% en 2016, évoluant ainsi plus vite que le PIB 1.6%<sup>1</sup>. Et ce depuis la hausse de l'année 2006, où les dépenses en soins médicaux ont passé de 8.30% à 8.90% en 2014, cette augmentation est due à la baisse

1. <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/etudes-et-statistiques/publications/panoramas-de-la-drees/article/les-dépenses-de-santé-en-2016-résultats-des-comptes-de-la-santé-edition-2017>

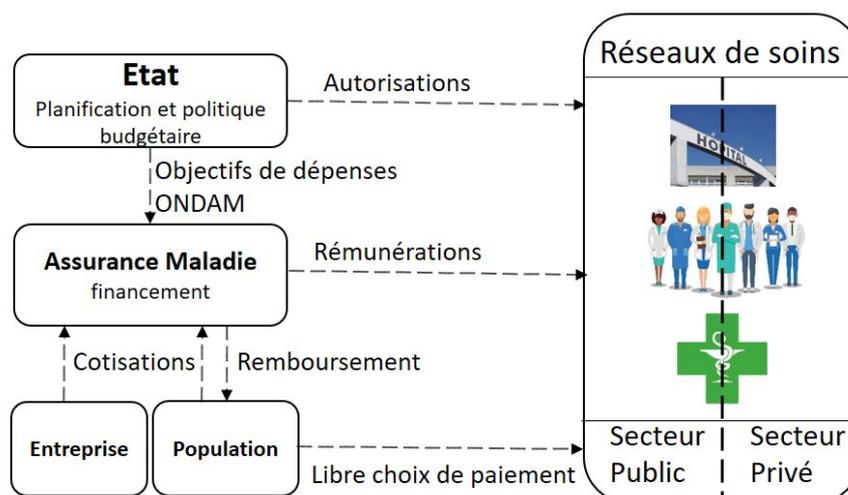


FIGURE 1.1 – Le système de soins Français : un modèle mixte

importante de PIB en 2009.

### 1.2.3 Réglementation et planification

Le système de santé Français est une organisation mixte qui repose sur plusieurs principes fondamentaux tels que les régimes sociaux liés à une activité professionnelle et en même temps à vocation à couvrir les risques de santé pour l'ensemble de la population. Grâce à la généralisation de l'assurance maladie, le système garantit l'accès aux soins pour la totalité de la population. La figure 1.1 résume le fonctionnement de ce système.

Dans leurs fonctionnements quotidiens, les établissements de soins ne peuvent pas tout faire seuls. En conséquence, ils sont fortement encouragés à coordonner et partager leurs activités avec d'autres structures et acteurs intervenant dans le domaine de la santé tels que les fournisseurs de soins (les hôpitaux et les professionnels de la santé), l'État (le ministère des affaires sociales, de la santé et des droits des femmes et le ministère des finances et des comptes publics) et l'assurance maladie. Le fonctionnement global du système de santé français repose donc sur le partage des compétences entre les différents établissements de soins.

Ces échanges aboutissent à des arrêtés administratifs et des lois adoptées par le Parlement. Par exemple : le 21 juillet 2009 la loi hôpital, patient, santé et territoires (HPST) avec la sécurité et la qualité des soins deviennent une mission qui s'impose à tous les établissements de santé. En effet une nouvelle gouvernance de la qualité et de la sécurité des soins est mise en place, confiant un rôle pilote à la commission médicale des établissements publics et à la conférence médicale des établissements privés.

Le contrôle de ces réglementations est fait tous les quatre ans par la haute autorité de santé

(HAS), qui assure la certification des établissements et valide des référentiels de bonne pratique [BEN OTHMAN, 2015]. Néanmoins, il n'existe pas de processus de re-certification ou de re-licence officiel pour les professionnels de la santé [MOSSIALOS et al., 2004]. Bien que les structures de soins (publics, privés) bénéficient d'une certaine autonomie de fonctionnement, le système reste fortement encadré et piloté par l'État. Le rôle de l'État dans la réglementation et la planification devient donc de plus en plus crucial. Dans ce contexte et depuis quelques années, l'organisation et la gestion du système de santé cherchent à se déconcentrer. C'est-à-dire accorder les responsabilités au niveau territorial et plus particulièrement à l'échelon de la région. Comme l'indique la loi HPST : « *facilité l'accès aux soins et l'accès à l'information, décloisonner les soins de ville et ceux dispensés à l'hôpital afin de simplifier le parcours de santé des patients et développer la qualité et la sécurité du système de santé.* ». En effet, les ARS ont pour mission d'assurer au niveau régional, un pilotage unifié du système de santé dans l'objectif de mieux répondre aux besoins des patients par une approche globale et cohérente du parcours de soins. La création des ARS est réalisée dans un contexte de profonde réorganisation de l'État au niveau territorial.

#### 1.2.4 Les dysfonctionnements liés à l'insuffisance des moyens

Selon le dernier sondage effectué au ministère de la solidarité et de la santé [*Les établissements de santé - édition 2017 - Ministère des Solidarités et de la Santé 2018*], en 2015, en France métropolitaine, dans les DROM (y compris Myotte) et dans le service de santé des armées (SSA), il existe au total plus de 3000 établissements de santé pour répondre à l'ensemble de demande des soins. Disposant de 408000 lits d'hospitalisation à temps complet (hospitalisation de plus de 24h), représentant une diminution de 60000 lits d'hospitalisation en douze ans. En revanche, les capacités en hospitalisation à temps partiel (Hospitalisation de moins de 24h) se sont développées pour atteindre 73000 place en 2015, représentant une hausse de 23000 au cours de la même période. Cette hausse est due à l'innovation en matière de technologies médicales et médicamenteuses. Ce qui a transformé les modes de prise en charge à la faveur de l'hospitalisation à temps partiel (figure 1.2). Depuis, un nombre croissant d'activité est effectué en dehors du cadre traditionnel de l'hospitalisation à temps complet (interventions chirurgicales, exploration à temps complet, etc.).

Selon la même étude, le nombre d'emplois médicaux (hors sages-femmes) dans les établissements de santé en France (y compris DROM et SSA) s'établit à 189000, dont 115000 salariés, 41000 praticiens libéraux et 33000 internes et assimilés. Ces nombres ont augmenté de 1,1% par rapport à 2014. Le nombre de postes salariés, qui représente 7 postes sur 10 hors internes, est stable entre 2014 et 2015. En revanche, le nombre de praticiens libéraux est en augmentation. En effet deux tiers des emplois médicaux relèvent des hôpitaux publics, 21% des cliniques privées et 11% des établissements privés à but non lucratif. En conséquence, la ressource humaine dans l'organisation du travail et le fonctionnement des services de santé présentent un levier incontournable du système de santé. Dans ce contexte, le secteur hospitalier français présente un paysage diversifié. Il fait cohabiter des établissements de trois types de statut juridique combinant des modes très différents

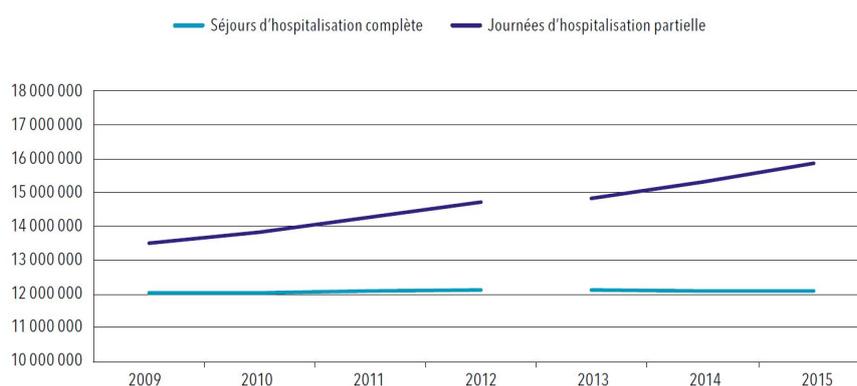


FIGURE 1.2 – Mutation de type d'hospitalisation vers l'hospitalisation partielle plutôt que de l'hospitalisation complète [Les établissements de santé - édition 2017 - Ministère des Solidarités et de la Santé 2018]

d'organisation et de gestion, de financement et de régulation, de participation aux missions de service public. Les statuts des personnels travaillant dans ces établissements sont également très variés. En effet, selon la profession exercée et le statut de l'établissement, les uns sont salariés à temps plein ou partiel, les autres sont des libéraux, rémunérés à l'acte directement par le patient (ou sa caisse d'assurance maladie). En outre les hôpitaux locaux de statut public peuvent appeler certains médecins libéraux et les payés ensuite à l'acte.

Ces chiffres confirment la capacité de la France à offrir un haut niveau de service et de ressource. Néanmoins, l'accessibilité spatiale, au regard des distances et temps d'accès aux soins en ville et à l'hôpital représente un problème central dans le monde hospitalier. Dans ce contexte, plusieurs études montrent clairement que la distribution des ressources médicales influence l'état de santé des populations comme dans [GUTTMANN, SHIPMAN et al., 2010], [BOUKUS et al., 2009]. Ceci est expliqué par le fait que les professionnels indépendants sont libres de choisir leur lieu d'exercice [SORENSEN, 2009]. En France, il existe quatre catégories principales d'hôpitaux : les hôpitaux généraux, les hôpitaux régionaux, les hôpitaux locaux et les hôpitaux psychiatriques. Cependant, les ressources humaines et matérielles varient fortement en fonction de la grandeur d'hôpital et de ses services de soins.

Les médicaments en France sont distribués par les pharmaciens indépendants, alors que le prix des médicaments est fixé administrativement par le comité économique des produits de santé (CEPS). Ce dernier est un organisme placé sous l'autorité des ministères chargés de la santé et de l'économie. Le CEPS a pour mission de fixer les prix des médicaments qui seront pris en charge par l'assurance maladie obligatoirement.

### 1.2.5 L'évaluation du système hospitalier

L'évaluation de l'état de santé du peuple dans un pays est mesurée à base de 3 principaux composants : la santé mentale et physique de la population, l'infrastructure des établissements de

soins et la disponibilité des traitements de prévention. Dans ce contexte, le système hospitalier français est toujours classé parmi les meilleurs dans le monde, grâce à la qualité des services offerts ainsi qu'à l'évolution constante de l'espérance de vie dans le pays qui est de 83 ans. Néanmoins, selon les dernières études, ce système n'est classé que le 18ème sur /19 pays<sup>2</sup>. Ce qui explique l'existence des insuffisances relatives à un ensemble de contraintes internes et externes.

Le système hospitalier d'aujourd'hui doit donc s'adapter en permanence aux mutations rapides de la technologie ainsi qu'aux nouveaux besoins des malades. Néanmoins, ces derniers expriment de nouvelles demandes et sont de plus en plus exigeants à l'égard de la médecine. Par conséquent, le rapport soignants/soignés est modifié pour exercer une forte pression sur les praticiens. Afin de faire face à ces contraintes, le système hospitalier doit proposer une prise en charge basée sur l'information, l'amélioration de toutes les activités de l'hospitalisation (accueil, hôtellerie, respect de la vie privée, soins...). Néanmoins, ceci n'est possible que lors de l'existence d'une bonne coordination entre les différentes activités du système.

### **1.3 Les structures des urgences dans le monde et spécifiquement en France**

Les services des urgences (SU) ont été reconnus pour la première fois au 20ème siècle [B. J. ZINK, 2006]. Le système des SU est commun partout dans le monde (Chine, France, Canada, USA...). Il fournit des soins de santé primaires aux patients dont les maladies ou les symptômes nécessitent une intervention immédiate. En France, selon l'article R6123-3 du code de la Santé Publique, un SU est un service d'accueil et de traitement qui doit accueillir sans sélection, vingt-quatre heures sur vingt-quatre, tous les jours de l'année, toute personne se présentant en situation d'urgence, y compris psychiatrique, et la prendre en charge, notamment en cas de détresse et d'urgence vitale. Ces SU s'organisent aujourd'hui afin de permettre l'accès aux soins pour tous, en permanence et en proximité des patients. En effet, les systèmes des urgences représentent le pilier principal du système de santé et ils sont constamment dans une démarche d'amélioration continue de la qualité des soins.

Dans le cadre de l'organisation et de l'aide médicale d'urgence, les SU font partie d'un réseau de coordination entre les différents acteurs impliqués dans la prise en charge des patients, tel que le service d'aide médicale urgente (SAMU). Ce service fournit des soins médicaux actifs en dehors des hôpitaux, il intervient pour la prise en charge préhospitalière, c'est-à-dire la prise en charge en amont d'un transfert à un établissement de santé. Il est représenté par un centre d'appels qui a pour mission de répondre 24h/24h, par des spécialistes de soins, aux besoins de la population. Le SAMU est également chargé du transport des patients vers un établissement de soins approprié, généralement un service d'urgence dans un hôpital, où le patient sera pris

---

2. <https://www.businessinsider.fr/meilleurs-systemes-sante-prosperity-index-2018>

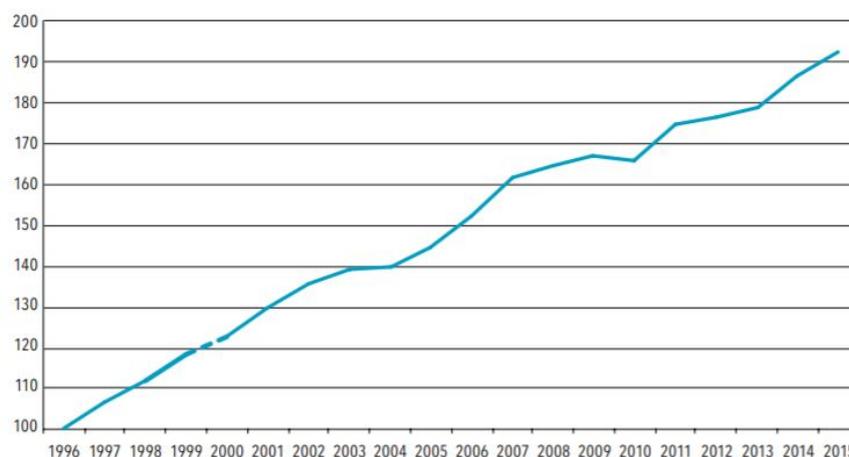


FIGURE 1.3 – Evolution du nombre de passages annuels aux urgences depuis 1996 [Les établissements de santé - édition 2017 - Ministère des Solidarités et de la Santé 2018]

en charge. Avant d'effectuer le transport de patient, le SAMU doit assurer la disponibilité des moyens d'hospitalisation, publics ou privés, adaptés à l'état de ce même patient. Pour accomplir ses missions, le SAMU peut faire intervenir d'autres structures<sup>3</sup> telles que : les structures mobiles d'urgence et de réanimation (SMUR), les services départementaux d'incendie et de secours, le transport sanitaire, les médecins et paramédicaux libéraux. Par conséquent, le SU est à la croisée des chemins entre les hôpitaux et les systèmes médicaux d'urgence, et intervient directement dans la sécurité des patients et de la santé publique. Néanmoins, le nombre de passages aux urgences ne cesse de croître (figure 1.3) alors que le nombre et la capacité de ces services sont en diminution [HARRISON et al., 2011],[ABO-HAMAD et al., 2013b]. Ce phénomène est apparu partout dans le monde, par exemple aux Etats Unis, le nombre annuel des visites aux urgences, entre 1995 et 2010 a augmenté de 34%, tandis que le nombre des unités de soins a diminué de 11% au cours de la même période [Hsia et al., 2011]. En France, et selon le rapport publié par le ministère de la santé [Les établissements de santé - édition 2017 - Ministère des Solidarités et de la Santé 2018], 21 millions patients ont été enregistrés en 2016 dans les différentes structures publiques et/ou privées d'urgence, contre 10.1 million passages en 1996. Pendant cette période, il y a eu une augmentation régulière de 3,5% par an en moyenne. Ces chiffres alertent d'un véritable problème auquel le SU est confronté, c'est l'engorgement des urgences ou encore appeler la tension dans les SU. Cette tension est explicitement due aux manques de moyens tel que :

- La pénurie de médecins urgentistes dans les établissements isolés géographiquement ;
- Les fermetures de lits ; en 2016, les établissements de santé comptent 404.000 lits à temps complet, soit 64.000 lits de moins qu'en 2003, alors qu'en séjour de courte durée la fermeture de lits s'est effectuée à un rythme assez régulier (-26,000 lits en treize ans)

En revanche, les causes de la tension sont encore plus complexes et difficiles à énumérer sans la mise en places des outils d'identifications. En effet, **quelles sont les causes latentes de la tension**

3. la participation de ces structures privées est sous la responsabilité du SAMU, elle est déterminée par des conventions bien structurées

## **dans les SU?**

En France, il existe environ 650 SU implantés dans les hôpitaux publics et les cliniques. Or le fait qu'ils sont à la croisée des chemins entre les hôpitaux et les systèmes médicaux d'urgence, et en raison du vieillissement de la population, les SU sont exposés de plus en plus aux problèmes d'engorgement. Ce qui explique l'existence d'une corrélation directe entre l'augmentation croissante de l'activité de soins de SU et le vieillissement de la population [GEORGE et al., 2006]. Par conséquent, au cours de ces deux dernières décennies les différents SU dans le monde subissent des pressions afin de résoudre le problème de la tension. En effet, plusieurs recherches scientifiques ont cherché à résoudre cette problématique, en soulignant que plus de la moitié des SU dans le monde ne disposent pas des capacités suffisantes pour maintenir le flux des patients dans des conditions optimales et sans délais d'attente excessif [PATERON, 2013],[BARISH et al., 2012]. En raison de ce déséquilibre entre la demande de soins des patients et l'offre proposée, les urgences font actuellement face à un problème mondial récurrent qui est la tension.

## **1.4 Problème majeur : la tension dans les SU**

### **1.4.1 Définitions de la tension**

La tension dans les urgences est un problème mondial. Ce phénomène est à l'origine de différentes problématiques [PAUL et al., 2010], [SALWAY et al., 2017] tels que, la présence d'un nombre excessif de patients dans les SU, les longs délais de séjours et de temps d'attente du patient, la réalisation des traitements de soins dans les couloirs. La tension réduit la disponibilité du personnel et des ressources matérielles qui, par conséquent, détériorent la qualité des soins ([BERNSTEIN et al., 2009], [PINES, POLLACK et al., 2009]) et diminuent la satisfaction des patients [BAIR et al., 2010] [PINES, IYER et al., 2008] qui peuvent abandonner [LIAO et al., 2002]. Elle entraîne également le stress des patients qui provoque la violence physique et verbale envers les personnels des urgences. Ainsi, la tension est liée à l'augmentation des erreurs médicales et des taux de mortalité [SPRIVULIS et al., 2006], [CARMEN et al., 2014], et aux coûts inutilement élevés [TRZECIAK et al., 2003], [KUO et al., 2012] et implique aussi les détournements des ambulances [PAUL et al., 2010], [SOLBERG et al., 2003]. Par conséquent, la résolution de ce problème est devenue la préoccupation centrale pour les administrateurs et les experts de la santé ainsi que les politiciens et les médias [SALWAY et al., 2017]. Par conséquent, ce problème présente un défi critique pour les praticiens des soins d'urgence et les chercheurs scientifiques de différents domaines [HOPP et al., 2012].

Dans ce contexte, la majorité des pays développés se sont intéressés au développement de leur système hospitalier afin d'anticiper les situations de tension et d'améliorer la qualité des soins prodigués aux patients, en tenant compte de la demande croissante, des coûts d'exploitation élevés combinés à des contraintes budgétaires [CARMEN et al., 2014], [ABO-HAMAD et al., 2013b].

Dans la littérature, les chercheurs ont donné plusieurs définitions au phénomène de la tension, néanmoins aucun consensus réel sur une définition précise n'a été trouvé. Dans [HWANG et CONCATO, 2004] les auteurs ont expliqué que la tension a été définie en 23 différentes définitions. Ces définitions sont basées sur les facteurs externes et internes du système hospitalier. Puis en 2006, le collège américain des médecins urgentistes (American College of Emergency Physicians (ACEP)) l'a suggéré comme une situation qui se produit lorsque le besoin en soins dépasse le nombre de ressources disponibles dans le SU, dans l'hôpital ou dans les deux [ANN EMERG, 2006]. Cependant, cette définition ne comprend pas tous les aspects du phénomène, car elle néglige l'horizon temporel alors que les effets négatifs de la tension dans les SU sont proportionnels à son extension dans le temps. Récemment, les travaux établis par le projet ANR HOST (2012-2015)<sup>4</sup> ont donné une définition précise de l'état de tension dans les services d'urgence en expliquant que : « un état de tension dans le SU est un déséquilibre entre le flux de charge des soins et la capacité de prise en charge sur une durée suffisante pouvant entraîner des conséquences néfastes au bon fonctionnement » [CHANDOUL, 2015]. En outre, le projet HOST a élaboré un SAD (système d'aide à la décision) pour anticiper la tension dans le Service des Urgences Pédiatrique.

En France, la situation de tension dans les SU touche de nombreux établissements sur tout le territoire. Selon les chiffres fournis par le ministère de la santé (le 16 mars 2017), 97 hôpitaux sur les 650 (publics et privés) ont activé le plan « hôpital en tension ». Cela signifie que ces services sont en difficulté critique pour accomplir leur mission, qui est de prendre en charge les patients urgents. Selon l'association SAMU-Urgences de France, cette situation est à l'origine de 9% du taux de mortalité pour les patients dont l'état non urgent et 30% pour les patients urgents<sup>5</sup>. Par exemple, à Rennes une femme de 60 ans est morte d'un arrêt cardiaque sur le brancard où elle attendait d'être auscultée aux urgences de l'hôpital<sup>6</sup>. À Lille également, et selon les médecins urgentistes un homme est mort dans la salle d'attente de SU où il attendait dans les unités d'hospitalisation à courte durée alors qu'il devait être traité dans les unités d'hospitalisation à longues durées. Ces deux exemples sont pas uniques. La surpopulation aux Urgences a donc non seulement une incidence sur la satisfaction des patients, mais aussi augmente le risque de décès et de réadmissions à l'hôpital.

### 1.4.2 Les causes de la tension

En plus de l'inadéquation des ressources dans les SU par rapport aux besoins des patients (cf.4.1), les soins offerts sont majoritairement des soins imprévus [SALWAY et al., 2017]. En effet, ce n'est pas surprenant que des problèmes de capacité se produisent. Par conséquent, les chercheurs ont affecté la situation de tension dans les SU à l'incapacité d'optimiser les flux, ce qui est incontestablement vrai. Néanmoins il est important d'expliquer et souligner de plus près les vraies causes

4. <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-11-TECS-0010>

5. [https://www.francetvinfo.fr/sante/politique-de-sante/urgences\\_2666266.html](https://www.francetvinfo.fr/sante/politique-de-sante/urgences_2666266.html)

6. <https://www.francebleu.fr/infos/sante-sciences/rennes-une-femme-de-60-ans-decede-aux-urgences-du-chu-1521047573>

de ce phénomène.

#### 1.4.2.1 Causes internes

La distinction de la signification de la tension dans le SU par rapport aux autres unités hospitalières est essentielle. En effet, les unités d'hospitalisation sont dites en situation de tension ou incapables d'accueillir de nouveaux patients que lorsque tous leurs lits sont occupés. Alors que les SU sont dites en situation de tension que lorsque toutes leurs chambres, leurs civières de couloir et leurs chaises sont pleines. Il existe donc un contraste frappant du sens de situation de tension dans les SU et hors SU. En outre, dans les SU, il faut distinguer la situation de la tension causée par l'épidémie de grippe de celle causée par une mal organisation des services.

Dans ce contexte, plusieurs facteurs internes sont à l'origine de la situation de tension dans les SU tels que l'augmentation du nombre de patients ; l'augmentation de la complexité des cas ; le manque de structure de soins en dehors des heures ouvrables ; le manque de lits ; la multiplication des tests de diagnostics, le temps d'attente des patients, les professionnels de santé qui sont démunis en méthodologies et outils d'aide à la décision et de pilotage adaptés aux exigences de leur environnement, etc. En effet, les praticiens expérimentés peuvent identifier les indicateurs les plus expressifs mais ceci reste incertain en raison de l'imprécision des données. Ce qui nécessite souvent la mise en œuvre de systèmes de fouille et d'extraction des connaissances à partir de données distribuées, imprécises et imparfaites afin de permettre l'identification d'indicateurs fiables qui sont utiles pour la prise de décision.

#### 1.4.2.2 Causes externes

Les dysfonctionnements régulièrement dénoncés résultent moins de l'organisation propre des SU que de leur positionnement original. En effet, entre une médecine de ville imparfaite en amont c'est-à-dire le manque de coordination entre les médecins traitants et les médecins spécialistes (qui provoque actuellement des retards dans la prescription d'un médicament, un retard dans la réalisation d'un bilan biologique, etc.) et les lits d'hospitalisation surchargés causés par la rigidité hospitalière en aval, les urgences ne peuvent être qu'en situation de tension. En conséquence, les SU ne sont pas en cause en tant que tels, par contre ils représentent un miroir affichant des dysfonctionnements de l'ensemble du système de santé

Dans ce contexte, l'entrée des flux massifs des patients est connue en tant que principale cause du surpeuplement des urgences. En effet, dans la littérature plusieurs chercheurs ont montré l'existence d'une corrélation directe et forte entre le nombre d'admissions dans le service des urgences et la situation de tension [SALWAY et al., 2017], [GUTTMAN et al., 2011]. Ce problème est dû au fait que les malades ne connaissent pas assez leur système de santé et ne savent réellement

pas quoi faire ou à qui s'adresser lors d'un problème de santé imprévu. Pour ces raisons la majorité des patients qui engorgent le SU ont un degré de gravité assez faible. En outre, les suppressions successives de lits d'hôpitaux en raison purement économique (cf.4.2), ont un impact direct sur la saturation des SU. Néanmoins, et malgré la conscience des autorités de soins que la majorité des admissions aux SU s'effectuent l'après-midi et le soir dans la plupart des SU, les SU continuent de fonctionner avec un squelette d'équipage en soirées, nuits et week-end [SALWAY et al., 2017].

Pour faire face à cette situation, en Alsace, l'ARS a demandé aux patients (qui sont de plus en plus vieux et avec des pathologies et des maladies chroniques plus avancées) d'appeler le SOS médecins ou leur médecin traitant avant de se rendre aux urgences. Néanmoins, cette solution ne répond pas aux attentes et aux besoins des patients qui ont besoin d'être accueillis et transférés rapidement aux unités d'hospitalisations spécialisées afin d'être pris en charge.

## 1.5 La contribution de système d'information à la performance du SU

Pour faire face aux problèmes de tension dans l'organisation hospitalière, notamment dans les SU. Les responsables de soins commencent à gérer l'hôpital comme une véritable entreprise. Ils s'intéressent de plus en plus à gérer les différents flux d'activités (physiques, financiers, informations) pour anticiper les besoins des patients. Ceci est réellement très complexe vu que l'heure d'arrivée des patients est totalement stochastique et que leurs pathologies étant impossibles à prévoir car elles évoluent d'une manière non linéaire en fonction du temps. Dans ce contexte, les chercheurs depuis quelques années examinent l'intégration des concepts et des outils utilisés dans le domaine entrepreneurial au domaine des services [HASSAN, 2006], [CHABROL et al., 2006], [SAVAGE, 2017]. Le système hospitalier subit donc une mutation de fonctionnement. Néanmoins, l'application de ces solutions qui ont été développées dans d'autres milieux ne peut se faire automatiquement dans le milieu de la santé, en raison de manque de compatibilité ou de pertinence. C'est pourquoi, le bon fonctionnement de cette application est basé sur le choix des méthodes appliquées. L'objectif est donc de trouver la meilleure méthode ou la meilleure composition de méthodes et la conjuguer aux problèmes qui sont mis en question dans le service étudié.

Dans l'objectif de bien gérer les urgences ainsi que de satisfaire les différentes attentes (staff médical, patients et tutelle de santé) il faut concevoir et développer des algorithmiques pour prendre des décisions et des actions bien coordonnées. Avoir une technologie de l'information efficace peut évidemment améliorer le rendement des urgences. Néanmoins, ceci ne peut être concrétisé que sous une méthode de planification efficace. Dans ce contexte, les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) présentent un vecteur incontournable pour la mise en œuvre d'une pratique d'ingénierie de la santé. Ces NTIC sont à l'origine d'une bonne/mauvaise qualité des services apportés aux patients. Elles sont présentes dans les différents niveaux du système de santé. En effet, les systèmes d'informations hospitaliers sont conçus pour établir des outils interactifs

et coopératifs, facilitant la réalisation des tâches des différents personnel médical. Ces systèmes d'informations doivent assurer l'accès et la diffusion optimisée des informations nécessaires au bon acteur du système. Ils concernent les informations relatives aux patients (avis de consultation médicale, résultats des examens biologiques, etc.), aux disponibilités de moyen (lits, rendez-vous, médicaments). Ces systèmes sont complexes et basés sur les technologies interopérables (Internet, Wifi, Web-service, etc.). Leur conception et leur mise en œuvre nécessitent forcément une forte collaboration entre les professionnels de soins et les industriels. Bien qu'il existe actuellement des systèmes de pilotage distribués pour la gestion des réseaux de soins (les workflows adaptatifs, les plateformes d'intermédiation, les interfaces nomades) pour concrétiser la gestion prévisionnelle et le pilotage en temps réel. L'évolution de la technologie de l'information reste lente en France. Ceci s'est amélioré durant ces dernières années, grâce à la mise en place de la facturation électronique ainsi que les dossiers électroniques des patients.

Aux urgences, la transmission des informations est très importante, non seulement pour diminuer les risques et les erreurs médicales, mais aussi pour que les personnels puissent partager les bonnes informations, afin d'y agir rapidement et efficacement. Or, les hôpitaux français d'aujourd'hui ne possèdent pas un véritable système d'informations qui englobe les différentes contraintes du bon fonctionnement. Par exemple, parmi le système d'information utilisé dans les SU des établissements de santé français il y a *ResUrgence*. Il est publié par la société Berger-Levrault et il est aussi le système d'informations utilisé dans le service des urgences d'étude de cette thèse. Le logiciel *ResUrgence* présente un dossier patient Web qui a pour objectif d'enregistrer l'heure d'arrivée et de départ des patients, les classes de priorité et le type de pathologie du patient. Néanmoins, les tâches de traitement et le séquençage réels ne sont pas stockés dans le système *ResUrgence*. Ce logiciel est utilisé également comme un tableau de bord des lits. Néanmoins, il n'y a pas de personnel dédié à l'inventaire de ces lits afin de transmettre rapidement les informations. Ceci peut être donc handicapant lors d'un besoin immédiat. Ainsi, il existe très peu de tableaux de bord de lits disponibles dans l'ensemble du territoire. Ce qui limite ainsi la flexibilité du système ainsi que les échanges inter-hospitaliers. Par exemple, lors d'un transfert du patient il faut que le SU s'assure que l'établissement d'accueil ait des lits disponibles. En effet, la mise en œuvre de ces tableaux de bord sur l'ensemble du territoire va faciliter le fonctionnement du système hospitalier notamment lors des périodes de tension qui sont de plus en plus fréquentes sur l'année. Pour ces raisons le plan « hôpital en tension » a été créé.

## 1.6 La logistique hospitalière

Au sein de la communauté de la logistique (transport, industrie, distribution, etc.), la logistique hospitalière a longtemps été négligée. En effet, avant les années 70, les personnels soignants étaient affectés pour faire de la logistique sans aucune formation ni dans le domaine de la planification ni dans les domaines d'approvisionnements et de la gestion du matériel [HASSAN, 2006]. Or, l'hôpital doit gérer différents flux tels que, les flux hôteliers (repas et linges), les flux pharmaceutiques

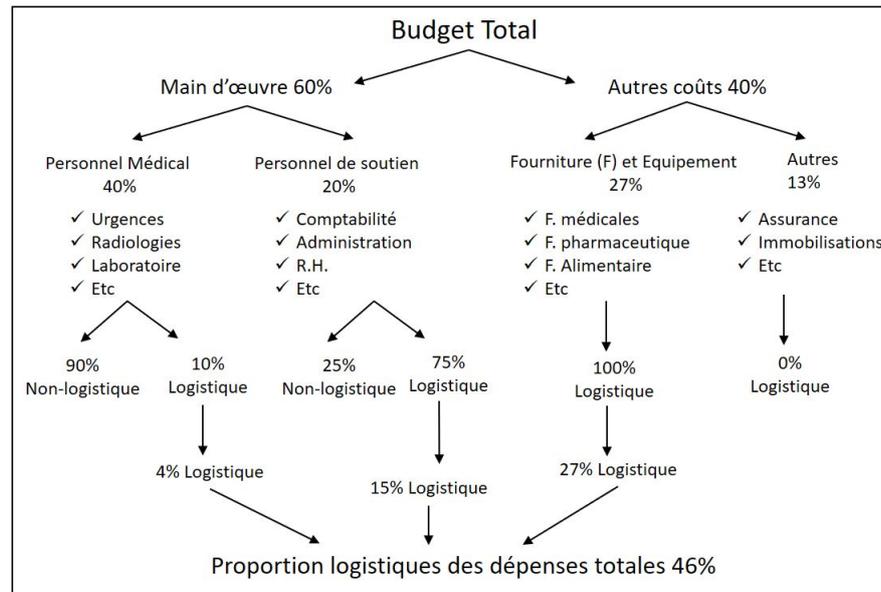


FIGURE 1.4 – Les coûts de la logistique hospitalière [G. CHOW, 1994]

(risque de rupture de stock), les flux physiques (patients, personnel médical, matériel de soins) afin d'offrir une qualité constante des soins. Dans ce contexte, [G. CHOW, 1994] explique l'importance des activités logistiques au milieu hospitalier par la présentation d'une estimation du poids de la logistique hospitalière sur le budget total d'un établissement de santé (figure 1.4). Montrant ainsi que 46% du budget total de santé sont consacrés aux activités logistiques (achats, réapprovisionnement des services). Ce pourcentage inclut les coûts de gestion du matériel dans des unités de soins, les coûts d'achat des différents produits (équipements, aliments, etc.) et les coûts de gestion associés à l'achat de ces produits. Cette liste n'est pas exhaustive mais elle montre la diversité des activités administrés par les services logistiques des hôpitaux. Sur la base de la figure 1.4 nous pouvons conclure que les activités logistiques ne sont pas seulement présentes dans tous les services de soins mais aussi elles sont coûteuses et il est primordial de les améliorer d'une manière significative.

La spécificité de la logistique hospitalière par rapport à la logistique industrielle réside d'une part dans son mode de fonctionnement qui est continu (24h/24h et 7js/7js) tout en veillant à accorder un haut niveau de sécurité, d'hygiène et de traçabilité aux patients (figure 1.5). d'autre part, l'existence des contraintes financières rigides. par exemple, en cas de dysfonctionnement (ou panne), il est extrêmement difficile d'avoir recours à un prestataire extérieur qui palliera momentanément le problème à cause des contraintes de procédures de l'achat publics, contrairement au mode de fonctionnement dans l'industrie.

La logistique hospitalière est intégrée donc dans des environnements de soins complexes caractérisés par des processus uniques et interdépendants englobant plusieurs unités organisationnelles. En outre et selon [ARONSSON H. et al., 2011] et [KANNAMPALLIL T.G. et al., 2011] les processus de soins sont majoritairement imprévisibles et cette imprévisibilité est spécifique au contexte de soins.

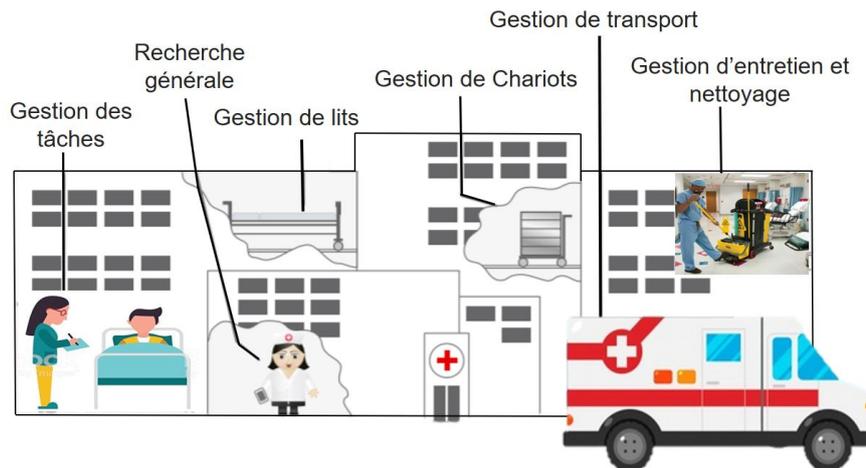


FIGURE 1.5 – La logistique hospitalière

Cette spécificité rend non seulement la standardisation de processus difficile [HELFERT, 2009] mais aussi implique la difficulté d'appliquer une approche orientée processus en santé [ARONSSON H. et al., 2011]. Dans la littérature plusieurs approches ont été appliquées afin d'améliorer la logistique hospitalière tels que le (business process reengineering)[KUMAR A., 2008], l'analyse comparative [APTEL O. et al., 2009], ainsi que la technologie de l'identification par radio-fréquence (RFID) et les codes à barres [CHIRCU A. et al., 2014], [ROMERO A., 2015], [ANAND A., 2013]. Ces deux dernières approches permettent la circulation et le suivi de l'information au sein du réseau logistique. Par conséquent, et afin d'améliorer la logistique hospitalière, il est primordial de mettre en place une stratégie permettant de transmettre les informations appropriées aux niveaux nécessaires tout en tenant compte de l'ensemble des flux. Ceci n'est possible que par la mise en œuvre d'un système d'information global couvrant la totalité du réseau logistique. En effet, depuis ces deux dernières décennies, l'hôpital commence petit à petit à s'ouvrir à son environnement, et valorise ainsi ses activités logistiques, afin de faire face à la complexité de ses missions. Cette complexité est due d'une part à la diversité des acteurs impliqués dans son réseau logistique et d'autre part à la nécessité d'intégrer les principes de réduction de dépense et de qualité des soins dans son mode de fonctionnement. En effet, l'importance de la logistique doit être reconnue dans les établissements de soins [RALSTON P.M. et al., 2013]. Néanmoins, il est important de comprendre qu'au sein d'un tel système toutes modifications apportées affectent forcément d'autres parties de ce même système. Ce qui rend les hôpitaux d'aujourd'hui les lieux de transformations/mutations en excellence.

Compte tenu de l'importance de la logistique hospitalière (LH) dans l'amélioration de la qualité de soins, plusieurs chercheurs se sont intéressés pour lui attribuer une définition. Par exemple, dans [COSTIN, 2010] les auteurs ont expliqué que la LH consiste à diriger les patients, les produits, les services, et les informations du fournisseur au destinataire. Les auteurs dans [SAMPIERI et al., 2000] présentent la LH comme une maîtrise des flux physiques et de la trajectoire des patients par les flux d'information. Ce qui souligne ainsi l'importance et la spécificité des flux de patients. Selon [LAN-

DRY et al., 2001] la LH est présentée comme un ensemble d'activités de conception, de planification et d'exécution permettant l'achat, la gestion des stocks et le réapprovisionnement des biens et des services entourant la prestation de services médicaux aux patients. Ces définitions confirment que la LH est cruciale au sein du système hospitalier car elle peut conditionner l'exécution de chaque prestation, qu'elles soient médicales, soignantes, pharmaceutiques, hôtelières, administratives, etc. Sans l'application de la LH la sécurité du malade et la continuité de la qualité de service offert sera immaîtrisable. Dans ce contexte, la définition qui englobe toutes les activités de la logistique hospitalière est donnée par [COSTIN, 2010] : « la logistique hospitalière s'inscrit dans la dynamique de la recherche de la performance globale où les activités sont organisées et structurées dans le but de la satisfaction des patients en termes de qualité, quantité, délai, sécurité et au moindre coûts. ». En se basant sur cette dernière définition, nous pouvons conclure que l'ensemble des activités de la LH s'orchestrent par les flux d'informations entre les différents acteurs de la chaîne logistique et surgissent sur les flux financiers.

Dans cette thèse nous nous intéressons particulièrement à l'organisation et l'optimisation des flux patient. Le but est d'étudier et de développer la modélisation, l'optimisation et la mise en œuvre d'un système d'aide à la décision (SAD) non seulement pour maîtriser et anticiper la tension mais aussi pour améliorer la prise en charge des patients. Ce SAD sera déployé dans les services des urgences adultes « SUA » du centre hospitalier régional universitaire « CHRU » de Lille.

## 1.7 Problématique

Suite aux mutations actuelles du secteur de soins, les établissements de santé endure de plus en plus d'un manque d'interaction et de cohérence stimulant la réflexion logistique dans les hôpitaux. En effet, la logistique hospitalière peut offrir d'importantes améliorations en termes d'optimisation de la prise en charge et de maîtrise des coûts. L'application réelle de la logistique au milieu hospitalier est une opération extrêmement minutieuse et complexe pour les logisticiens. Une partie de cette complexité est due au fait que les différents acteurs du secteur hospitalier (les organismes gouvernementaux, les compagnies d'assurances, les organisations professionnelles et les patients) peuvent juger et surveiller directement et indirectement le travail des acteurs de soins. Dans ce contexte, les acteurs du secteur hospitalier et des filières de soins doivent maîtriser efficacement les problèmes liés aux flux des processus (i.e., patients, informations, équipements et financier), à la restructuration qui se traduit en interne par la mutualisation des ressources, les plateaux techniques, etc. Or, les professionnels de santé ne sont ni préparés ni formés pour résoudre de tels problèmes. Il apparaît qu'ils sont démunis en méthodologies et outils d'aide à la décision et de pilotage adaptés aux exigences qu'impliquent leurs modes de fonctionnement futurs.

Notre domaine d'application est le SUA du CHRU de Lille. Ce SUA, comme la majorité des SU en France, est un service caractérisé particulièrement par la tension et de longs délais d'attente (plus de 10 heures). Ces longs délais d'attente peuvent mettre la vie des patients en danger.

Les tensions aux urgences cause donc une multitude de problèmes pour les patients et le personnel médical, notamment les temps d'attente excessif, une longue durée de séjour, une augmentation des erreurs médicales, une mortalité accrue des patients et un préjudice accru aux hôpitaux en raison des pertes financières, etc. En outre, ce phénomène touche en premier lieu les urgences. Néanmoins, il se propage rapidement dans les autres services de l'hôpital. Il est important donc de mettre en place des mesures visant à maîtriser le processus de gestion des urgences afin de sécuriser et améliorer la qualité de soins prodigués aux patients. Pour faire face à ce phénomène de la tension, le CHRU de Lille a déjà collaboré avec les chercheurs du projet ANR-HOST<sup>7</sup> (hôpital, optimisation, Simulation et évitement de la tension) qui a été appliqué pour les services des urgences pédiatriques. En ce qui nous concerne, dans cette thèse, nous sommes intéressés à élaborer un système d'aide à la décision afin d'anticiper la tension dans le SUA de CHRU de Lille. En effet, nos travaux de recherche présentent une suite du projet ANR-HOST dans le sens où nous traitons également le problème de la tension qui est aussi fréquent mais plus complexe dans le SUA.

La coopération avec le CHRU de Lille durant ces 3 ans de thèse, nous a amené à l'élaboration et la mise en oeuvre d'un système d'aide à la décision (SAD) pour améliorer la prise en charge des patients aussi bien en mode de fonctionnement normal qu'en mode tension. Ce SAD permet de résoudre d'une part, les problèmes au niveau dimensionnement et configuration et d'autre part les problèmes de planification, d'ordonnancement et de pilotage tout en établissant un lien direct en temps réel entre les performances requises sur le terrain et les actions afin de diminuer l'impact de la tension.

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le système de santé en France notamment les SU, et spécifiquement les SUA qui représentent le terrain d'expérimentation de notre étude. Nous avons expliqué également la complexité de la gestion de ces établissements. Cette complexité est due en grande partie à la rigidité de l'organisation des établissements de soins qui sont de nature très diverses. En suite, nous avons cerné le problème de la tension dans les SU en France, tout en montrant l'importance d'appliquer les approches de la logistique hospitalière, non seulement pour déterminer les zones de dysfonctionnement au sein de la chaîne logistique du SU, mais aussi pour anticiper les situations de la tension. Dans la suite de cette thèse, chaque chapitre comprendra une analyse détaillée, spécifique et répondra à des objectifs concrets et distincts afin de résoudre notre problématique.

---

7. <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-11-TECS-0010>

# Approches et outils de modélisation et d'optimisation utilisés pour la résolution de problèmes liés aux systèmes logistiques : Etat de l'art en santé

## 2.1 Introduction

Les systèmes logistiques en transport, en production, en entrepôts et en santé ont tous plusieurs aspects en communs. En effet, ils ont tous besoin d'outils de modélisation, d'optimisation, de simulation et d'évaluation pour améliorer leurs performances. Dans ce contexte, plusieurs dispositifs ont été adoptés dans le système hospitalier afin de résoudre des problèmes de nature variées dans des services différents [ESDAR et al., 2017], [CHEN et al., 2014], [DEEN, 2015]. En environnement incertain et avec des critères conflictuels, ces systèmes logistiques ont également besoin d'outils d'aide à la décision. Les paragraphes suivants présentent des différents modèles et méthodes d'optimisation dont certains méritent d'être étudiés, améliorés, innovés afin de les adapter au système logistique dans le domaine de la santé et plus particulièrement les urgences hospitalières, objet de cette thèse.

## 2.2 Méthodes de modélisation

La modélisation est la représentation d'un système par le biais d'un modèle pour comprendre son fonctionnement. Ce modèle est la représentation graphique (simplifiée) du mode de fonctionnement réel de ce système. Il consiste en la compréhension des causes d'un phénomène anormal par la détermination du dysfonctionnement local. Dans ce cadre, le choix de la méthode utilisée dans une étude, dépend fortement de la nature du service hospitalier concerné.

Les avantages de l'UML	Les inconvénients de l'UML
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Langage formel, stable et normalisé, qui offre une bonne précision ;</li> <li>- Support de communication performant, permettant de cadrer l'analyse et la compréhension des représentations abstraites complexes ;</li> <li>- Polyvalent et souple ce qui le rend un langage universel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en pratique risquée car la modélisation est totalement libre et les outils sont variés ;</li> <li>- Il doit être spécifié pour être utilisé dans un cadre précis sans risque d'erreur.</li> </ul>

Table 2.1 – Les avantages et les inconvénients de l'UML

Dans cette section, nous présentons les méthodes de modélisation les plus efficaces pour la logistique des services des urgences.

### 2.2.1 Modélisation UML (Unified Modelling Language)

L'UML est un langage de modélisation qui permet de documenter et de spécifier graphiquement tous les aspects des systèmes logiciels (tels que les applications informatiques ou les structures de données) et non logiciels tels que les activités d'un domaine spécifique (mécanique, biologie, etc.). Ce langage de modélisation est fondé pour unifier en une seule notation les meilleures caractéristiques des différents langages de modélisation orientée objet, notamment OMT (*object modeling Technique*) de James Rumbaugh, OOSE (*object oriented software engineering*) de Ivar Jacobson et la méthode de Grady Booch. En effet, le modèle graphique de l'UML est basé sur deux principales notions :

- La modélisation de la situation réelle (dans un environnement quelconque) au moyen de l'approche orientée objet.
- La construction des digrammes pour aider à l'analyse et la conception des systèmes. Ces diagrammes permettant de représenter les aspects statiques et dynamiques du système concerné.

Les différents diagrammes UML offrent plusieurs vues d'un système logiciel ou non logiciel en développement. Ces diagrammes sont interdépendants, ce qui exige la parfaite cohérence entre eux. Néanmoins, il est indispensable de corriger systématiquement les incohérences [SPANOUKAKIS et al., 2001]. Par ailleurs, l'UML permet de définir et de visualiser une solution sous forme d'un modèle, comme un support de communication à l'aide de diagrammes graphiques. C'est dans cette optique que ce langage est devenu la référence en termes de modélisation objet [AUGUSTO, 2008]. Dans le domaine de la santé, l'UML est utilisé par plusieurs chercheurs tels que [VASILAKIS et al., 2005], [STACCINI et al., 2001]. Par exemple, les auteurs dans [STACCINI et al., 2001] ont créé un modèle UML de données consacré à plusieurs processus hospitaliers, notamment pour le processus de transfusion sanguine. Ces auteurs ont proposé une méthodologie qui agence les besoins des patients en utilisant une analyse orientée processus. Le tableau 2.1 résume les avantages et les inconvénients de l'UML.

### 2.2.2 Modélisation Workflow

Le workflow, en français *le flux du travail ou gestion électronique des processus métier (PM)*, correspond généralement à la modélisation et à la mise en œuvre des processus métiers. La majorité des définitions existantes sont issues de la coalition de management de workflow (WfMC). La WfMC a été fondée en 1993 par un regroupement d'industries de l'informatique, de chercheurs et d'utilisateurs, associées à l'essor du développement des modèles Workflow. Cette coalition a pour but de promouvoir les Workflow et d'établir les standards pour les Workflow management system (WfMS), elle a en particulier publié un glossaire de référence contenant les terminologies employées dans ce domaine. Ces standards servent notamment à résoudre les problèmes d'interopérabilité entre systèmes Workflow mais également à définir les caractéristiques fondamentales de ces systèmes. Les documents publiés par la WfMC, qui couvrent plusieurs aspects, peuvent être considérés comme des références en la matière. Par conséquent, le Workflow est la représentation d'une suite de tâches ou des opérations effectuées par une personne, un groupe de personnes ou un organisme. Le terme *flux* renvoie au passage du produit, du document, de l'information d'une étape à une autre.

Pour résumer, la gestion d'un processus permet d'attribuer au bon moment et à chaque acteur les tâches dont il est responsable et de mettre à disposition les applications, les outils et les informations nécessaires pour la réalisation de ces tâches. Dans le contexte d'acteurs humains, le workflow permet de décharger ces acteurs de certaines tâches administratives de gestion, en leur laissant la possibilité de se concentrer sur les contenus techniques des tâches en rapport avec leurs compétences. De plus, le workflow donne la possibilité d'effectuer une activité de monitoring sur le déroulement des workflows.

Le workflow a pour objectifs :

- La modélisation et la gestion informatique de l'ensemble des tâches à accomplir par les différents acteurs impliqués ;
- Fournir à chaque acteur, les informations nécessaires pour la réalisation de chacune de ses tâches (date et heure, durée, ressources nécessaires, commentaires, etc.).
- Recevoir de la part de chaque acteur, les informations générées à la suite de la réalisation de chacune de ses tâches au profit de la bonne exécution du processus global.

D'ailleurs, le Workflow a été adoptée dans le domaine de la santé avec un grand succès [SALWAY et al., 2017], [SALMON et al., 2018], [ESDAR et al., 2017], [HOSSAIN, 2017]. Une étude de cette utilisation est détaillée dans la section.3.2.

**Le BPMN : le standard de modélisation des processus workflow** Aujourd'hui le workflow est de plus en plus utilisé pour modéliser et simuler des phénomènes scientifiques. Dans ce cadre, Le langage graphique utilisé est inspiré de l'UML. Ce langage est connu sous le nom de BPMN<sup>1</sup> « Business Process Modeling Notation » dont les composants de base sont : les activités, les événements, les transitions et les branchements conditionnels.

---

1. <http://www.bpmn.org>

	Bonita	Bizagi
Système d'exploitation	Unix, Linux, Windows, Mac Os	Unix, Linux, Windows
Pour qui	Les entreprises de plus de 500 employés de divers secteurs (finances, santé, télécommunications, gouvernement)	Les grandes entreprises de tous les secteurs (soins de santé, services financiers, etc)
Plateforme	-	Mobile
Fonctionnalité	gestion de déploiement	-

Table 2.2 – Tableau de comparaison entre les outils BPM

Plusieurs recherches ont été réalisées afin d'expliquer les méthodes et les outils de modélisation et d'optimisation d'un système hospitalier notamment dans les services des Urgences (SU) [JUN et al., 1999], [FONE et al., 2003], [DAKNOU, 2011]. Ces recherches ont démontré que la modélisation permet d'identifier les mécanismes qui lient les phénomènes à leurs causes en se référant à la réalité [AGGLETON et al., 2002]. Néanmoins, le choix de la méthode et de l'outil de modélisation appropriés se fait en fonction de la complexité du système étudié et des objectifs recherchés. Dans ce contexte, plusieurs outils workflow existent [LIU et al., 2011]. Les plus connus sont *Bonita* et *Bizagi* (tableau 2.2)

### 2.2.3 Les systèmes Multi-Agents (SMA)

#### 2.2.3.1 Définitions et concepts

Un SMA est un ensemble d'entités autonomes, rationnelles et interactives appelées agents. Un agent est une entité logicielle pouvant jouer un ou plusieurs rôles ayant un ou plusieurs comportements. Il peut représenter un être humain (agent médical, par exemple), un robot (agent mobile) ou encore un agent virtuel (programme informatique). Un agent a un état interne qui évolue dans le temps en fonction de son raisonnement interne et de ses interactions avec son environnement contenant d'autres agents ou objets passifs [MACAL et al., 2005]. L'environnement peut être le monde réel ou bien un univers virtuel modélisé de manière informatique. Les SMA sont proposés comme un paradigme innovant de conception pour concevoir, analyser et mettre en œuvre des systèmes informatiques complexes. Ils sont destinés à opérer dans des contextes dynamiques, distribués, imprévisibles. Ils sont situés à l'intersection entre l'intelligence artificielle (IA) et les systèmes distribués, d'où l'intelligence artificielle distribuée (IAD). Donc un SMA, permet la représentation décentralisée d'un système grâce aux agents [FERBER, 1999]. Il est également capable d'une part, de simuler les phénomènes complexes ou de résoudre un problème de manière distribuée, et d'autre part, de contribuer à la réduction de la complexité de la modélisation classique [BOUSQUET et al., 2002].

Selon l'étude de [WOOLDRIDGE et al., 1995], les principales propriétés des agents sont la réactivité (l'agent est capable de réagir avec l'évolution de son environnement), la proactivité (l'agent peut prendre des initiatives pour accomplir ses propres buts), la sociabilité (l'agent peut agir et

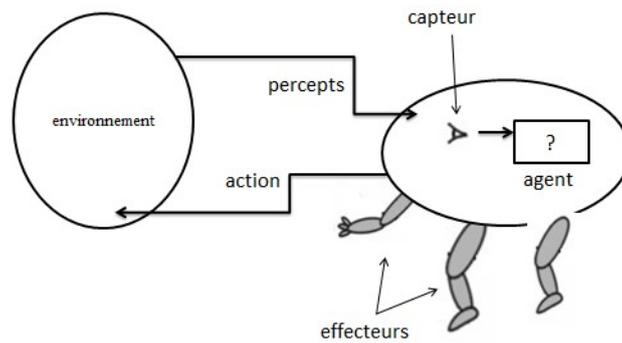


FIGURE 2.1 – Interaction de l'agent avec l'environnement [AFOUTNI, 2015]

échanger des informations avec les autres acteurs de son environnement), l'autonomie, l'adaptabilité (apprentissage) et la mobilité. concernant la sociabilité de l'agent, ce dernier ne peut pas contrôler l'intégralité de son environnement car il a une vision limitée de celui-ci. D'où l'utilité de coopérer avec les différents acteurs de son environnement. La figure 2.1 montre l'interaction d'un agent avec son environnement grâce à ses propres éléments d'interactions (capteur, perception, action).

IL existe trois types d'agents [KADDOUSSI, 2012]

- Agent réactif : un agent est réactif quand il réagit aux changements de son environnement par une action programmée. L'exemple le plus célèbre est celui de la fourmière [DROGOUL, 2000];
- Agent cognitif : il possède une mémoire et une connaissance propre de son environnement, des autres agents, ce qui lui permet de gérer ses interactions avec l'environnement et avec les autres agents. L'architecture agents cognitifs la plus connue est l'architecture BDI (Beliefs, Desires, Intentions) [RAO et al., 2000];
- Agent hybride : c'est la possibilité de combiner les deux premier types d'agents.

Le comportement d'un agent dépend non seulement de ses mécanismes internes mais aussi de son interaction avec l'environnement [TEAHAN, 2010]. Il existe plusieurs types de formes d'interaction [ZGAYA, 2007]. Les plus connues sont : la coopération, la collaboration et la négociation (cas de conflit). Une interaction entre deux agents est représentée généralement sous forme de séquences de messages utilisant un langage graphique tel que le langage UML (Unified Modeling Language) et le langage SySML (Systems Modeling Language), qui est une version avancée du langage UML, plus spécifique pour les applications d'ingénierie des systèmes. Les agents coopèrent lorsqu'ils sont collectivement motivés à atteindre le même objectif (agents non antagonistes). Dans ce cas, les agents ne sont pas en situation de concurrence, ils essaient donc de s'adapter entre eux sans se déranger. Pour coopérer, les agents travaillent ensemble pour partager les tâches et les ressources disponibles. La collaboration est donc une méthode de coopération qui permet la division du travail. La négociation correspond au cas où chaque agent est motivé individuellement

pour atteindre son propre objectif, malgré ceux des autres agents, tout en essayant de préserver une convergence rapide du système (agents antagonistes).

Nous pouvons conclure donc, qu'un SMA est un ensemble d'agents partageant un environnement commun, dans lequel chaque agent a ses propres caractéristiques. Ce dernier est en relation organisée avec les autres agents du système ainsi qu'avec son environnement. Par exemple, l'approche VOYELLES dans [PIERRE-MICHEL, 2001] est basée sur le fait que les SMA sont fondés sur quatre principaux aspects qui sont ; l'agent (les caractéristiques internes de chaque agent), l'environnement (où les agents interagissent et évoluent), l'interaction (les moyens permettant l'interaction entre les agents) et l'organisation (les moyens permettant la structuration de l'ensemble des entités). Concernant l'environnement agent, les auteurs dans [RUSSELL et al., 2016] expliquent qu'ils peuvent être de natures différentes :

- L'environnement accessible/non accessible : un agent a une connaissance complète de l'état d'un environnement accessible. Néanmoins, dans la plupart des environnements réels, les agents n'ont qu'une connaissance partielle de leur environnement ;
- L'environnement déterministe/non déterministe : le prochain état d'un environnement déterministe est établi par l'état courant de ce dernier et par l'action de l'agent ;
- L'environnement statique/dynamique : un environnement statique est caractérisé par un état qui ne change pas au cours du temps.
- L'environnement discret/continu : un environnement est discret si l'agent a un ensemble d'actions et de perceptions fixe et fini.

Un environnement d'agent est donc complexe lorsqu'il est inaccessible, non-déterministe, dynamique et continu. Par conséquent, les principales conditions pour lesquelles l'adoption de l'approche agent peut être intéressante ; c'est quand le domaine d'application est géographiquement distribué, ou bien quand une partie du système en question appartient à un environnement dynamique, ou encore quand les sous-ensembles du système doivent interagir entre eux de manière efficace. C'est le cas des systèmes hospitaliers que nous pouvons classer comme étant un environnement complexe puisqu'il est à la fois inaccessible, non-déterministe, dynamique et continu [DAKNOU, 2011], [ZGAYA et HAMMADI, 2016]. L'approche SMA a été également utilisée pour résoudre des problèmes dans d'autres domaines tels que le transport [DOTOLI et al., 2013], [HAMMADI et al., 2013], [SCHELTERS et al., 2017], la gestion de crise [KADDOUCI et al., 2009], [KADDOUCI et al., 2010]. Par exemple, dans [GARCÍA-MAGARIÑO et al., 2008], les auteurs présentent un modèle d'organisation orienté agent pour la gestion de crise optimisant les ressources humaines. Les auteurs précisent que le système a été mis en œuvre par la méthodologie INGENIAS dans l'objectif principal d'INGENIAS est de permettre une transition efficace de la spécification au code et de permettre à différents paramètres de tester le système à faible coût. Dans [SCHOENHARL, 2006], les auteurs proposent le système WIPER, basé sur une approche multi-agent, qui détecte les urgences et évalue les actions possibles liées à l'urgence. WIPER est conçu comme un système utilisant des services Web reposant sur une architecture orientée service.

### 2.2.3.2 Les systèmes Multi-Agents dans le domaine de la santé

Dans la littérature, plusieurs études scientifiques ont adapté l'approche agent pour modéliser et simuler des systèmes hospitaliers dynamiques telles que dans [HANCOCK et al., 1979]. En effet, des recherches récentes soulignent de plus en plus le potentiel de l'approche agent dans le domaine de la santé et notamment dans le service des urgences [GÜNAL et al., 2010], [STAINSBY et al., 2009]. Les techniques de modélisation à base d'agents selon [CABRERA et al., 2012] sont plus avantageuses lorsqu'elles sont appliquées à des systèmes humains dans lesquels les individus sont dotés de comportements complexes et stochastiques avec des interactions hétérogènes et complexes. Néanmoins, l'approche agent n'est pas seulement utilisée pour modéliser les systèmes complexes, elle est également utilisée pour les optimiser et les ordonnancer. Par exemple, dans [GATTA et al., 2018] les auteurs présentent un système d'aide à la décision médicale au profit d'un centre de cancer du rectum. Il s'agit d'un SMA, capable de gérer l'ensemble du processus de radiomique<sup>2</sup>. En effet, à partir des images médicales, le système peut extraire un ensemble de caractéristiques à analyser afin de générer un modèle prédictif optimisé. Dans [FDEZ-OLIVARES et al., 2018], les auteurs proposent un cadre de planification multi-agent pour la conciliation automatique de directives cliniques traitant à la fois des interactions médicales et les préférences des patients. Dans [FALCIONELLI et al., 2018], les auteurs utilisent l'approche agent pour élaborer un système de santé personnel adapté au suivi des patients diabétiques de premier niveau. Chacune de ces trois dernières références est le résultat d'un effort et d'une coopération internationale entre des chercheurs de différentes institutions avec des établissements de soins dans des pays différents. Ce qui souligne le besoin et l'importance de la mise en œuvre d'un tel système pour résoudre les problèmes logistiques en milieu hospitalier. En outre, plusieurs autres études ont utilisé l'approche agent dans les systèmes de soins à des fins multiples et différentes telles que dans [FENG et al., 2017], [S. B. OTHMAN, ZGAYA et al., 2017], [CALVARESI et al., 2019], ect.

## 2.3 Méthodes d'optimisation

### 2.3.1 Définitions et concepts

Dans cette section, nous présentons les différents concepts d'optimisation notamment l'optimisation au profit de la logistique hospitalière. Cette optimisation est souvent employée pour la mise en place de solutions permettant de fluidifier les différents flux physiques du système (eg. les patients). Dans ce cadre, optimiser permet non seulement de mobiliser et de coordonner les différents services, mais aussi de manager au mieux la gestion des ressources humaines et matérielles en fonction des besoins. Dans ce cadre, l'optimisation est employée au profit de la décision. Nous parlons donc des systèmes d'aide à la décision (SAD) dans lesquels des algorithmes d'optimisation sont intégrés. En effet, toute prise de décision repose sur un modèle formel ou non, explicite ou non. Par exemple, le médecin qui propose une thérapie ou un manager qui choisit

---

2. C'est une étude basée sur l'analyse des caractéristiques extraites des images médicales, utilisées pour des objectifs prédictifs.

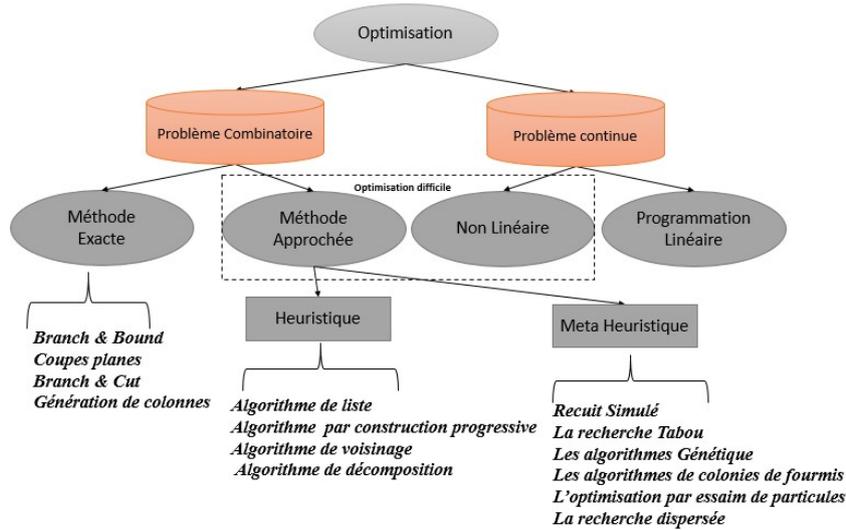


FIGURE 2.2 – La classification des méthodes d’optimisation générale [COLLETTE et al., 2011]

une stratégie. Ils font tous des hypothèses justifiées par des observations, circonscrivent le champ des actions possibles et évaluent les conséquences des actions sur des critères. Dans ce contexte, plusieurs recherches ont été faites autour de la résolution de ces problèmes. Ces recherches n’ont toujours pas abouti à des algorithmes polynomiaux permettant de résoudre ce type de problème en un temps raisonnable. La classe des problèmes d’optimisation est déterminée en fonction des algorithmes utilisés pour leur résolution [GAREY et al., 1979]. Un problème de décision peut être indécidable s’il n’existe aucun programme informatique qui permet de le résoudre. Il peut être aussi décidable lorsqu’il est considéré comme non traitable en pratique pour des raisons de trop grande complexité de calcul. D’où, la théorie de la complexité des algorithmes [CORNUÉJOLS, 1996].

Par ailleurs, il existe deux types de problèmes d’optimisation (figure 2.2) [COLLETTE et al., 2011] : les problèmes d’optimisation à variables continues comme les problèmes d’optimisation linéaire, et les problèmes d’optimisation combinatoire comme le problème du voyageur de commerce ou encore le problème du sac à dos [BARICHARD et al., 2002]. Dans ce contexte, il est indispensable de choisir la méthode d’optimisation adéquate pour un problème donnée.

- Problème d’optimisation continue : Les problèmes d’optimisation à variable continue sont des problèmes pour lesquels il n’existe pas actuellement un algorithme permettant de repérer l’optimum global en un temps imparti. Dans ce domaine, il existe plusieurs méthodes classiques connues sous le nom de l’Optimisation Globale (OG). Ces méthodes sont souvent inefficaces si la fonction objective ne possède pas une propriété structurelle, telle que la convexité. Une fonction  $f$  est dite convexe si :

$$\forall x, y, z \in \mathbb{R}, x < y < z \rightarrow \frac{f(y) - f(x)}{y - x} \leq \frac{f(z) - f(y)}{z - y} \tag{2.1}$$

Selon la figure 2.2 il existe deux classes de problème d’optimisation continue ; le cas linéaire

et le cas non linéaire. Ce dernier fait partie de l'optimisation difficile.

- Problème d'optimisation combinatoire : Mathématiquement, un problème d'optimisation combinatoire est défini comme la recherche de l'optimum (minimum ou maximum) d'une fonction objectif  $f$  donnée. Il consiste à détecter les meilleures valeurs des variables de décision selon la fonction objectif  $f$ , en tenant compte d'un ensemble des contraintes [PARDALOS et al., 2002].

Comme les problèmes d'optimisation dépendent absolument de la nature des variables continues ou discrètes. Dans le dernier cas, le problème est considéré comme un Problème d'Optimisation Combinatoire (POC) [PAPADIMITRIOU et al., 1998]. Tous les POC sont des problèmes à complexités exponentielle dits « NP-difficiles » c'est-à-dire dont la résolution exacte n'est pas possible en un temps de calcul proportionnel à  $N^n$ , où  $N$  exprime le nombre de paramètres inconnus du problème, et  $n$  est un entier tels que le problème de coloration de graphe et le problème de routage de véhicules. Généralement lorsque nous avons un POC nous avons tendance à nous référer aux méthodes approchées, dans ce cas, le choix sera donc entre une heuristique entièrement dédiée au problème considéré ou une méta-heuristique.

### 2.3.1.1 Optimisation mono-objectif

Un problème d'optimisation mono-objectif repose sur une seule fonction objectif qui fournit la meilleure solution possible, avec éventuellement un certain nombre de contraintes d'égalité ou/et d'inégalité [ZIDANI, 2013].

$$\begin{cases} \min f(x) \\ h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, m \\ g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, n \\ x^k \leq x \leq x^l \end{cases} \quad (2.2)$$

Où  $x \in \mathbb{R}^n$  est un vecteur de variable de décision,  $h_1, h_2, \dots, h_m$  et  $g_1, \dots, g_n$  sont les fonctions de contraintes d'égalité et d'inégalité,  $x^k$  et  $x^l$  représentent respectivement la borne inférieure et supérieure du domaine de recherche.

### 2.3.1.2 Optimisation multi-objectif

La majorité des problèmes d'optimisation évoqués dans la littérature sont des problèmes d'optimisation multi-objectif (POM) [BASSEUR, 2005], [ROUDENKO, 2004], [S. B. OTHMAN, HAMMADI et al., 2015]. Ces POM contiennent plusieurs objectifs avec généralement un ensemble de critères contradictoires à satisfaire. L'objectif des POM est non seulement d'arriver à optimiser simultanément plusieurs composantes de la fonction objectif mais aussi de trouver les meilleures solutions dans un ensemble de solutions possibles. Ces solutions sont appelées des solutions *Pareto optimales* car elles ne sont dominées par aucune autre solution possible satisfaisant les contraintes du problème d'optimisation [NIU et al., 2018]. Le choix d'une solution dans l'ensemble des meilleures solutions possible exige une connaissance du problème traité nécessitant l'avis d'un expert.

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, n \\ h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, m \\ x^k \leq x \leq x^l \\ x \in \mathbb{R} \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Avec :

$n$  : nombre de fonctions objectif,  $n \geq 2$ .

$x : (x_1, x_2, \dots, x_m)$  est les variables de décision

$f$  : ensemble des critères à optimiser

### 2.3.2 Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation

Les algorithmes utilisés dans la littérature pour l'optimisation des systèmes hospitaliers font souvent appel à des méthodes approchées [HASSAN, 2006]. Néanmoins, l'utilisation d'une technique de prétraitement peut être utile pour réduire la taille d'un problème afin de simplifier le processus de résolution.

#### 2.3.2.1 Méthodes exactes

Ces méthodes garantissent la solution optimale globale d'un POC pour une instance de taille finie en un temps de calcul limité [PUCHINGER et al., 2005]. Par contre, ces méthodes ne permettent pas de trouver la solution optimale d'un POC en un temps raisonnable pour des instances de grande taille.

1. **La méthode de séparation et d'évaluation progressive « Branch and Bound »** : cet algorithme, plus connu sous le nom de Branch and Bound en anglais, est une méthodologie fondamentale utilisée pour produire des solutions exactes, afin de résoudre les problèmes d'optimisation NP-difficile [MORRISON, JACOBSON et al., 2016]. Cette méthode a été utilisée pour le problème d'équilibrage de la ligne d'assemblage qui est un problème NP-complet [MORRISON, SEWELL et al., 2014]. La méthode Branch and Bound est basée sur deux étapes (figure 2.3), une étape de séparation et une étape d'évaluation : La séparation permet de diviser l'ensemble des solutions réalisables en des sous-ensembles et l'évaluation sert à borner l'intervalle de recherche, filtrer puis effacer les sous-ensembles qui ne comportent pas de solution optimale.
2. **La méthode de coupes Planes « Cutting Plane »** : cette méthode a été produite par [SCHRIJVER, 1986]. Elle est utilisée pour résoudre les problèmes d'optimisation linéaire ( $\min\{fx : Ax \geq b, x \in \mathbb{R}\}$ ). Pour qu'un POC de grande taille tienne dans un solveur de programmation linéaire, il faut éliminer la plupart des contraintes puis résoudre le problème relaxé. La solution optimale appartient à l'ensemble de solutions réalisables de cette relaxation.

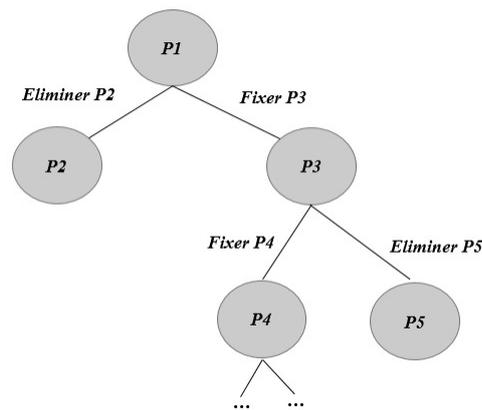


FIGURE 2.3 – Méthode de Branch and Bound

3. **La méthode Branch and Cut** : Les deux méthodes précédentes « Branch and Bound » et « Cutting Plane » sont peu performantes face à certains problèmes NP-difficiles. Par conséquent, la méthode « Branch and Cut » combine les efforts de l’algorithme Branch and Bound et la méthode Cutting Plane. En effet, pour résoudre un programme linéaire en nombre entier, cette méthode commence par résoudre une relaxation du problème, ensuite elle applique la méthode des coupes plane sur la solution trouvée. Néanmoins, si elle n’arrive pas à donner une solution entière alors le problème est divisé en plusieurs sous-problèmes qui seront résolus de la même façon.
4. **La méthode de génération de colonnes** : l’idée centrale de cette méthode est basée sur le fait que toutes les variables d’un programme linéaire ne sont pas forcément utiles pour atteindre l’optimalité. L’objectif est de résoudre un problème de petite taille avec un ensemble limité de variables (ou colonnes). Le problème original et le problème réduit sont nommés respectivement problème *maître* et problème *restreint*. La résolution du problème restreint est moins complexe, néanmoins, si l’ensemble de ces variables ne comportent pas celles qui garantissent la solution optimale du problème maître, il faut enrichir les variables du problème restreint afin d’atteindre la solution optimale du problème maître. Cette méthode peut être combinée avec la méthode Branche-and-Bound afin de résoudre un programme linéaire en nombres entiers.

### 2.3.2.2 Méthodes approchées

Les méthodes approchées permettent de résoudre des problèmes de grandes tailles. Les solutions trouvées sont souvent des solutions de bonne qualité mais pas forcément optimales. Nous pouvons classer ces méthodes en deux classes : les Heuristiques et les Méta-heuristiques.

- **Les Heuristiques** : Ces méthodes ne garantissent pas la solution optimale globale mais peuvent trouver une approximation de l’optimum. Dans le cas d’une minimisation monocritère, la valeur du critère attribuée à chaque solution est inférieure à  $\alpha C^*$  avec  $\alpha$  une constante connue tel que  $\alpha \geq 1$  et  $C^*$  la valeur du critère de la solution optimale. Cette approche est

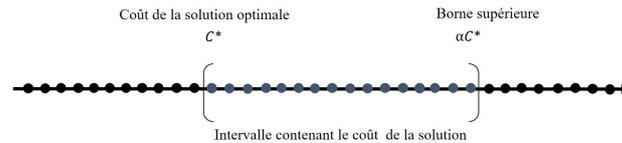


FIGURE 2.4 – L'encadrement de la solution dans l'algorithme d'approximation

appelée  $\alpha$ -approximation. L'optimum de la solution trouvée par l'algorithme est placé entre  $C^*$  et  $\alpha C^*$ . Alors l'approximation est plus efficace quand  $\alpha$  est proche de 1 (figure 2.4). Il existe deux catégories d'heuristiques :

- Méthodes constructives : permettent de générer des solutions à partir d'une solution initiale en insérant petit à petit des éléments jusqu'à ce qu'une solution complète soit obtenue ;
  - Méthodes de fouilles locales : commencent avec une solution initialement complète puis de manière répétitive essaient d'améliorer cette solution en explorant son voisinage.
- **les Méta-Heuristiques** : une heuristique est toujours spécifique à un problème donné tandis qu'une méta-heuristique est un schéma algorithmique applicable à différents problèmes d'optimisation. Ces algorithmes sont plus complexes qu'une simple heuristique. Ils utilisent des processus aléatoires et itératifs afin de regrouper de l'information faisant face à l'explosion combinatoire. Ces méta-heuristiques sont inspirées des systèmes naturels dans différents domaines comme [GENDREAU et al., 2010] : la biologie (algorithme génétiques, recherche tabou), l'éthologie (algorithme de colonies de fourmis) et la physique (recuit simulé).
    1. **Les Algorithmes Génétiques (AG)** : ce sont des algorithmes parallèles d'optimisation stochastique basés sur le mécanisme de la sélection naturelle. Ils ont été largement utilisés dans de nombreux domaines de l'informatique. John Holland était le premier à les utiliser pour des problèmes d'optimisation [HOLLAND, 1975], ensuite les travaux de David Goldberg ont contribué à les enrichir et les faire évoluer [GOLDBERG, 1989]. Les AGs sont des algorithmes fondés sur des mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique en respectant les phénomènes d'hérédité et la loi de survie énoncée par Darwin. Selon ces principes, les individus les mieux adaptés au milieu survivent et par conséquent peuvent donner une descendance. Les AGs ont pour but d'optimiser une fonction prédéfinie par l'utilisateur appelée critère ou fonction coût (*fitness en anglais*). Pour ce faire, l'algorithme travaille en parallèle sur une population de points candidats appelés individus ou chromosomes. Un chromosome est une représentation ou un codage (eg. chaîne, matrice) pour une solution d'un problème. Il est constitué d'un ensemble d'éléments appelés gènes, pouvant prendre plusieurs valeurs appelées *allèles* appartenant à un alphabet non nécessairement numérique. Le but est de rechercher la combinaison optimale de ces éléments qui donne lieu à un optimum. Dans ce contexte, le chromosome peut représenter implicitement des solutions nécessitant une procédure de décodage afin de récupérer une solution réalisable. À chaque *itération* ou *génération*,

nouvelle population est créée avec le même nombre d'individus. La première phase est le codage des solutions. Ensuite, à partir d'une première population de chromosomes de taille fixe, créée soit d'une manière aléatoire, soit par des heuristiques, les AGs génèrent de nouveaux individus de telle sorte qu'ils soient plus performants que leurs prédécesseurs. Le processus d'amélioration s'effectue par l'utilisation d'opérateurs génétiques qui sont la sélection, le croisement et la mutation.

2. **Les Algorithmes mémétiques (AM)** : les AG et les AM sont les algorithmes les plus connus pour résoudre efficacement les problèmes d'optimisation difficiles [FERRANTE et al., 2012]. En effet, les AM reprennent le principe de l'AG (sélection, croisement et mutation) en y ajoutant une recherche locale pour améliorer les nouvelles solutions. En effet, un AM utilise l'opérateur de croisement de l'AG pour examiner des régions prometteuses de l'espace de recherche, ensuite la recherche locale vient pour renforcer la recherche autour de ces régions. Un chromosome référence généralement une solution unique, mais il peut aussi être associé à un voisinage de solutions.
3. **La Recherche Tabou (RT)** : c'est une méthode inspirée de la biologie, introduite par Glover [HOLLAND, 1975]. La RT a prouvé son efficacité pour la résolution des problèmes d'optimisation difficiles. L'idée est de partir d'une solution initiale  $s$  dans un ensemble de solutions locales  $S$ , du sous-ensemble de solutions  $N(s)$  appartenant au voisinage  $S$ . Par l'intermédiaire de la fonction d'évaluation, la solution qui améliore la valeur de la fonction objectif  $f$  est choisie à partir de l'ensemble de solutions  $N(s)$ . En outre, l'algorithme peut accepter des solutions qui n'améliorent pas toujours la fonction objectif courante, il est important ainsi de mettre en place une liste tabou  $T$  de longueur  $Z$ . Cette liste  $T$  contenant les  $Z$  dernières solutions trouvées afin de garantir le non multiplication des solutions qui existent déjà dans la liste tabou. Cependant, la sélection de la prochaine solution se fait sur un ensemble de solutions voisines au-delà des éléments existant dans cette liste. Lorsque le nombre  $Z$  est atteint, chaque nouvelle solution sélectionnée remplace la plus ancienne dans la liste. Cependant, au lieu que la liste tabou garde en mémoire les solutions trouvées, elle peut garder les mouvements permettant d'atteindre ces solutions pour plus d'efficacité. Finalement, et pour arrêter la recherche tabou, il existe deux méthodes : fixer un nombre maximum d'itérations comme le critère d'arrêt, ou bien fixer un temps limite après lequel la recherche doit s'arrêter.
4. **Le Recuit Simulé (RS)** : cette méthode a été introduite par [KIRKPATRICK et al., 1983]. Elle démarre par une solution  $s$  générée de manière stochastique, une énergie initial  $E$  et une température  $T$  généralement élevée. Dans chaque itération, la solution courante subit des changements pour atteindre une nouvelle solution  $s_1$  :
  - Si la nouvelle solution est meilleure que la solution initiale  $f(s_1) < f(s)$  et elle permet à la fois d'améliorer la fonction objectif  $f$  et diminue l'énergie du système alors cette solution est acceptée.
  - Si la solution est moins bonne que l'ancienne, celle-ci sera acceptée et calculée avec

la probabilité de distribution de Boltzmann :  $e^{-\frac{f(s_1)-f(s)}{T}}$

5. **Les algorithmes de Colonies de Fourmis (ACF)** : cette méta-heuristique est inspirée des comportements des fourmis [COLORNI et al., 1992]. Ces algorithmes sont utilisés pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoires comme, le problème de voyageur de commerce [DORIGO et al., 1996], permettant de trouver des solutions approchées. Le principe de cette méthode est le suivant : un problème d'optimisation devient un problème de recherche de plus court chemin sur un graphe. Les fourmis constituent avec la même proportion des solutions en circulant sur la piste graphique, et choisissent par la suite les chemins contenant les plus fortes concentrations de phéromones grâce à leurs récepteurs.

### 2.3.3 Optimisation en santé

Aujourd'hui, le principal problème d'optimisation qui préoccupe les scientifiques et les médias c'est la gestion de la situation de tension dans les services des urgences (SU) [SALWAY et al., 2017]. Cette situation est due principalement à une organisation interne mal adaptée aux contraintes, aux changements des missions et à la gestion des flux patients. Par conséquent, la mise en place de systèmes stratégiques, tactiques, opérationnels et de contrôle, est un atout incontournable pour le développement du système hospitalier en général et des SU en particulier. Néanmoins, une mise en œuvre efficiente de ces systèmes exige l'adoption d'approches innovantes et scientifiquement adéquates pour gérer efficacement le réseau logistique hospitalier.

La gestion de la situation de tension dans les SU fait actuellement l'objet d'une analyse approfondie au niveau mondial [RICHARDSON et al., 2001], [LUSCOMBE et al., 2016]. Ce problème a fait l'objet de nombreuses recherches, notamment dans les pays développés [BAIR et al., 2010], [SPRIVULIS et al., 2006]. Le phénomène de tension est à l'origine de diverses difficultés pouvant être mesurées avec des indicateurs de performance tels que notamment l'augmentation du temps d'attente, la multiplication des erreurs médicales, les longues durées de séjours, etc [PAUL et al., 2010], [SALWAY et al., 2017]. La disponibilité des ressources humaines et matérielles est donc limitée, ce qui détériore non seulement la qualité des soins [BERNSTEIN et al., 2009] mais aussi la satisfaction des patients qui peuvent partir sans être traités [BAIR et al., 2010], [LIAO et al., 2002]. Les indicateurs les plus significatifs peuvent être identifiés par des praticiens expérimentés mais l'imprécision des données nécessite souvent la mise en œuvre de systèmes de fouille et d'extraction des connaissances sachant que ces données peuvent être distribuées, imprécises et imparfaites. L'objectif est d'identifier des indicateurs fiables et utiles pour la prise de décision. En conséquence, la résolution du problème de tension est devenue une préoccupation majeure pour les administrateurs et les experts de la santé, ainsi que pour les responsables politiques et les médias. Dans ce contexte, la plupart des pays développés sont intéressés par le développement de leur système hospitalier afin d'anticiper les situations de surpeuplement des urgences. L'objectif est d'améliorer la qualité des soins prodigués aux patients, en tenant compte de la demande croissante des soins et

des coûts de fonctionnement élevés associés à des contraintes budgétaires [RICHARDSON et al., 2001]. Par ailleurs, les travaux scientifiques étudiant cette problématique ont adopté diverses approches et outils de résolutions [D. HUANG et al., 2018], [SVIRSKO et al., 2019], [NAHHAS et al., 2017]. Dans la suite, nous présentons les SU ainsi que leurs fonctionnements et leurs caractéristiques tout en s'inspirant de différentes études scientifiques réalisées et de notre propre expérience.

### 2.3.3.1 Contraintes liées à la nature des SU

Les SU ont été reconnus pour la première fois au 20<sup>e</sup> siècle [B. J. M. ZINK, 2005]. Ce système est utilisé par tous les pays (Chine, France, Tunisie, USA...) et fournit des soins primaires aux patients dont les maladies ou les symptômes nécessitent une intervention immédiate. Ce qui rend la maîtrise de la situation très compliquée lorsque le flux des patients est important pendant un laps de temps court. Réduire cette complexité représente un atout principal au bon fonctionnement du service. Dans ce contexte, il est primordial de comprendre les raisons sous-jacentes de cette situation de tension. Par conséquent, plusieurs chercheurs accordent une grande attention à ce problème. Par exemple, les auteurs dans [SALWAY et al., 2017], [HWANG et CONCATO, 2004] et [MOSKOP et al., 2018] proposent une étude des causes et des impacts négatifs de la situation de tension dans les SU. Néanmoins, il est extrêmement difficile de définir les causes réelles de cette situation, dans la mesure où ces causes dépendent non seulement de plusieurs indicateurs, mais également de la position urbaine de SU. À cet égard, la majorité de ces études sont limitées comme le montrent les auteurs dans [AJMI et al., 2018], [B. ONGGO et al., 2017] et [WANG et al., 2015]. En effet, il est important d'élaborer des objectifs spécifiques pour chaque type de SU afin d'offrir des solutions efficaces et d'obtenir de bon résultat.

### 2.3.3.2 Contraintes liées aux personnels de soin

Aujourd'hui, les SU font face au problème de pénurie de différents types de ressources, en raison de la rareté de certaines et/ou de la non disponibilité des autres (cf.4.1). En outre, avec la longévité actuelle, les ressources médicales deviendront insuffisantes, ce qui augmentera le temps d'attente des patients et la durée de leurs séjours, engendrant ainsi un coût conséquent pour le système de santé [PATRICK et al., 2008]. Ces services sont donc confrontés à des demandes contrastées aux quelles les professionnels de santé ne sont ni préparés ni formés pour les résoudre. Il apparaît qu'ils sont démunis en méthodologies et outils d'aide à la décision et de pilotage adaptés aux exigences qu'impliquent leurs modes de fonctionnement futurs. Il faut donc apprendre à répartir efficacement les ressources et les services médicaux disponibles [BELIËN, 2007]. Ce qui crée le besoin de sélectionner la meilleure stratégie d'admission des patients [NEZAMODDINI et al., 2016]. Dans ce contexte, il faut non seulement prendre en considération l'ensemble de contraintes à respecter (les compétences médicales, les charges prévisionnelle, la réglementation de travail, etc.) mais aussi optimiser l'ensemble des tâches de soins à effectuer par les ressources disponibles et avec des performances pouvant être variables. Confirmant ainsi le besoin de la mise en œuvre d'un système d'aide à la décision au profit du personnel médical et des patients [MARCON et al., 2008].

Dans la littérature, les problèmes d'affectation et de planification des ressources ont initialement été évoqués dans l'industrie [EDIE, 1954], ensuite ces problèmes ont été abordés dans le domaine de la santé [MOZ et al., 2007], [TRILLING, 2006]. Par conséquent, différents modèles de simulation ont été développés pour modéliser les besoins en termes de capacité dans les SU [PAUL et al., 2010], [HOOT et al., 2008]. Les auteurs dans [KOMASHIE et al., 2005] ont prouvé qu'une allocation appropriée d'infirmiers et de médecins peut réduire les temps d'attente aux urgences jusqu'à 20%. En effet, l'affectation des ressources a une influence directe sur le débit du système et le taux d'admission des patients [DUGUAY et al., 2007]. Les auteurs dans [CABRERA et al., 2012] ont réalisé une simulation à base d'agents permettant de trouver la meilleure combinaison de ressources en fonction des compétences médicales. Ainsi le point commun entre toutes les études liées à l'optimisation des ressources dans les SU est la gestion du niveau élevé d'incertitude de la demande [CHETOUANE et al., 2012]. Dans ce contexte, plusieurs approches ont été utilisées. Par exemple, les auteurs dans [HOSSEINI et al., 2013] ont intégré un système expert flou avec une simulation à événements discrets afin de déterminer la configuration optimale et la meilleure affectation des ressources. Les auteurs dans [YEH et al., 2007] ont mis en place un algorithme génétique permettant de trouver la meilleure affectation possible des ressources. En effet, dans les SU, tous les patients partagent les mêmes ressources et chaque tâche de soins nécessite un temps qui varie en fonction du niveau de gravité de l'état du patient. Dans ce cadre, la simulation est l'une des méthodes les plus utilisées permettant de saisir les effets de l'incertitude au niveau du système. Le but est d'étudier et d'analyser les différentes combinaisons possibles d'affectation des ressources [KAUSHAL et al., 2015]. D'ailleurs, il existe d'autres méthodes permettant de résoudre des problèmes similaires [SONI, 2014] comme la théorie de la file d'attente et la programmation en nombres entiers. Le problème de planification dans les établissements de santé en général et dans les urgences en particulier devient donc de plus en plus complexe. Cela est dû au degré élevé de dépendance entre tous les services du système et aussi parce que l'environnement en lui-même est stochastique, ce qui complique la mise en œuvre d'une pré-planification des ressources.

Pour conclure, la complexité de l'affectation des ressources médicales est due au contexte dynamique, distribué et imprévisible du milieu hospitalier. Par conséquent, la résolution de ce problème d'affectation se fait en deux phases complémentaires qui sont : l'affectation efficace des tâches de soins aux ressources appropriées et le séquençage rationnel de ces tâches en considérant forcément l'ensemble des contraintes de précédence et des ressources. Néanmoins, ce n'est que récemment que la notion du degré de compétence d'une ressource médicale est considérée dans la littérature [DOAN et al., 2019]. En outre, plusieurs autres critères doivent être pris en compte pour la résolution de ce problème impliquant la nécessité de l'adoption d'une programmation multicritère. Ces méthodes de programmation multicritère doivent également améliorer l'ensemble des indicateurs de performance dans les SU tels que le temps d'attente des patients, la durée de séjour des patients, le nombre d'abandons, etc.

### 2.3.3.3 Facteurs à améliorer pour l'efficacité opérationnelle du SU

Le positionnement des SU au sein du système hospitalier rend la maîtrise de ses différents flux logistiques complexe. En effet, les SU accueillent 24h/24h des personnes qui ont pris la décision de venir tout seul ou qui sont envoyées par d'autres organismes de santé. Le manque d'un consensus commun pour la définition d'un *patient urgent* complique encore plus la tâche pour les logisticiens (par exemple; un patient est urgent pour un médecin peut ne pas l'être pour un autre médecin). Dans ce contexte, il est important de souligner quelques facteurs à améliorer afin de rendre le fonctionnement au sein des SU plus performant :

- Le parcours patient : l'amélioration du parcours patient dans les SU peut impacter positivement le fonctionnement au sein du service. C'est pourquoi plusieurs études scientifiques ont adopté ce type de stratégie. Par exemple, dans [GARRETT et al., 2018] les auteurs montrent que la mise en place d'un modèle de flux vertical peut améliorer l'efficacité du SU ainsi que la satisfaction des patients. Dans [McGUIRE, 1994], les auteurs ont créé des voies pour les soins externes afin d'accélérer la prise en charge des patients ayant des opérations de soins non urgentes. Cette technique a été produite plusieurs fois depuis, surtout que 85% des patients aux urgences n'ont pas le statut *urgent* [WILER, CHRISTOPHER et al., 2010], [WALLEY, 2003].
- Association des compétences aux tâches : il est primordial d'affecter chaque membre du personnel médical aux tâches de soins adaptées à ses compétences ainsi qu'au niveau de son expérience. L'idée est d'exploiter au mieux les compétences afin de les associer aux bonnes tâches. Ceci peut impliquer des améliorations efficaces au fonctionnement du SU [M. et al., 2006].
- L'optimisation par limiter les gaspillages (Lean Healthcare) : le Lean est connu principalement dans le domaine industriel. Cette méthode vise à reconfigurer les processus organisationnels afin de minimiser le gaspillages, assurer une meilleure productivité basée sur l'utilisation d'outils et de techniques d'analyse et la création d'une culture de l'amélioration continue [WOMACK et al., 1996]. Néanmoins, depuis quelques années, cette méthode a été adoptée dans le domaine de la santé [RADNOR et al., 2012]. Cette utilisation a impliqué la suppression des processus répétitifs et inutiles tels que les multiples enregistrements des patients à chaque fois qu'ils changent d'emplacement, la non synchronisation des processus de décharge qui provoque de longues durées de séjours pour les patients [OR et al., 2010]. Dans [RADNOR et al., 2012], les auteurs montrent que 51% des références se sont basées sur l'application du *lean Healthcare* dans les services de santé.

### 2.3.3.4 L'ordonnement en temps réel

L'évaluation du système hospitalier doit être faite sur un ensemble d'indicateurs de performance, qui doivent appuyer et renforcer le système d'aide à la décision mis en œuvre en faveur des fournisseurs de soins. Le meilleur moyen d'utiliser efficacement ces indicateurs est de mesurer le gap entre leurs évolutions de références et leurs évolutions en temps réel. Dans ce contexte, des méthodes d'orchestration de processus organisationnels (workflow) ont été utilisés dans la

littérature [F. AJMI, S. B. OTHMAN et al., 2018]. Le but est de ré-ordonnancer en temps réel et continuellement la planification en fonction de la situation réelle au SU. Dans les études de [Hoor et al., 2008] et [WANG et al., 2015], les auteurs se sont appuyés sur une analyse en temps réel définissant un seuil de surpopulation dans le SU. Au-dessus de ce seuil, une alarme est déclenchée pour éveiller le mode d'urgence, afin de gérer efficacement la situation de crise. Cette méthode est basée sur des données du SU en question, permettant d'observer de manière dynamique différents indicateurs de performance (IP), tels que la durée de séjour des patients, les patients qui partent sans être vus par un médecin, le niveau d'occupation des lits disponibles, etc. Dans ce contexte, les méthodes d'optimisation en temps réel ont été développées afin de prendre des décisions proches de l'optimum, en particulier lorsqu'un événement imprévu se produit dans le système [F. AJMI, S. B. OTHMAN et al., 2018]. C'est une approche adéquate pour le problème d'optimisation des soins, en particulier dans les SU, en raison de l'arrivée aléatoire des patients. La plupart des études récentes utilisent ces approches. Par exemple, dans [RIET et al., 2015] et [SAMUDRA et al., 2016] les auteurs présentent une revue de la littérature sur l'utilisation de la recherche opérationnelle pour la planification et l'ordonnancement des salles d'opération. Les auteurs dans [D.-N. PHAM et al., 2008] ont développé une perspective générale pour le problème du ré-ordonnancement par le développement de la formulation mathématique classique de l'ordonnancement job-shop, ce qui a réduit la durée des opérations de chirurgie. Les auteurs dans [ERDEM et al., 2012] ont développé un modèle de programmation linéaire et un algorithme génétique afin de minimiser les coûts engendrés par les perturbations des arrivées aléatoires des patients. Ils prennent en compte le coût du report ou de la préparation, et le coût du refus d'un patient. Un autre exemple est fourni dans [STUART et al., 2012] : les auteurs ont re-ordonné la séquence de l'unité chirurgicale afin d'incorporer les nouveaux patients en modélisant un problème d'ordonnancement mono-machine avec des dates d'échéance. Il existe également plusieurs approches pour le ré-ordonnancement en temps réel, telles que la planification, le ré-ordonnancement partiel et la régénération complète [VIEIRA et al., 2003].

## 2.4 Les indicateurs de performance clés (IPC)

Par ailleurs, un ou plusieurs IPC détériorés peuvent être à l'origine d'une situation de tension dans les SU. Pour améliorer ces IPC, il est primordial de savoir comment les mesurer et les analyser correctement. En conséquence, les IPC les plus mentionnés dans la littérature sont la durée totale du séjour, le temps d'attente primaire (c'est le temps d'attente avant la première prise en charge par un médecin), le détournement d'ambulance, le taux d'abandons (ce sont les patients qui partent sans être vus par un médecin), etc. Ces indicateurs de performance sont fortement corrélés à la situation de tension et aux mécontentement des patients.

Dans les SU, chacune de ces métriques mesure une valeur spécifiques [HWANG, MCCARTHY et al., 2011] et présente à la fois des avantages et des inconvénients. Certaines reflètent l'efficacité ou l'efficacité des prestations de soins offertes telles que la durée totale du séjours, d'autres reflètent

les délais telles que les différents temps d'attente dans le processus de soins, d'autres reflètent encore la sécurité des patients telles que le taux de mortalité [KHALIFA et al., 2015]. Néanmoins, pour le choix des IPC les plus appropriés, il n'existe pas actuellement un vrai consensus, ni dans la littérature ni par les praticiens. En revanche, il existe des échelles fréquemment utilisées telles que l'échelle Likert qui est une échelle de 7 points [NICOLAU GOZALBO et al., 2017] ou encore le processus Delphi [M. M. MADSEN et al., 2016] qui est une échelle de 6 points. Ce dernier processus permet la sélection des indicateurs de qualité grâce à la coopération des experts de santé. Encore une fois, il n'y a pas de consensus sur la meilleure échelle utilisée [GRACHT, 2012], [M. M. MADSEN et al., 2016].

L'idée d'enquêter sur les IPC les plus utilisés pour mesurer les performances des urgences, est notamment adoptée dans la majorité des pays de l'organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Par exemple, au Royaume-Uni, l'utilisation des IPC est appliquée dans l'ensemble des services de santé tels que dans le service de santé mentale [DODD, 2011], les SU, le service de traitement du cancer [LI et al., 2019]. Dans [SORUP C. M. et al., 2013], les auteurs présentent une revue qui décrit l'utilisation de plusieurs mesures de SU dans le système hospitalier au Danemark. Les auteurs dans [M. MADSEN et al., 2015] présentent une revue qui identifie au moins 202 indicateurs dans 127 différents articles incluant les principales typologies : satisfaction, processus, structure et résultat. Dans [WELCH S. et al., 2006] et [WELCH, ASPLIN et al., 2011], les auteurs présentent un état de l'art sur les métriques utilisées pour mesurer les performances des systèmes hospitaliers.

Dans cette section, nous déterminons la pertinence de chaque métrique afin d'enrichir à notre tour la littérature et aider ainsi les chercheurs à sélectionner les indicateurs qui correspondent le mieux à leur problématique. Pour la réalisation de cette partie, nous nous sommes basés sur une méthode d'enquête qualitative grâce aux plusieurs entretiens avec le staff médical ainsi que sur une palette de travaux de recherche (à partir de l'année 2000). Cette étude vise à analyser les IPC pour fournir à la direction du Service d'urgence adulte (SUA) de CHRU de Lille des informations d'appui afin qu'elle puisse prendre des décisions stratégiques. Les indicateurs de performance clés (IPC) sont utilisés pour mesurer et évaluer les effets de certains changements dans le SU [ABO-HAMAD et al., 2013a], [DUGUAY et al., 2007]. En effet, il est crucial de présenter chaque IPC à part entière en soulignant son principal objectif. Par conséquent, nous synthétisons à partir d'une palette de travaux de recherches, les avantages et les inconvénients de chaque IPC, la méthodologie utilisée et les résultats trouvés.

#### 2.4.1 La durée totale du séjour (DTS)

La DTS, plus connue dans la littérature par *Length of stay* [T. RUOHONEN et al., 2006], [KOMASHIE et al., 2005] représente la période passée par le patient dans le service, depuis son entrée jusqu'à sa sortie du système des urgences. C'est la métrique qui mesure la durée totale passée par le

patient dans le SU. Néanmoins, cette durée est fortement corrélée avec l'état de gravité du patient. Aujourd'hui, dans quelques pays le seuil de la DTS est fixé. Par exemple au Royaume-Uni, ils exigent que dans un délai de 4 heures, plus de 90% des patients doivent être libérés ou transférés dans une autre unité d'hospitalisation [MAYHEW et al., 2008], [IZADY et al., 2012]. Également, ce concept est utilisé au Canada avec quelques différences. Par exemple, pour les patients dont l'état de gravité est supérieur à 4 (tableau 2.5), leur DTS ne doit pas dépasser les 4h, et pour les patients dont l'état de gravité est inférieur à 4, ces derniers doivent être vus dans les 6h. En revanche, la détermination d'un seuil de la DTS oblige le personnel soignant à libérer leurs patients avant cette plage horaire. Ce qui peut provoquer des dégradations dans le processus de traitement, une mauvaise qualité du service, une déformation de l'identité clinique et des inconvénients néfastes sur la sécurité des patients [ORR, 2008], [MORTIMORE et al., 2007].

La DTS concerne l'ensemble des étapes du parcours patient depuis son enregistrement jusqu'à sa sortie ou son transfert [KOLKER, 2008]. Il n'est donc ni simple ni facile de déterminer le niveau local de dysfonctionnement du système à l'aide de cet indicateur. En outre, la DTS dépend également d'un ensemble de facteurs externes que le SU ne peut contrôler [PINES, DECKER et al., 2012], tels que le flux d'arrivée des patients, leurs états de gravité, la disponibilité des lits d'aval, etc. Les auteurs dans [LACALLE et al., 2010], [FREITAS et al., 2012] expliquent qu'un taux faible d'incidents graves peut provoquer un impact néfaste sur la valeur moyenne de la DTS. Dans ce contexte, de nombreux travaux de recherche se sont concentrés sur l'amélioration des performances du SU en termes de la DTS, en utilisant différentes méthodes quantitatives telles que l'analyse de file d'attente, la programmation mathématique, la programmation dynamique et la simulation.

Dans [KHALIFA et al., 2015], les auteurs utilisent des méthodes d'enquêtes quantitatives. Ils se sont basés sur les entretiens semi-structurés avec des cadres supérieurs ainsi que des chefs de services hospitaliers et des professionnels de performances. Ce qui a conduit à l'identification de cinquante-huit indicateurs de performances clés, classés en dix catégories, ceci est approuvé par la direction du service étudié. Les auteurs dans [MILLER, FERRIN et MESSER, 2004] ont également utilisé une méthode quantitative basée sur la coopération du personnel soignant. Ils ont identifié trois IPC, tels que la DTS, le taux d'occupation des lits et l'heure de déviation. Néanmoins, cette méthode reste limitée, car, elle est manuelle et dépend fortement de la participation du personnel médical et de leur expérience personnelle.

Dans [WELCH, AUGUSTINE et al., 2012], les auteurs ont effectué une étude d'analyse rétrospective des données dans un SU, plus une analyse comparative entre plusieurs SU. Leur principal objectif est de mesurer la performance du SU par rapport à la taille et aux caractéristiques de fonctionnement. Enfin, ils ont conclu que plus le SU est grand en taille plus la DTS est longue, et ils confirment également l'existence d'une corrélation forte entre le degré de l'état de gravité du patient et la dégradation de la performance au sein d'un SU. Pour améliorer la performance des SU au Canada (Colombie-Britannique), un programme de rémunération à la performance (ED

pay for Performance : EDP4P) a été mis en place en 2007 afin d'encourager financièrement les hôpitaux à réduire la DTS des patients aux urgences [CHENG et al., 2013]. Néanmoins, il est difficile de juger un tel programme en raison des vastes différences entre les SU (taille, type de prestations offertes, etc.). En effet, il est important de développer des objectifs locaux et spécifiques pour chaque type de SU afin d'offrir des solutions plus efficaces. Dans ce contexte, les auteurs dans [AMIR et al., 2016] ont abordé une approche permettant d'optimiser les examens des patients dans un SU. L'idée est de libérer rapidement le plus de patients possible vers d'autres services hospitaliers, afin de respecter une contrainte maximale (fixe ou dynamique) de la DTS. Pour l'extension du problème de planification, les auteurs ont proposé un algorithme de programmation dynamique afin d'incorporer une incertitude réelle (telle que l'évolution de l'état de santé du patient) ainsi qu'une méthode de simulation dédiée pour le triage des patients en temps réel. Cette méthode réduit le temps d'attente des patients néanmoins, elle ne peut être efficace que pour un petit nombre de patients. Le choix de l'utilisation des méthodes d'optimisation et de simulation par plusieurs chercheurs affirme qu'en agissant directement sur le temps d'attente global de patients, la durée du travail du personnel, le taux d'utilisation des blocs, la planifications des examens des services, des améliorations indirectes à la DTS peuvent être effectuées [CHAABANE et al., 2003], [AMIR et al., 2016], [AL-REFAIE et al., 2014], [LI et al., 2019]. Ces techniques ont montré que le passage d'un système mutualisé à un système dédié peut réduire la DTS à environ 9% [SONG et al., 2013].

#### 2.4.2 Le temps d'attente primaire (TAP)

Le TAP présente le temps d'attente du patient depuis son arrivée aux SU jusqu'à sa première consultation par un médecin. Cet indicateur est également appelée *Door-to-doctor time* [BOVE et al., 2017], ou temps avant médecin [BURSTRÖM et al., 2012], temps avant le premier traitement [CHONDE et al., 2013] ou encore temps d'attente [OREDSSON et al., 2011], [AHMED et al., 2009]. Néanmoins, la dernière nomination peut engendrer des confusions, en raison de l'existence de plusieurs types d'attente au sein du parcours des patients avant et après la première consultation (figure 2.5). Néanmoins, cet indicateur est comme la DTS, il est fortement corrélé avec l'état de gravité du patient. En effet, les patients qui ont un niveau d'état de gravité non élevé ont une probabilité faible d'être envoyés pour faire des examens complémentaire [ROBINSON, 2013], ce qui implique que leur TAP moyen est analogue à leur DTS moyen. Pour ce type de patients, ces deux indicateurs peuvent être appliqués indifféremment. En revanche, pour les patients urgents, le personnel de soins doit intervenir rapidement afin de minimiser le taux de mortalité qui est particulièrement lié au TAP [GUTTMANN, SCHULL et al., 2011]. Le TAP est donc l'un des indicateurs de performance le plus significatif pour les patients urgents, bien qu'il ne détermine qu'une partie du parcours des patients dans le SU ignorant ainsi les différentes autres étapes de ce parcours complexe. La figure 2.5 montre un exemple expliquant comment le temps d'attente est discrétisé par plusieurs temps d'attente intermédiaires dans le SUA. Par ailleurs, la satisfaction des patients est fortement corrélée à la rapidité des soins ainsi qu'au temps passé avec le médecin [WILER, GENTLE et al., 2010].

Dans ce contexte, il existe le concept de triage en fonction de la gravité du patient afin de cerner cet indicateur. Ce concept est utilisée par tout dans le monde [AZADEH et al., 2014], [ELALOUF et al., 2015], mais avec quelques spécifications à chaque pays, par exemple :

En Amérique : l'échelle (emergency severity index) ESI est un score en 5 niveaux élaboré par l'agence de recherche et de qualité pour les soins de santé américaine (Agency for healthcare Research and Quality) [SFMU, 2013]. Le tableau 2.3 explique cette échelle.

À Manchester : l'échelle informatisée de triage appelée « Manchester triage Scale » (MTS), élaborée en 1996 [SFMU, 2013] est détaillée dans le tableau 2.4.

Au Canada : l'échelle informatisée du triage appelée « Canadian Emergency Department Triage and Acuity Scale » (CTAS) a été mise en place en 1998 et largement adaptée dans les SU [SFMU, 2013]. L'échelle canadienne de triage et de gravité des services d'urgence est détaillée dans le tableau 2.5.

En France : l'échelle informatisée du triage appelée la Classification Clinique des Malades des Urgences « CCMU » composée des classes montrées dans le tableau 2.6 [SFMU, 2013].

Ce concept classe les patients selon la gravité de leur état de santé et définit pour chaque classe une norme de début de traitement. Ils spécifient également une limite de temps et une probabilité de conformité correspondante pour chaque niveau de gravité, de sorte qu'il ait au moins un certain taux de probabilité pour qu'un patient d'un niveau de gravité donné commence son traitement dans les bons délais [LI et al., 2019]. Les auteurs dans [RIBEIRO et al., 2016] utilisent la simulation à événements discrets (SED) afin d'évaluer l'impact des différents facteurs sur le TAP dans un SU d'un hôpital privé au Brésil. Leur analyse est basée sur un test d'influence de TAP en fonction de trois facteurs qui sont la modalité de triage (triage des adultes et enfants séparé), un nombre prédéfini des patients par heure et par médecin (un objectif fixé à 3 patients par heure) et une augmentation du nombre des médecins. Les résultats montrent que la combinaison de ces trois facteurs peuvent réduire le TAP de 23.4 minutes. En effet, l'utilisation de la SED aide à prévoir l'impact du changement de structure, du personnel et de processus dans les SU, ainsi qu'à la prise de décision par les responsables de santé. Dans [LIN et al., 2014], les auteurs utilisent un modèle de file d'attente pour influencer positivement le TAP. Ils ont conclu également qu'il est préférable d'augmenter le nombre des ressources médicales dans les structures d'aval plutôt que dans les SU. d'autres études similaires utilisent la simulation pour étudier et améliorer le TAP telles que dans [COOKE et al., 2002], [SUBASH et al., 2004] et [BURSTRÖM et al., 2012].

### 2.4.3 Les abandons des SU (ASU)

Le ASU, plus connu dans la littérature par *Left without being seen* [VANBRABANT et al., 2019], représente les patients qui ont abandonné les SU en attendant leur première consultation avec un médecin urgentiste jugeant ainsi que leur temps d'attente est considérablement long par rapport à leur attente psychologique. Prouvant ainsi que les patients sous-estiment souvent leur temps d'attente réel [BATT et al., 2015]. Les patients peuvent abandonner les SU à chaque étape de leur

<b>ESI 1</b>	Patient avec instabilité importante, doit être immédiatement pris en charge par un médecin, nécessite souvent une intervention pour être stabilisé.	Ce niveau représente 2% des patients et 73% des patients sont hospitalisés.
<b>ESI 2</b>	Patient potentiellement instable, doit être pris en charge par un médecin dans un délai inférieur à 10 minutes, nécessite souvent des examens complémentaires biologique et d'imagerie, un traitement et une hospitalisation.	Ce niveau présente 22% des patients et 54% des patients sont hospitalisés.
<b>ESI 3</b>	Patient stable, doit être pris en charge par un médecin dans un délai inférieur à 30 minutes, nécessite souvent des examens complémentaires biologique et d'imagerie.	Ce niveau représente 39% des patients et 24% des patients sont hospitalisés
<b>ESI 4</b>	Patient stable, peut ne pas être pris en charge rapidement par un médecin, nécessite peu d'examen complémentaire et doit normalement sortir en externe	Ce niveau représente 27% des patients et 2% des patients sont hospitalisés
<b>ESI 5</b>	Patient stable, peut ne pas être pris en charge rapidement par un médecin, nécessite peu d'examen complémentaire et doit normalement sortir en externe	Ce niveau représente 10% des patients qui ne présente pas d'indication à être hospitalisés

Table 2.3 – Niveaux emergency severity index (ESI)

<b>Niveau MTS</b>	<b>Prise en charge</b>	<b>Délai recommandé</b>
MTS 1	immédiate	0 Minute
MTS 2	Très urgente	10 Minutes
MTS 3	urgente	60 Minutes
MTS 4	standard	120 Minutes
MTS 5	Non urgente	240 Minutes

Table 2.4 – Manchester triage scale (MTS)

<b>Niveau de CTAS</b>	<b>Niveau d'urgence</b>	<b>temps d'attente limite</b>	<b>Niveau de conformité%</b>
1	Réanimation	immédiat	98
2	Très urgent	15 Minutes	95
3	Urgent	30 Minutes	90
4	Moins urgent	60 Minutes	85
5	Non urgent	120 Minutes	80

Table 2.5 – L'échelle canadienne de triage et de gravité des services d'urgence

Classification	Définition
CCMU P	Patient présentant un problème psychologique et/ou psychiatrique dominant en l'absence de toute pathologie somatique instable associée.
CCMU 1	État clinique jugé stable. Abstention d'acte complémentaire diagnostique ou thérapeutique c'est à dire examen clinique simple (exemple : angine, malaise non symptomatique, plaie sans suture, otite, etc.).
CCMU 2	État lésionnel et/ou pronostic fonctionnel stable. Décision d'acte complémentaire diagnostique (prise de sang, radiographie conventionnelle) ou thérapeutique (suture, réduction) à réaliser par le SMUR ou un SU (exemple : hypotension, entorse, plaie simple à suturer, fracture fermée, etc.).
CCMU 3	État lésionnel et/ou pronostic fonctionnel jugé pouvant s'aggraver aux urgences ou durant l'intervention SMUR, sans mise en jeu du pronostic vital (exemple : Malaise mal étiqueté, angor, douleur thoracique, respiratoire ou circulatoire, AVC, fracture ouverte, etc.).
CCMU 4	Situation pathologique engageant le pronostic vital sans gestes de réanimation immédiates.
CCMU 5	Pronostic vital engagé. Prise en charge comportant la pratique immédiate de manœuvres de réanimation.
CCMU D	Patient déjà décédé à l'arrivée du SMUR ou du SU. Pas de réanimation entreprise.

Table 2.6 – La Classification clinique des maladies aux urgences "CCMU"

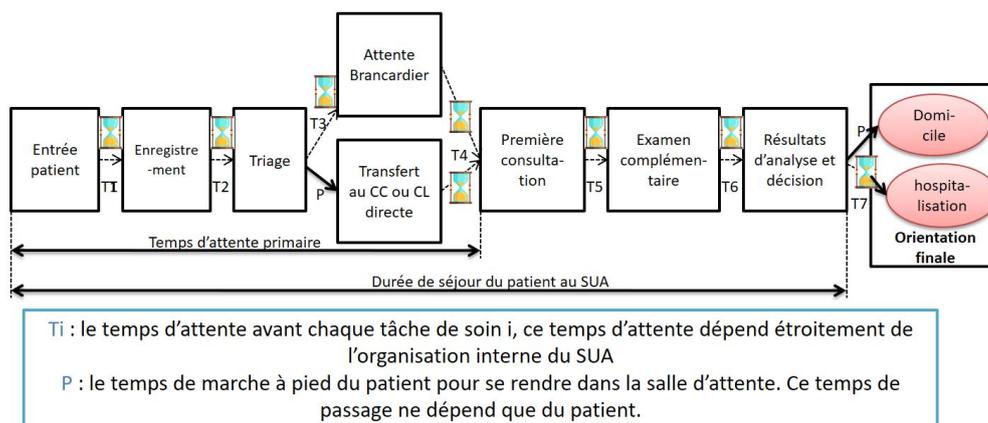


FIGURE 2.5 – Parcours de la prise en charge du patient dans le SUA.

processus de soins, provoquant ainsi des risques pour leur sécurité et des pertes financières pour le système de soin [GEIDERMAN et al., 2015]. Par conséquent, le ASU est fortement corrélé avec le temps d'attente global dans les SU [CARMEN et al., 2014]. En effet, pour réduire les ASU, il est impératif de prendre en charge rapidement les patients impliquant ainsi une diminution de TAP [BATT et al., 2015].

Par ailleurs, cet indicateur n'est pas significatif dans les mesures de performance des SU, en raison de sa forte variabilité en fonction du niveau de triage, de la localisation géographique du service (l'accès aux différentes structures de soins), les niveaux sociaux, l'âge du patient, etc. En outre, il est extrêmement difficile de mesurer le taux exact de ASU, car il est souvent lié à des données censurées ou manquantes [BATT et al., 2015], telles que le temps exact d'abandon. Ce temps n'est jamais donné parce que le personnel de soin ne sont pas capables de déterminer le moment exact de cet abandon. De plus, le nombre de ASU est minimal par rapport au nombre total des patients aux urgences. En raison de ses inconvénients, le ASU est rarement utilisé comme seul indicateur de performance clé dans les études de simulation. En revanche, 12% des études scientifiques l'ont inclus [VANBRABANT et al., 2019], généralement avec les indicateurs de mesures liés au temps [CRAWFORD et al., 2014], ou liés au budget [PINES, BATT et al., 2011].

#### 2.4.4 La réorientation des ambulances (RA)

Dans la littérature, la RA est plutôt connue par *Ambulance diversion* [SCHULL et al., 2003], désigne la réorientation d'une ambulance d'un SU à un autre SU voisin jugé moins encombré avec des lits disponibles et des compétences médicales adéquates avec la pathologie du patient. En effet, le SU encombré annonce son état de tension au service d'aide médicale urgente (SAMU) afin d'orienter les ambulances à d'autres SU moins encombré. Cette technique nécessite une coordination efficace entre les différents SU d'une région, afin de garantir un certain équilibre entre la capacité et la demande de soin [Do et al., 2013]. En revanche, les causes fréquentes de détournement des ambulances sont généralement l'indisponibilité des lits, l'absence de ressources médicales adaptées (neurochirurgiens, IRM, etc.), un nombre de patients élevé, etc [ALLON et al., 2013]. Dans [BURT et al., 2006], les auteurs révèlent que 44.9% des SU aux États-Unis subissent une période de détournement d'ambulance. Dans la littérature, les chercheurs utilisent des approches différentes pour cerner cet indicateur. Par exemple, la stratégie coopérative basée sur le modèle de file d'attente ou encore sur les chaînes de Markov, la simulation et la théorie des jeux [HAGTVEDT et al., 2009], [ALLON et al., 2013].

#### 2.4.5 Autres IPC

Dans la littérature, les IPC les plus utilisés sont ceux cités auparavant. En effet, bien qu'il existe une forte corrélation entre ces indicateurs et la situation de tension au sein d'un SU, il est extrêmement difficile de déterminer l'existence d'une tension dans les SU à base d'un seul indicateur. En outre, l'amélioration de ces IPC n'implique pas automatiquement une amélioration

significative de la situation de tension puisqu'un IPC pourrait être amélioré au détriment d'un autre. Par conséquent, il existe des scores multidimensionnels pour mesurer le niveau de tension dans un SU. Les plus connus sont l'échelle nationale de surpopulation des urgences [WEISS, ERNST, DERLET et al., 2005] et l'indice de travail des urgences [WEISS, ERNST et NICK, 2006]. Néanmoins, c'est la première échelle qui est la plus utilisée dans les systèmes hospitaliers. C'est un outil simple, il est calculé grâce à un modèle de régression linéaire combinant plusieurs critères (temps d'attente, nombre total de patients, nombre de lits, etc.) avec le niveau de tension évalué par le personnel de soins [WEISS, ERNST, DERLET et al., 2005]. En effet, le seuil de la tension est fixé à 100, c'est à dire que si le score de cette échelle est à 100 le SU est donc en situation de tension [WENG et al., 2011].

#### 2.4.6 Combinaison entre IPC

Suite à notre étude, nous pouvons conclure que chaque indicateur offre des informations particulières et limitées sur les performances, impliquant ainsi l'impossibilité pour chacun d'entre eux de déterminer seul, significativement l'état d'un système. Par conséquent, la combinaison entre ces indicateurs paraît pertinente [JEMAI et al., 2015], [SAGHAFIAN, AUSTIN et al., 2015]. En effet, dans la littérature, les chercheurs utilisent les IPC de deux manières différentes. Il y a ceux qui utilisent les IPC afin de mesurer et évaluer les effets des changements dans les SU (étude de simulation) [ABO-HAMAD et al., 2013b]. Par exemple, dans [KELEN et al., 2001], les auteurs expliquent que grâce à la mise en œuvre d'une unité de soins de courte durée pour les patients urgents le TAP a baissé de 5% et la RA a été réduite d'environ 4 heures/100 patients. Cette unité sert à évaluer et traiter les patients urgents. Le deuxième type d'étude est celui qui insère les IPC au centre de leur modèle d'optimisation (déclaré dans la fonction objectif) [SAGHAFIAN, HOPP et al., 2012]. Néanmoins, la réelle combinaison de ces IPC n'existe que dans le deuxième type d'études. Par exemple, pour le problème décisionnel dans [J. HUANG et al., 2015], les auteurs cherchent à sélectionner parmi les patients ceux qui sont en attente primaire et ceux qui sont en attente secondaire (ceux qui ont déjà été vus par un médecin). Pour résoudre leur problème, les auteurs prouvent qu'une politique de seuil pour la sélection entre ce deux types de patients est asymptotiquement optimale.

Dans la littérature, les indicateurs qui reviennent le plus souvent sont la DTS et le TAP. Néanmoins, dans la pratique, c'est la DTS qui est le plus utilisé car il est simple à observer et à calculer par le personnel de soin. En revanche, comme mentionné auparavant, cet indicateur ne peut pas déterminer seul, significativement l'état du système. En outre, la DTS dépend fortement des caractéristiques du patient (âge, type de pathologie, niveau de gravité) ce qui nécessite une grande précaution lors d'une comparaison des performances basée sur cet indicateur entre deux systèmes différents [OLSHAKER et al., 2006]. En effet, le TAP reste l'un des paramètres les plus significatifs en raison de sa corrélation directe avec le taux de mortalité ainsi qu'à la satisfaction des patients. Néanmoins, cet indicateur ne prend en considération qu'une partie du processus global du parcours patient. Par ailleurs, le TAP est un élément clé pour les ASU notamment pour les patients non urgents. Les ASU et la RA ont aussi été le sujet des études plus au moins approfondies, mais pas

Références	Méthodologie
[SALWAY et al., 2017], [HWANG et CONCATO, 2004], [MOSKOP et al., 2018]	Revue sur les problèmes de tension et l'application d'une analyse comparative
[BAIR et al., 2010], [HOOT et al., 2008], [KOMASHIE et al., 2005]	Simulation à événements discrets
[PAUL et al., 2010], [CHETOUANE et al., 2012], [HOOT et al., 2008]	Simulation
[ERDEM et al., 2012]	Optimisation exacte et heuristique
[CABRERA et al., 2012], [KAUSHAL et al., 2015]	Système multi agent
[HOSSEINI et al., 2013]	Système expert flou avec simulation à événements discrets
[YEH et al., 2007], [ERDEM et al., 2012]	Simulation et algorithme génétique
[F. AJMI, S. B. OTHMAN et al., 2018], [D.-N. PHAM et al., 2008]	Optimisation en temps réel
[ABO-HAMAD et al., 2013b], [HOOT et al., 2008]	Simulation pour mesurer les IPC (DTS, TAP)

Table 2.7 – Résumé des articles clés discutés dans cet état de l'art

autant que la DTS et le TAP. En raison de leur grande dépendance de paramètres propres au patient ainsi qu'à l'établissement de soin étudié.

Un résumé des articles clés discutés dans cet état de l'art, seulement ceux appliqués dans les SU, est présenté dans le tableau 2.7.

## 2.5 Positionnement

Dans la littérature, plusieurs travaux de recherche proposent des approches et des modèles afin de gérer les flux patients par les simulations et les analyses des bases de données. La technique de Simulation à Événements Discret (SED) est utilisée pour identifier les goulets d'étranglement, aider les décideurs à prendre des décisions efficaces et prévoir les indicateurs de performance sous certaines contraintes et conditions spécifiques. En effet, les SU utilisent fréquemment les SED pour prévoir les situations de tension. Dans [MILLER, FERRIN et SZYMANSKI, 2003] les auteurs proposent des scénarios de simulation pour améliorer la durée de séjour du patient dans le SU en montrant les changements requis dans les processus. Dans [BLASAK et al., 2003], les auteurs présentent une autre étude basée sur la SED des flux patients afin d'améliorer la durée de séjour dans le SU. Cette étude tient en compte de l'impact des autres unités hospitalières sur le SU.

D'autres travaux de recherche portent sur l'optimisation des processus de santé. Par exemple, dans [PODGORELEC et al., 2001] les auteurs proposent un système basé sur une approche d'algorithmes évolutifs qui minimise la durée du processus de diagnostics, en choisissant l'équipement le plus fiable. Les auteurs dans [DEMEESTER et al., 2010] proposent un algorithme de recherche tabou hybride pour le problème de l'admission des patients afin de trouver la meilleure attribution possible des lits de l'unité appropriée, en équilibrant le nombre de patients dans les différentes

unités de l'hôpital.

Cependant, la programmation stochastique pour l'optimisation des processus de santé n'est pas suffisante pour trouver des solutions efficaces dans le temps alloué [POWELL et al., 2005] en raison de leur aspect très dynamique. Dans ce contexte, la programmation dynamique (PD) fournit la technique appropriée pour concevoir les résultats de la planification en stratégies réactives pour un contrôle effectif en temps réel [BARTO et al., 1995]. Min et Yih [MIN et al., 2010] abordent un problème de planification dans une installation chirurgicale sous contraintes de capacité limitée en utilisant la PD stochastique et en tenant compte de la priorité des patients. La PD stochastique consiste à résoudre un problème multi-période qui implique l'incertitude, en le décomposant temporairement en sous-problèmes plus petits de manière coordonnée, puis en résolvant les sous-problèmes, du plus petit au plus grand en stockant les résultats intermédiaires [ZÉPHYR et al., 2017].

Dans le contexte de la PD stochastique, les Processus de Décision de Markov (PDM) proposent généralement la décomposition d'un problème en plusieurs sous-problèmes afin qu'un ensemble d'états puisse représenter les différentes configurations du système [PUTERMAN, 2014]. L'aspect de l'incertitude est modélisé par une fonction de distribution, qui décrit la probabilité d'atteindre un état à partir d'un autre pour chaque action. Le PDM présente un inconvénient majeur : la nécessité et le besoin d'intégrer dans la loi de probabilité toutes les informations recueillies depuis le début du processus, ce qui n'est généralement pas possible. La PD peut être utilisée en temps réel si l'ensemble du processus et les événements correspondants sont connus [HAN et al., 2004].

Les approches d'optimisation en temps réel ont été développées afin de prendre des décisions rapides en gardant une solution globale appropriée, surtout lorsqu'un événement inattendu se produit dans le système. Cette approche est adéquate pour un problème d'optimisation de soins, en particulier dans le SU où les patients arrivent aléatoirement. Un état de l'art concernant les méthodes d'optimisation en temps réel est présenté dans [JAILLET et al., 2010]; le temps de résolution est le critère le plus important pour ces méthodes. Par exemple, l'optimisation du planning de rendez-vous en radiothérapie présente une difficulté majeure en raison de l'incertitude, qui est aussi la principale caractéristique de l'arrivée des patients. Dans ce contexte, la majorité des chercheurs proposent généralement une approche d'ordonnancement prévisionnel hors ligne, mais les solutions proposées peuvent exploser les échéances (délais) et les coûts. Dans [ERDOGAN et al., 2015], les auteurs proposent une approche en temps réel afin de calculer le meilleur rendez-vous pour chaque arrivée de patient avec une taille du problème limitée (10 patients). Dans [SAURE et al., 2012], les auteurs proposent des processus de décision Markoviens pour résoudre le même problème. Ils obtiennent une solution appropriée pour plusieurs instances générées de manière aléatoire. Mais ils ne tiennent pas compte de toutes les informations générées depuis le début du processus de résolution. Dans le SU, la prise en compte de toutes les informations entrantes est importante pour optimiser le parcours patient en temps réel, en particulier lors d'une situation de tension. Il est bien connu que la situation de tension détériore les indicateurs de performance

hospitalières dans le monde entier, en particulier les temps d'attente.

Dans [ALEXANDROU et al., 2011], les auteurs présentent un système innovant de technologie de l'information qui fournit une solution en temps réel pour gérer le parcours de soins du patient. Ce système prend en compte les événements clés, les tests cliniques et les évaluations afin de produire les meilleurs résultats, tout en respectant les limites des ressources disponibles pour un cas spécifique de soins. Les parcours de soins impliquent l'utilisation des équipes à compétences multiples pour mettre en place les directives cliniques afin de réduire le temps d'attente des patients, les aspects d'incertitude et donc maximiser l'utilisation des ressources. Bien que ces points ne soient pas traditionnellement intégrés dans les architectures informatiques, de nombreuses propositions pour les formaliser apparaissent récemment [CROCKER et al., 2007].

En effet, les travaux de recherche dans cette thèse ont pour but d'étudier et de développer la modélisation, l'optimisation et la mise en œuvre d'un Système d'Aide à la Décision (SAD) non seulement pour maîtriser et anticiper la tension mais aussi pour améliorer la prise en charge des patients. Dans ce SAD, nous avons développé une approche dynamique innovante afin d'ordonner efficacement les patients. Cette approche est basée sur deux processus complémentaires. Le premier processus est l'ordonnancement. Il concerne la planification de tous les patients du SU en utilisant un algorithme mémétique (AM) minimisant une fonction objectif globale composée de plusieurs critères. Chaque critère correspond à un IPC. Le second processus est l'orchestration, utilisant un système multi-agent pour orchestrer de manière dynamique la planification du patient (défini par le premier processus) afin d'améliorer certains indicateurs de performance en temps réel en tenant compte de la disponibilité et des compétences du personnel médical.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que les établissements de soins et notamment les SU font face aux problèmes de modélisation et d'optimisation de leur organisation. L'étude révèle l'importance de la mise en œuvre des méthodes de modélisation et d'ordonnancement en temps réel afin d'améliorer significativement l'ensemble des IPC du système. Dans le chapitre suivant, nous détaillons la modélisation Workflow du SUA (terrain d'expérimentation) afin d'identifier les points de dysfonctionnement ainsi que leurs causes. Ensuite, dans le chapitre 4 nous présentons la mise en œuvre du SAD dotée de notre approche de résolution.



# Modélisation du parcours patient au SUA : vers un Workflow collaboratif d'exécution

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord le workflow du parcours patient dans sa globalité. Puis, en examinant le détail du mode de fonctionnements du SUA du CHRU de Lille, nous proposons une modélisation fine de ce parcours. Cette modélisation est établie non seulement pour étudier minutieusement les différents dysfonctionnements du parcours patient, mais aussi pour identifier les IPC pertinents qui impactent le plus souvent la tension au sein du SUA. Enfin, nous démontrons l'intérêt d'une modélisation complémentaire muti-agent permettant d'ordonnancer et d'orchestrer le workflow en cours d'exécution, et vue l'importance du SMA dans la gestion du workflow, nous en consacrons une étude détaillée dans le chapitre 4.

## 3.2 Les principes généraux du workflow et sa mise en œuvre en santé

Le workflow est la modélisation informatique des différents flux d'un processus au sein d'un système (cf.2.2.2). Il est utilisé pour permettre l'accélération des échanges entre les différents acteurs impliqués dans un processus. Le moteur du workflow permet d'exécuter les différentes tâches d'un processus en intégrant les données nécessaires à leur bon fonctionnement. En d'autres termes, chaque acteur récupère la bonne information au bon moment et injecte dans le système les informations générées suite à l'exécution de ses tâches. Les données sont soit volatiles (durée de vie limitée à l'exécution du processus) soit stockées dans une base de données (BDD), accessibles via une connexion sécurisée (figure 3.1). En d'autres terms, le moteur du workflow permet à un acteur d'accéder non seulement aux tâches à faire mais aussi aux informations associées. Une fois que cet acteur exécute une tâche demandée et la déclare comme terminée, le moteur du workflow notifie la fin de l'exécution de cette tâche et prévient le prochain acteur de début de la tâche suivante dans le processus. Le workflow est donc un outil de transfert et de transmission, ayant pour intérêt

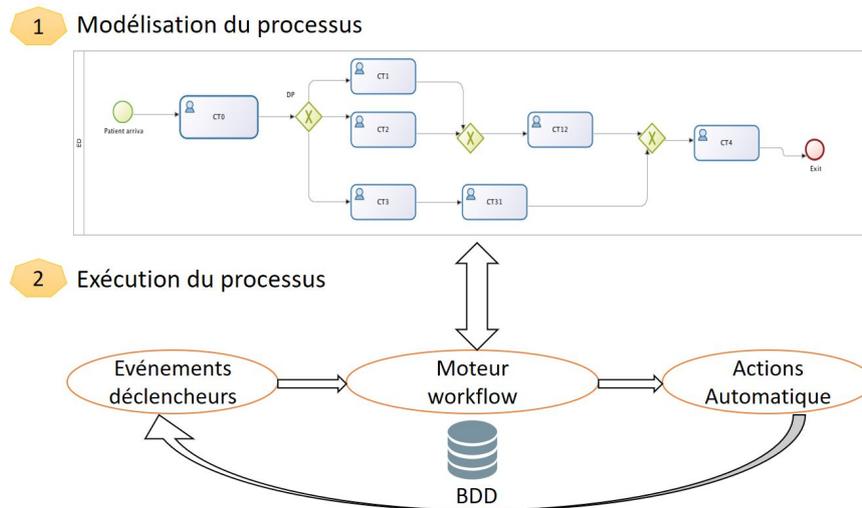


FIGURE 3.1 – Processus de gestion du Workflow.

principal de réduire le temps passé à l'échange des dossiers ainsi que le temps passé à regrouper les informations de traitement.

Le Workflow a apporté quelques fonctionnalités complémentaires telles que la gestion des formulaires électroniques, la gestion du cycle de vie des contenus et le suivi des dossiers en cours par les responsables de l'activité métier. La figure 3.1 résume les étapes principales pour la gestion d'un workflow qui sont :

- La création du processus avec un langage graphique de modélisation comme le BPMN [BASU et al., 2002] (cf. 2.2.2).
- Le contrôle et la mise en œuvre de ce processus : cette étape est basée sur la création de plusieurs instances du modèle workflow. L'exécution de ces instances est réalisée à l'aide des données et des ressources adéquates [STORMER, 2003]. Pour ce faire, il faut déclarer un ensemble de variables afin d'identifier les tâches exécutées des tâches non exécutées ainsi que les résultats obtenus [KAMATH, 1999]. L'étape d'exécution du modèle est réalisée grâce au moteur workflow ainsi qu'à l'utilisation des applications informatiques, des interfaces homme-machine et des ressources disponibles. Ce processus est acheminé d'un support informatique à un autre afin que chaque acteur exécute sa propre tâche, tout en respectant la relation de précedence entre les tâches [ZHENG et al., 2010].

### 3.2.1 L'utilisation du workflow dans le domaine de la santé

L'utilisation du workflow en santé commence à avoir de l'ampleur, dans [HALES et al., 1991] les auteurs présentent le workflow comme suit : "Le management d'un workflow est réalisé par un système proactif pour la gestion d'une série de tâches qui sont transmises aux participants appropriés dans le bon ordre et qui sont complétées dans des temps donnés... ". Cette définition met en exergue les termes fondamentaux suivants :

- Un système proactif : c'est un système qui génère et satisfait des objectifs, contrairement à un système réactif. Son comportement n'est pas seulement conditionné par des événements, mais aussi par des considérations internes au système ;
- Les participants appropriés : sont les acteurs ou les ressources qui peuvent être aussi bien que des personnes que d'entités logicielles ;
- Le bon ordre : les tâches peuvent être liées entre elles par des contraintes de précédence. Autrement dit, une tâche doit débiter (ou finir) avant le commencement de la tâche suivante.

Cette définition du workflow a été mise en application dans le système hospitalier avec succès. D'où la multiplication des travaux de recherche dans ce domaine [SALWAY et al., 2017], [SALMON et al., 2018]. En effet, le workflow est souvent utilisé pour modéliser et déterminer les difficultés de la prise en charge des patients dans les différents services. L'utilisation de ce paradigme a apporté des améliorations des performances dans les services [DEELMAN et al., 2009]. Cet outil est utilisé par plusieurs chercheurs tels que : les auteurs dans [BRICON-SOUF et al., 1999] ont testé les activités d'un service des urgences ; les travaux de [KOMASHIE et al., 2005] permettent aux responsables de détecter les causes latentes des temps d'attente excessifs ; dans [LEE et al., 2010], les auteurs ont analysé les flux patients et les temps de débit ; les auteurs dans [AALST et al., 2003] proposent une extraction du flux de travail afin de faciliter sa conception ; Les auteurs dans [ESDAR et al., 2017] utilisent le flux de travail pour modéliser la logistique des informations cliniques en visant à décrire et à expliquer divers phénomènes de fourniture d'information. Le but de cette dernière étude est de mener des processus cliniques.

Par ailleurs, les difficultés actuelles des services des urgences sont plus liées aux exigences des patients qui cherchent toujours à avoir un traitement rapide et de qualité ainsi qu'au vieillissement accrue de la population [CHINOISI et al., 2012]. Ainsi, l'augmentation des flux patients présente une contrainte d'efficacité de la prise en charge rapide de ces derniers. En effet, les scientifiques d'aujourd'hui font face au problème de fournir un système de santé efficace pour le patient tout en assurant sa continuité et son évolution pour les prochaines générations [CHEN et al., 2014], [J. et al., 2013], [HOSSAIN, 2017]. Par conséquent, les nouvelles approches tentent sans cesse de modéliser et d'optimiser simultanément ces parcours de soins en utilisant des techniques de planification et de workflow intégrées dans le même système [MELI et al., 2014]. En conséquence, la mise en œuvre d'une stratégie pour optimiser les ressources humaines et techniques tout en maîtrisant les coûts présente un besoin universel dans le secteur de la santé [TAYLOR et al., 2007].

### 3.2.2 Les avantages de l'automatisation des processus en santé

L'utilisation des outils informatiques dans le domaine de la santé permet aux services de soins d'améliorer continuellement leurs qualités de soins prodigués aux patients. Néanmoins, la disponibilité et l'accessibilité d'un grand volume de données et l'incorporation de ces outils et logiciels informatiques divers créent de nouvelles exigences à la gestion de la collaboration

entre les différents services du système hospitalier. Dans ce contexte, le workflow en santé permet non seulement de modéliser et de gérer les différentes activités médicale et/ou administratives mais aussi d'assurer la parfaite interconnexion des différentes tâches des processus de soins. Ces tâches sont réparties convenablement entre les différents membres du personnel soignant grâce aux systèmes d'informations et aux bases de données intégrées. En effet, la mise en œuvre d'un système de gestion du workflow en santé peut améliorer les IPC du service récepteur de ce système. Par exemple :

- **Rend le service plus efficace** : du point de vue de l'élimination des tâches répétitives ;
- **Pouvoir contrôler les flux** : une meilleure gestion du processus de soins grâce aux outils de collaboration standardisés.
- **parcours patient rationnel** : diminuer le stress du personnel soignant et du patient, ce qui améliore la qualité du service offert ;
- **parcours soignant rationnel** : simplification du processus de travail grâce à une vue orientée sur les flux.

Ces points impliquent directement les avantages suivants :

- **La flexibilité** : grâce au contrôle du processus, il est possible de le modifier dynamiquement en faveur de patient ;
- **L'optimisation** : l'ordre des tâches peut être calculé algorithmiquement, impliquant ainsi des améliorations certaines par rapport aux solutions informelles ;
- **La sécurité** : pour chaque acteur de soins, les droits et les privilèges pour réaliser une action du processus sont prédéterminés de manière précise.

En effet, et grâce à ces précieux avantages, l'utilisation du workflow pour gérer les processus de soins est essentielle dans les systèmes de santé. Cette utilisation permet de réformer les services de soins en subissant une évolution informatique qui est en constante croissance depuis cette dernière décennie. Cette évolution informatique touche notamment la gestion de la chaîne logistique, la coopération inter-hôpital et les services de sous-traitance.

### 3.2.3 Le schéma classique du workflow

Un workflow peut être composé d'un ensemble de processus interdépendants. Un processus est composé par un ensemble d'activités inter-reliées par plusieurs transitions. Dans ce contexte, le tableau 3.1 présente les importants types de conditions et d'acheminement de ces transitions. Par ailleurs, la modélisation d'un workflow nécessite un langage graphique comme le standard BPMN « Business Process Modeling Notation » (cf.2.2.2). Le BPMN intègre quatre composants graphiques de base : les activités, les événements, les transitions et les branchements conditionnels. Néanmoins, le BPMN présente des limites que nous présentons dans la section suivante.

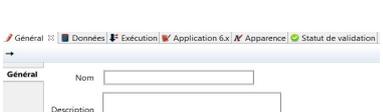
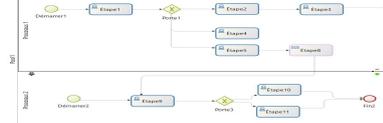
<b>La jonction</b>	la jointure de plusieurs fils de contrôle à un instant donnée	
<b>L'itération</b>	c'est l'action de répéter une même séquence de processus	
<b>La pré-condition</b>	c'est la condition de démarrage de l'exécution des opérations dans un processus	
<b>La post-condition</b>	c'est le contrôle explicite de l'ordre de la fin d'exécution des opérations dans le processus	
<b>L'acheminement parallèle</b>	un ensemble de processus peut être exécuté parallèlement	
<b>L'acheminement séquentiel</b>	un ensemble de processus peut être exécuté séquentiellement	
<b>Le branchement multiple</b>	le fil de contrôle est découpé en plusieurs fils parallèles	
<b>Le branchement conditionnel</b>	orientation de plusieurs flux activités afin d'exécuter un fil de contrôle	
<b>Le rendez-vous</b>	la convergence de plusieurs fils de contrôle	
<b>La Transition</b>	passage d'une étape à une autre grâce aux conditions de transitions	

Table 3.1 – Les types des conditions et d'acheminement de transition du workflow

### 3.3 Les limites du BPMN

Bien que le BPMN présente plusieurs avantages (cf. 2.2.2), il présente également un certain nombre de limitations. En effet, les outils de modélisation utilisant le BPMN permettent rarement de simuler les modèles élaborés (par exemple Bizagi, Bonitasoft version.4). Cela implique que la simulation d'un modèle de processus n'est pas toujours possible directement suite à sa modélisation, mais plutôt, après sa transformation en langage propre à un logiciel de simulation. En effet, la transformation manuelle d'un modèle de processus à un modèle de simulation provoque quelques problèmes tels que la nécessité d'une grande connaissance en langage de simulation afin de pouvoir le transformer. Cette transformation est un processus long et engendre facilement des erreurs humaines. Dans ce cas, pour modéliser un processus nous sommes contraints à maîtriser au moins deux langages (un langage de modélisation de processus métier et un langage de simulation). Par ailleurs, un diagramme BPMN ne fournit pas une représentation visuelle de certains éléments couramment utilisés dans un modèle de simulation tels que les files d'attente et les ressources. Donc, le BPMN présente certaines limites pour modéliser des processus complexes, notamment la capacité de représenter des files d'attente et des points de décision basés sur des données. Dans la littérature, deux travaux intéressants permettent de contrecarrer ces limitations :

- un modèle conceptuel correspondant à une extension du BPMN (BPMN4SIM) basé sur une architecture dirigée par des modèles [B. S. S. ONGGO et al., 2018];
- un modèle conceptuel correspondant à une architecture multi-agent dans laquelle chaque agent dispose d'informations en temps réel sur le patient, telle que l'évolution de l'état du patient pour orchestrer le flux de travail [BEN OTHMAN et al., 2016]

Dans nos travaux de recherche, nous avons choisi d'adopter la deuxième option, en raison de la possibilité de combiner la modélisation et l'optimisation en utilisant des techniques de planification et de workflow intégrées dans le même système. Par conséquent, il est nécessaire de présenter les aspects du workflow collaboratif.

### 3.4 Approche collaborative du workflow

La notion de la collaboration a montré ses avantages dans divers domaines tels que les réseaux sociaux, la sous-traitance, les situations de crise, les collaborations professionnelles [BARTHE-DELANOË, 2013]. Ce qui incite les organismes de santé, les personnels soignants ainsi que les systèmes connectables (appareils, capteurs) à collaborer ensemble afin de faire face à l'environnement stochastique des systèmes de soins. En effet, les hôpitaux d'aujourd'hui cherchent à devenir un vaste réseau de personnes et d'appareils qui exécutent conjointement des processus collaboratifs. Dans ce contexte, nous avons choisi d'opter pour l'approche du workflow collaboratif pour la modélisation de notre SUA. Notre choix s'explique par la capacité de cette approche à offrir non seulement à l'ensemble du personnel médical d'intervenir pour valider et/ou modifier l'acheminement du processus de soins à tout moment mais aussi à rendre ce dernier plus flexible par rapport aux modifications imprévues. Néanmoins, l'optimisation de l'exécution d'une instance du processus ne peut être

réalisée à ce stade.

Par ailleurs, l'exécution du workflow collaboratif nécessite quatre étapes principales qui sont ; **la négociation** (e.g, chercher une ressource disponible), **l'accord** (e.g, la ressource valide sa disponibilité), **l'allocation** (e.g, allouer la ressource pour l'exécution d'une tâche donnée) et **la vérification** (e.g, vérifier l'exécution de la tâche). Par conséquent, l'approche du workflow collaboratif en santé garantit à l'ensemble des acteurs de soins de coopérer pour atteindre un objectif commun.

### 3.5 Les modes d'exécution des workflows collaboratifs en santé

L'exécution d'un workflow collaboratif nécessite l'implication d'un ensemble d'acteurs afin de contrôler et de gérer les processus. Cette exécution se fait selon un protocole défini (figure 3.2) :

- Le partage des tâches : un ensemble de personnel soignant peut être alloué à une tâche pour l'effectuer selon des règles déterminées par le protocole médical. Nous parlons dans ce cas d'une tâche de soins multi-compétences ;
- L'exécution partagée : les parties du workflow sont distribuées entre le personnel soignant et peuvent être exécutées en parallèle. Sachant que les acteurs du même processus ne connaissent pas forcément l'état des instances de workflow de leurs collègues. Cependant, les interactions entre les instances se font selon un protocole commun ;
- Le mode d'exécution : le mode d'exécution pour une instance donnée du workflow correspondant à un seul patient se fait d'une manière séquentielle. Néanmoins, l'ensemble de tâches correspondant à plusieurs patients peut se faire d'une manière parallèle (e.g. un infirmier qui prépare un patient et un médecin qui examine le compte-rendu de la prise de sang) ;
- L'exécution hiérarchique : le workflow est distribué hiérarchiquement entre les acteurs de soins. Par exemple, le médecin peut céder une tâche à un infirmier. Dès que ce dernier effectue cette tâche, le médecin reprend le contrôle ;
- L'exécution des instances du workflow : l'ensemble des acteurs dispose d'une vue globale du workflow. Néanmoins, seules les instances des tâches en cours d'exécution sont transférées aux acteurs du processus par soucis de vérification (compétence par rapport au type de la tâche) et d'équilibrage de charges.

### 3.6 Terrain d'expérimentation : le service des urgences adultes (SUA)

Comme nous l'avons déjà évoqué auparavant, le SU est primordial pour la prise en soin des individus nécessitant une prise en charge immédiate. Néanmoins, ce service endure souvent des périodes de tension durant lesquelles le personnel doit faire face à une surcharge de travail, empêchant le bon fonctionnement du service. Ces périodes de tension pouvant apparaître à tout moment, ce qui montre bien l'enjeu de leur prévision. C'est pour ces raisons que nous cherchons à élaborer un SAD à partir de la modélisation du flux patient dans le SUA du CHRU de Lille.

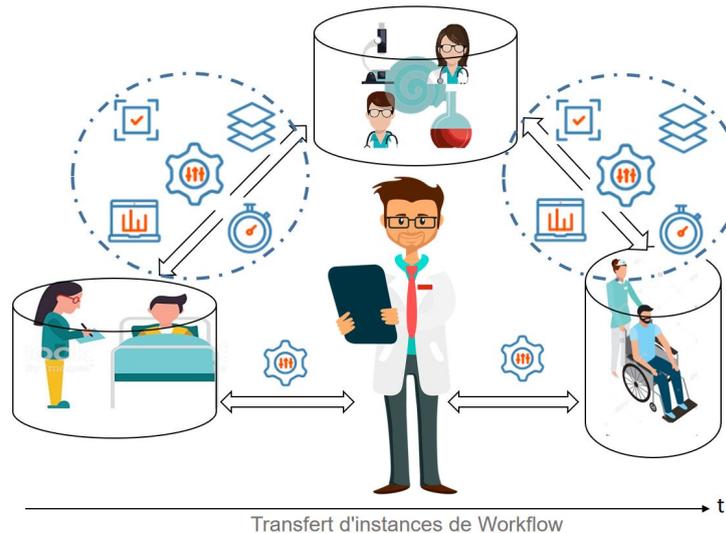


FIGURE 3.2 – Exécution du workflow collaboratif

Cependant et avant d'élaborer notre modèle, il a fallu étudier plus profondément le SUA de Jeanne de Flandres ainsi que la complexité de son environnement. L'hôpital Jeanne de Flandres du CHRU de Lille s'étale sur 17 hectares et regroupe 17 hôpitaux de secteurs différents (maternité, neurologie...). C'est le troisième plus important centre hospitalier de France après ceux de Paris et de Lyon. Il comprend plus de 3 000 lits et 16 000 employés (pour le service des urgences pédiatriques et adultes). Le SUA dispose de matériel de radiologie, d'IRM<sup>1</sup> et d'échographie, 5 salles d'opérations, une salle de réveil et une salle de réanimation chirurgicale. La figure 3.3 décrit de manière détaillée la structure du SUA du CHRU de Lille qui comprend :

- une entrée;
- un accueil administratif;
- une salle d'attente primaire avant le triage;
- deux box pour le triage;
- un circuit court (CC) : qui comporte 4 box de consultation, un box de suture, un box de plâtre, un box d'ORL<sup>2</sup>, un box dentiste et une salle d'attente;
- un circuit long (CL) : constitué de 4 zones (A, B, C, D) chaque zone comporte 7 box pour les patients sur brancard et un box pour les patients valides. Ce circuit comporte également une salle d'attente secondaire dédiée pour chaque zone et une salle d'attente secondaire commune pour toutes ces quatre zones.

Le tableau 3.2 résume les principales ressources humaines du SUA. Cet effectif est généralement insuffisant, notamment en période de surcharge de travail. Néanmoins, l'augmentation de cet effectif ne peut être réalisée en raisons purement juridiques et syndicales. Par exemple, les infirmiers

1. Imagerie par résonance magnétique.

2. Oto-rhino-laryngologie

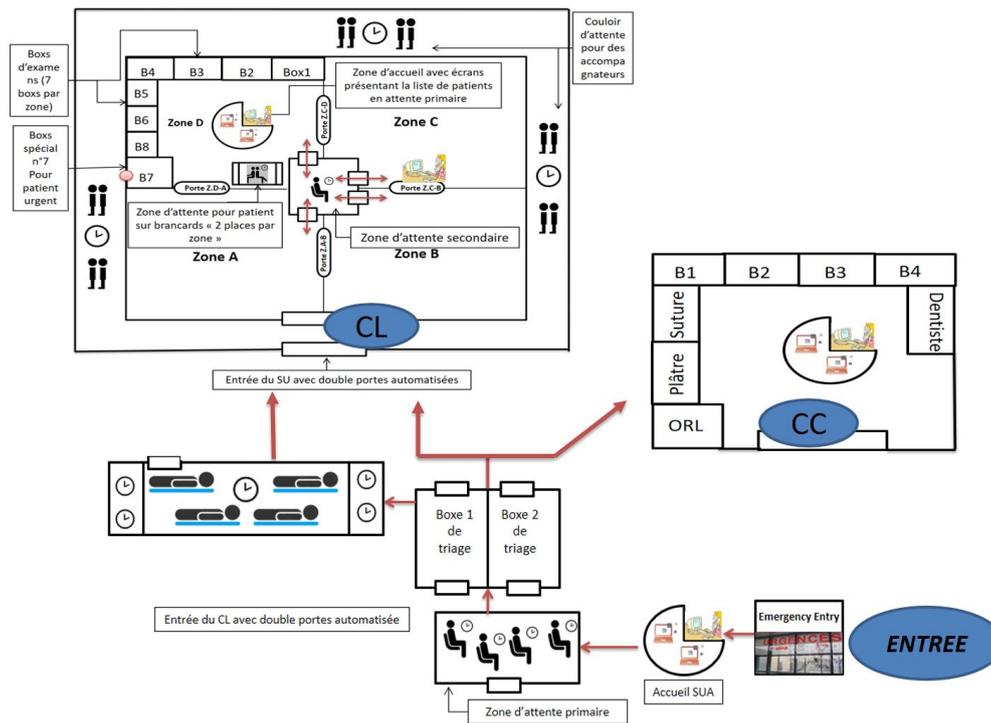


FIGURE 3.3 – La structure du SUA du CHRU de LILLE.

	Circuit Court	Circuit Long
Personnel	1 Médecin	2 Médecins
	1 Interne de médecine	3 Internes
	1 Interne de Traumatologie	2 Externes
	1 Interne Dentaire	4 Infirmiers
	2 Infirmiers	4 aide-soins
		2 Hôtesse

Table 3.2 – Les Ressources humaines du SUA

exercant à l'hôpital ne sont pas autorisés à travailler continuellement tous les soirs entre 18h et minuit (les périodes pendant lesquelles le nombre d'entrées est élevé).

### 3.6.1 Étude multidimensionnelle

Nous avons effectué une étude multidimensionnelle qui consiste à examiner des aspects propres au SUA pouvant influencer de manière directe ou indirecte sur notre étude. Ainsi, nous avons identifié 7 dimensions qui nous ont parues pertinentes :

- dimension liée au flux patients** : notre principal but est d'optimiser le temps d'attente des patients au SUA du CHRU de Lille. Pour cela, il est primordial de travailler sur les flux patients propres au service. Grâce aux multiples visites que nous avons réalisées au SUA, nous avons constaté que le flux d'arrivée de patients varie en fonction de périodes (e.g. journée, semaine, mois). Nous avons observé depuis le poste de l'enregistrement des patients (dès l'accueil du SUA) le nombre de patients entrant. L'enregistrement relève deux types de don-

nées : les données médicales générales relatives aux patients et les données concernant leurs pathologies. L'idée est d'étudier et d'analyser leur donnée personnelle (notamment celle de leurs états de santé) grâce à un modèle workflow immédiatement accessible à l'ensemble du personnel soignant.

Néanmoins le flux d'arrivée des patients est totalement imprévisible. Il a donc fallu limiter ce critère aléatoire en se basant sur les connaissances quantitatives et qualitatives du flux patient pour une meilleure gestion. Cette gestion est au cœur de notre problématique. En effet, notre objectif est de prouver qu'une bonne gestion de flux de patient permet de réduire le temps d'attente global dans le service. Notre résolution vise ainsi à modéliser ce parcours de patients dans le SUA.

- **dimension spatiale** : Pour que l'optimisation soit efficace, il ne faut pas négliger la distance parcourue ni par le patient ni par le personnel soignant. Notamment pour la fiabilité de la simulation. Les distances à inclure sont ; les distances entre le personnel et les patients, les distances entre les patients et leur lit et les distances du personnel à la source d'information.
- **dimension matérielle** : le manque de matériel peut influencer l'optimisation du parcours patients. Il est donc indispensable de prendre en compte la disponibilité matérielle du SUA en termes de lits, de matériel médicale spécialisé et de box d'examen.
- **dimension technique** : il faut sensibiliser le personnel soignant de l'utilité d'un tel système d'aide à la décision (SAD) et montrer comment il peut améliorer leur condition de travail. En effet, ce système permet au personnel d'avoir un accès facile et intuitif aux données en respectant les règles en vigueur en ce qui concerne la sécurité et la confidentialité des informations.
- **dimension économique et financière** : Le budget dans le SUA est limité comme dans les autres services. Ce budget intervient dans la gestion du personnel et du matériel pouvant entraîner des coûts. En effet, lors d'un manque matériel ou personnel, la prise en charge des patients est retardée ce qui augmente la tension au sein du service. De même, s'ils sont en surplus, le budget attribué implique des pertes économiques.
- **dimension managériale** : Suite au plusieurs visites à l'hôpital, nous avons déterminé 3 principaux acteurs dans le SU en générale et dans le SUA en particulier :
  - La direction de l'hôpital : cherche à réduire le budget au maximum et à optimiser la logistique hospitalière.
  - Les praticiens médicaux : possèdent les connaissances nécessaires au soins des patients et ont souvent besoin de plus de moyens.
  - Les patients : veulent être traités le plus rapidement possible et peuvent parfois contester les décisions du médecin.

En effet les médecins cherchent à convaincre les services d'aval (les unités de soins spécialisées) de leur accorder plus de moyen (lits). L'objectif dans ce chapitre est de fournir une

modélisation du SUA montrant les tensions engendrées par le manque des moyens logistiques. Pour ces raisons, il est important de faire intervenir les médecins dès la conception du modèle pour identifier leur véritable besoin et ainsi éviter de leur fournir un outil qui leur sera obsolète.

- **dimension humaine** : l'acteur humain est au centre du système étudié. Il est donc nécessaire de prendre en compte les interactions (plus ou moins prévisibles) qui en découlent. Il faut noter à ce stade que nous proposons dans cette thèse un SAD. Donc une réponse d'un acteur du système peut s'opposer à un fonctionnement optimal du service via un ordonnancement systématique des patients.

Pour conclure, nous pouvons déterminer que le flux patient dépend de manière directe de dimensions spatiale et matérielle. Concernant les autres dimensions : la dimension économique prime sur le reste puisque le service doit optimiser son efficacité. La dimension humaine est également importante pour comprendre les actions des différents individus. C'est dans cette logique qu'apparaît la dimension managériale qui permet de hiérarchiser l'influence que peut avoir le médecin sur la direction et sur les patients. Enfin c'est la dimension technique qui relie tous ces dimensions car elle permet de les concilier.

### 3.6.2 Système de gestion au SUA

Actuellement, dans le SUA, il n'existe pas un système fiable permettant d'une part de gérer d'une manière performante les places disponibles au sein du SUA ainsi que dans les différentes structures d'aval, notamment dans un contexte où 20% à 25% des patients qu'y sont pris en charge nécessitent un séjour hospitalier<sup>3</sup> et d'autre part, d'améliorer la qualité de l'information en temps réel. Nous pouvons prendre les exemples suivants : un lit qui vient d'être libéré par un patient et que l'infirmier n'a pas mis à jour l'information dans le SI du SU via le logiciel ResUrgence (cf. 1.5), ou encore les lits faussement libre (box ou chambre non nettoyée après le passage d'un patient) faute à une surcharge de travail ou un simple oubli.

## 3.7 Représentation du parcours patient dans le SUA

La figure 3.4 résume le parcours du patient depuis son arrivée dans le SUA jusqu'à sa première prise en charge. Cette figure montre également que cette prise en charge ne peut être effectuée qu'après une période d'attente plus ou moins importante, en fonction de l'état d'encombrement du SUA et de la gravité du cas du patient ( La classification clinique des maladies aux urgences "CCMU", cf. le tableau 2.6). À l'issue de ce diagnostic médical, le médecin décide de renvoyer le patient chez lui, de le garder en observation (manque de structures d'aval d'hospitalisation) ou bien de le réorienter vers une autre structure de soins hors SUA, tout dépend de l'état de gravité de patient ainsi que les disponibilités des infrastructures de soins.

---

3. <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/etudes-et-statistiques/la-drees/>

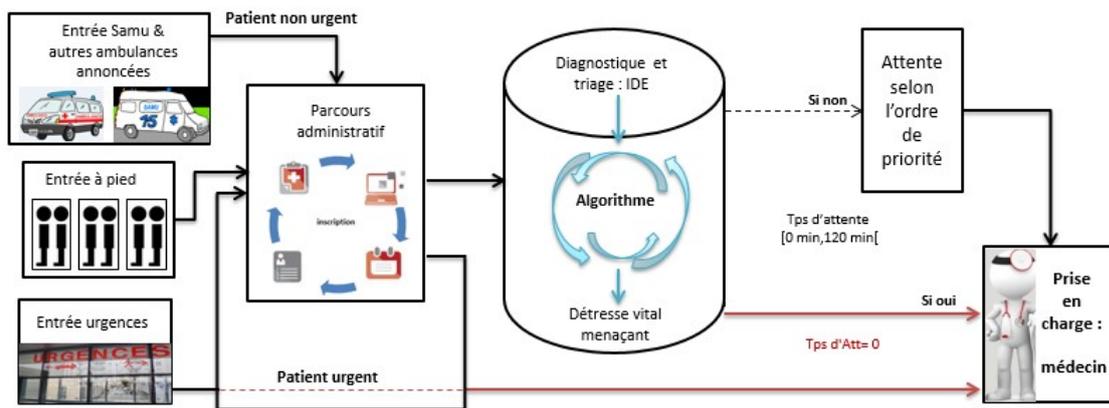


FIGURE 3.4 – Parcours patient dans le SUA

### 3.8 Workflow collaboratif pour modéliser le parcours patient dans le SUA

Le workflow collaboratif est une technique qui vise à surveiller et coordonner les activités entre l'ensemble des acteurs concernés. Ces derniers ont un objectif commun bien définis au sein du système. Cette technique décrit spécifiquement les interactions entre les activités (tâches) sous forme d'échange d'informations entre les différents acteurs en produisant à chacun les informations nécessaires pour l'accomplissement de sa tâche. Elle vérifie le respect des circuits et des modes de validation et les délais d'exécution de chaque tâche et pour chaque processus. Néanmoins, une modélisation workflow ne peut être validée et mise en service qu'à la suite d'une simulation et d'une analyse détaillée des résultats de ce modèle (cf. 3.3). Toutefois, nous proposons dans cette thèse une modélisation améliorée et enrichie du parcours patient au sein de SUA jouant le rôle d'un moyen efficace pour gérer les différents flux (matériel, humain) au sein du système. Ce qui garantit par la suite une meilleure prise en charge du patient, au point de vue temps et qualité, grâce à la planification des ressources matérielles et humaines du système de soins. Cette étape permet de formaliser le fonctionnement réel du SUA, d'automatiser certains flux et de cerner ainsi les zones d'optimisation. Dans ce contexte, la modélisation des processus est un moyen utilisé non seulement pour la représentation graphique d'une réalité complexe (à l'état initial) sous forme d'un modèle plus compréhensible à analyser, mais aussi pour identifier les rôles de chaque acteurs du système ainsi que d'assurer le partage d'informations entre eux. L'idée première du workflow dans notre travail est donc de lier les processus, les ressources et les applications afin de se recentrer sur la véritable mise en œuvre des processus avec des scénarios concrets.

#### 3.8.1 L'importance des visites du SUA pour la modélisation

Pour modéliser le SUA, il faut avant tout décrire d'une manière détaillée le parcours patient, autrement dit il faut connaître les caractéristiques médicales d'un patient afin de construire un modèle de circuit type pour ce dernier. Pour ce faire, nous avons établi plusieurs visites au sein



The screenshot shows a web interface for a patient intake form. At the top, there is a header with the Bonitasoft logo, the text 'Accueil Service Urgence Aulte CHRU Lille', and links for 'Déconnexion' and 'Bonita BPM Portal'. Below the header is a red bar with the word 'Lille'. The main title is 'Accueil Service Urgence Aulte CHRU Lille'. The form contains several input fields: 'Nom' with the value 'AJMI', 'Prenom' with 'Faten', 'Ddn' with a date picker set to '9 avril 1991', 'Accueil' with a dropdown menu set to 'standard', and 'Commentaire' with the text 'Pas de commentaire'. A 'VALIDER' button is located at the bottom center of the form.

FIGURE 3.5 – Formulaire d'accueil du SUA.

de notre SUA. Pendant les premières visites du SUA nous avons été guidé par deux médecins urgentistes. Ces visites nous ont permis de découvrir, d'observer et d'étudier le milieu hospitalier et les différents circuits du SUA et surtout prendre conscience d'une part, de la diversité des activités des soins qui en découle et d'autre part, de la complexité du parcours patient. Cette complexité est due essentiellement aux nombreux circuits du service et à l'incertitude des médecins quant aux décisions qu'ils doivent prendre concernant chaque patient en fonction de l'évolution de sa pathologie.

### 3.8.2 Le choix de l'outil de la modélisation

Le choix de la méthode et de l'outil de la modélisation appropriés se fait en fonction de la complexité du système étudié et des objectifs recherchés. Prenons l'exemple de l'outil « Bonitasoft » : il permet de mettre en œuvre le modèle grâce à son moteur intégré, de générer des interfaces automatiquement afin de permettre aux ressources humaines d'interagir avec le système et connecter le modèle avec d'autre système externe, plus la possibilité de télécharger l'outil gratuitement sur le web. Ces multiples avantages du logiciel « Bonitasoft » conviennent à nos besoins de modélisation des processus de soins du SUA. Ce logiciel permet non seulement de visualiser graphiquement la parcours patient, mais aussi de valider les conditions logiques de passage entre les différentes étapes du processus de soins. Ces conditions sont situées aux points de décision des médecins qui seront connectés à un système d'ordonnancement. Bonitasoft permet de valider le parcours patient par la génération de formulaires à chaque point de décision du parcours. Le personnel remplit ces formulaires au fur et à mesure, le formulaire vérifie que ce patient passe bien par les étapes appropriées. Il facilite donc le passage d'information et la communication entre les acteurs de soins et les patients, et donc construire ou mettre à jour le dossier patient.

La difficulté de la modélisation réside dans le fait que chaque médecin a une vision différente du parcours possible d'un patient dans le circuit. En effet, chaque médecin émet ses propres décisions et possède et visualise les fonctions des salles de manière différente. Dans la suite nous présentons une modélisation workflow du parcours patient complète et validée par nos partenaires médicaux au CHRU. Ce modèle est fonctionnel (figures 3.5 et 3.6).

The screenshot shows a web form titled "Box D'orientation" from the Bonita BPM Portal. The header includes "Accueil Service Urgence Aulte CHRU LILLE" and "Bonita BPM Portal". The form contains the following fields:

- Nom:** Text input with value "AJMI".
- Prenom:** Text input with value "Faten".
- Ddn:** Date picker showing "9 avril 1991".
- Allergie:** Radio button group with options: Respiratoire, Alimentaire, Contact, and Médicaments (selected).
- Commentaire:** Text area with value "Pas de commentaire".
- Traitement:** Dropdown menu with value "CL".

A "VALIDER" button is located at the bottom center of the form.

FIGURE 3.6 – Formulaire Box d'orientation du SUA.

### 3.8.3 Modélisation du parcours patient du SUA

La modélisation proposée dans cette section est spécifique au SUA de CHRU de Lille dans son fonctionnement actuel. Le parcours global et les deux sous processus ont été réalisés avec les professionnel de la santé. L'idée est de construire un modèle complet et conforme à la réalité. Par conséquent, il est crucial de schématiser le parcours d'un patient depuis son arrivée au SUA jusqu'à sa sortie. Néanmoins, pour obtenir la totalité du temps d'attente d'un patient, il faut intégrer l'ensemble des temps d'attente discret dans son processus de soins. L'ensemble de ce temps d'attente présente le principal facteur que nous cherchons à diminuer dans cette thèse. Dans notre modélisation nous prenons en compte également toutes les démarches administratives.

Nous présentons le parcours patient sous forme d'un processus global complété par deux sous processus [AJMI et al., 2018] :

- La figure 3.7 explique le processus principal qui décrit d'une manière globale le parcours du patient au sein du service ;
- Deux sous-processus qui détaillent le fonctionnement au sein des composantes : le circuit long (CL) et circuit court (CC) présentés respectivement par les figures 3.9 et 3.8.

Le choix de cette décomposition en sous-processus a permis d'alléger le modèle global visuellement en conservant toute la complexité des connexions entre les différentes composantes du SUA.

#### 3.8.3.1 Modèle global

Le processus global présent dans la figure 3.7, représente le parcours patient depuis son entrée au SUA jusqu'à sa sortie, donnant une image du fonctionnement du service. Nous pouvons déterminer que le parcours type d'un patient au sein de SUA se fait par 2 entrées bien distinctes :

- La tâche « Accueil standard » (patient à pied ou patient valide) : représente l'entrée par laquelle la majorité du patient arrive. Cette entrée est commune à toutes les personnes entrant au CHRU par les urgences enfant comme adultes ;

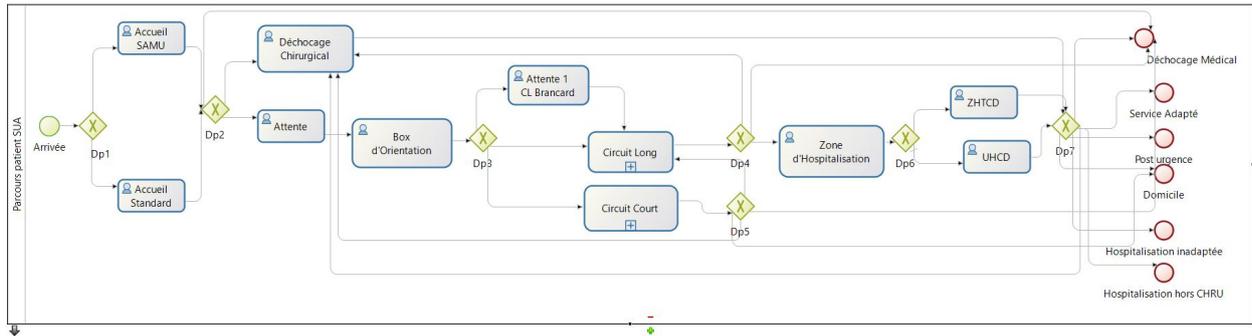


FIGURE 3.7 – Modèle global du parcours patient dans le SUA

- La tâche « Accueil SAMU » (patient sur brancard ou patient non valide) : représente l'entrée des patients très urgents qui sont redirigés le plus rapidement possible vers les unités de soins adaptés à leur besoin dans le SUA.

Ces deux tâches représentent l'accueil administratif où le personnel d'accueil réalise l'enregistrement administratif du patient : création de son dossier, enregistrement de son identité et ajout des informations liées à la sécurité sociale et aux remboursement des soins, etc. Une fois que le patient est enregistré, il va être orienté vers l'une de ces unités en fonction de la gravité de son état de santé :

- La tâche « déchocage chirurgical » : elle est dédiée pour traiter les patients très graves qui ne doivent pas attendre ;
- Le « déchocage médical » : qui est représenté par une fin dans notre modèle, car ces patients sont traités hors SUA. Son but est de traiter les patients très graves qui ne peuvent pas attendre.
- La tâche « Attente » : ne concerne que les patients qui ont un état de santé appartenant à l'intervalle [1,3] selon l'échelle informatisée du triage CCMU (cf. le tableau 2.6). Ces patients passant par cette tâche pour une durée variable en fonction de la situation d'encombrement du service à ce moment-là, avant d'aller au « Box d'orientation » afin de lui attribuer un motif de recours (c-à-d un CCMU spécifique et le type de maladie). En fonction de la gravité de son état de santé, un patient va être envoyé soit en CC ou CL (patients sur brancard ou piétons).

Les points précédents représentent le parcours commun des patients dans le SUA. Ensuite, 2 types de parcours sont distingués en fonction de 2 facteurs : la gravité de l'état de santé du patient (le patient valide ou non valide) et l'état d'encombrement du service à ce moment-là (attente possible avant la prise en charge). Ensuite, le patient est orienté ou réorienté vers l'une de ces unités (certaines entre elles sont représentées par un sous processus dans notre modèle) :

- le sous-processus du « circuit long (CL) » ;
- le sous-processus du « circuit court (CC) » ;
- « Attente 1 CL Brancard » : elle est dédiée aux patients non valides. Ces derniers attendent d'être accueillis dans le CL après le passage par la zone d'accueil et d'orientation (ZAO).

A la sortie du CL ou CC le patient peut être soit hospitalisé dans le service des urgences (activité), soit hors circuit d'urgence (événements de fin).

- Concernant l'hospitalisation dans le SUA, l'équipe soignante doit décider d'orienter le patient vers l'une des deux zones suivantes :
  - zone d'hospitalisation de très courte durée (ZHTCD) : les patients y restent au maximum 6h sous surveillance dans des chambres. La ZHTCD comporte 6 chambres ;
  - unité d'hospitalisation de courte durée (UHCD) : les patients y restent en moyenne 24h. Dédiée pour les patients dont l'état nécessite une réévaluation le lendemain ou une surveillance de nuit. L'UHCD comporte 18 chambres ;
  - zone d'hospitalisation.
- Comme évoqué précédemment, les activités d'hospitalisation hors SUA sont représentées par des événements de fin :
  - le service post urgence : est géré par les internes et n'accepte que les patients des urgences. Ce service ne possède que 20 lits et sachant que le SUA hospitalise au moins 50 patients par jours, alors la probabilité d'avoir une tension est forte ;
  - le service adaptée/spécialisé : le patient est orienté pour suivre ses traitements dans le service hospitalier dédié à ses besoins en fonction de sa pathologie ;
  - domicile : le patient va rentrer chez lui soit directement après une consultation complète soit après une hospitalisation d'une durée de moins de 24h ;
  - hospitalisation inadaptée : en cas d'encombrement total et pour des raisons de la complexité d'affectation du patient dans un service spécialisé, le patient peut être envoyé dans un service inadapté.
  - hospitalisation hors CHRU : orienter les patients dans un autre hôpital ou clinique à cause d'un manque des places.

Dans notre modèle, les branchements conditionnels sont décisionnels. Ces décisions sont exprimées dans le modèle par sept points de synchronisation  $Dp_i$  ( $1 \leq i \leq 7$ ) (figure 3.7). Ces branchements graphiques sont utilisés pour contrôler le comportement des flux de séquence dans un processus. Ils sont détaillés comme suit :

- $Dp_1$  : représente le type d'arrivée du patient : patient valide ou patient urgent (SAMU). Si le patient est urgent, il va directement à l'accueil SAMU où il va être dirigé soit vers le déchocage médical ou le déchocage chirurgical. S'il est valide il va directement vers l'accueil standard. Nous notons ici qu'en cas de non existence des patients urgents, l'accueil SAMU peut servir à accueillir les patients valides afin de dégorger les flux. Ceci explique le flux vers l'accueil SAMU.
- $Dp_2$  : contrôle l'orientation du patient selon la gravité de son état de santé, soit vers le déchocage chirurgical ou le déchocage médical ou l'attente si son état le permet.
- $Dp_3$  : ce point est important vu qu'il permet de déterminer le nombre de patients dans le service qui par la suite vont occuper le CL ou le CC. Il est primordial car il représente le premier point d'étranglement d'entrée du modèle global.

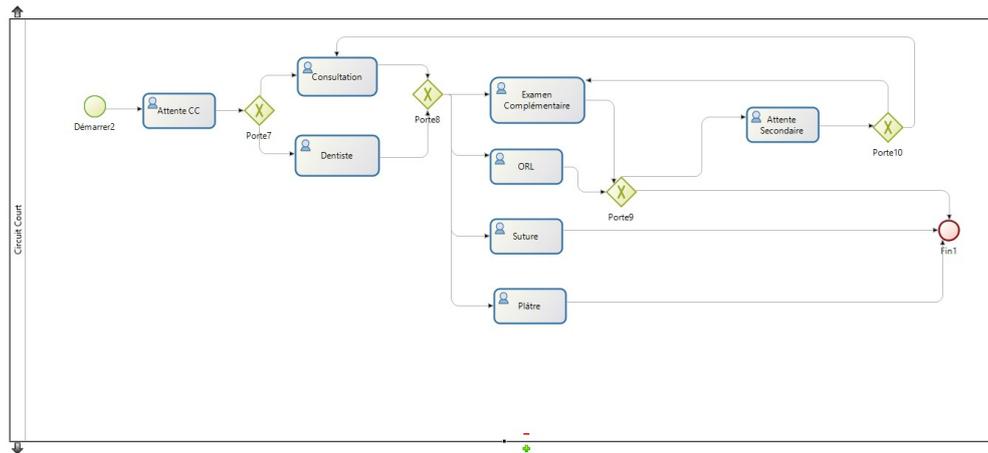


FIGURE 3.8 – Sous-processus circuit court SUA

- $Dp5$ ,  $Dp4$  : ces points sont centraux car ils représentent le second point d'étranglement d'entrée du modèle global. Ils orientent les patients dans les soins appropriés en fonction de leurs pathologies. La moindre tension au niveau de ces points bloque la suite du processus.
- $Dp6$  : ce point est essentiel car il représente la sortie de point d'étranglement du modèle global. Il redirige les patients vers l'une des unités d'hospitalisation dans le service des urgences.
- $Dp7$  : ce point est essentiel car il représente également la sortie de point d'étranglement du modèle global. Il redirige les patients vers l'une des unités d'hospitalisation hors le service des urgences.

### 3.8.3.2 Les sous-processus

Pour plus de précision, nous avons intégré des sous-processus dans le modèle global. En effet, cela permet de détailler une tâche sans trop alourdir le modèle global. Par exemple : le CL contient 4 zones complètes pour les consultations complexes. Les transitions propres à ce circuit peuvent non seulement surcharger le modèle global si elles apparaissent dessus, mais aussi compliquer la compréhension de ce dernier et de la tâche elle-même. Pour ces raisons nous avons élaboré des sous processus spécifiques : lorsque le patient arrive à cette étape (sous processus), il est envoyé vers l'entrée du ceci, et lorsqu'il arrive à la fin il est réinjecté dans le processus principal.

Lorsque le patient a un léger problème médical rapide à traiter, il est directement redirigé vers le circuit court (figure 3.8). Dans ce circuit les praticiens prennent en charge les patients valides de moins de 65 ans qui n'ont pas besoin de brancard, ni d'analyse biologique poussée. Généralement le temps de passage moyen dans ce circuit est inférieur à 2h.

Le circuit long (figure 3.9) a pour rôle de traiter les patients qui ont des problèmes de santé compliqués, et leur prise en charge dure longtemps. Ce circuit est composé de 4 zones ; A, B, C

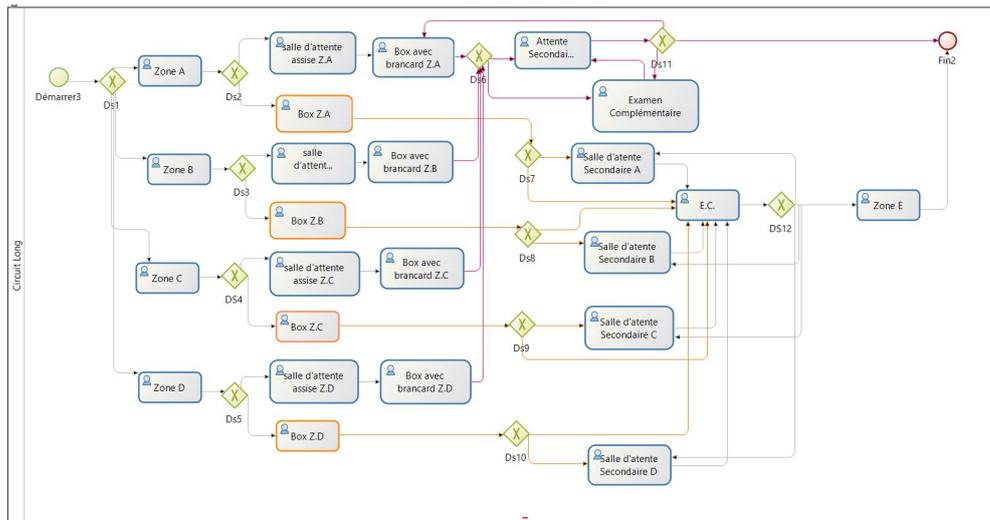


FIGURE 3.9 – Sous-processus circuit long SUA.

et D, d'une salle d'attente commune et des salles d'attente secondaires. Chaque zone A, B, C et D est munie de 8 box (dont un box est équipé d'un brancard spécifique pour les patients valides, les autres ne sont pas équipés d'un brancard afin d'accueillir les patients mis déjà sur brancard) et comporte un médecin, un interne, un infirmier et un aide-soignant. Les patients sont acheminés dans les différentes zones seulement si certains box sont libres, ce qui évite l'accumulation de patients dans les zones.

Le modèle montre bien que si le patient est orienté vers le CL, il est orienté alors à une de ces zones de soins (A, B, C et D). Si la gravité de son état de santé est importante et il est mis sur brancard il va être examiné dans les box sans brancard, sinon il va être traité dans le box avec brancard. L'ensemble des points de décision dans le sous processus CL sont :

- $Ds1$  : permet d'orienter le patient vers la zone où il était envoyé depuis le model global;
- $Ds2, Ds3, Ds4, Ds5$  : permet de séparer le parcours des patients valides de celui des patients sur brancard.

Ces  $Dsi$  permettent de contrôler le processus commun des patients dans le CL, à partir de celle-ci chaque patient va suivre son propre parcours.

- $Ds6, Ds11$  : permet le contrôle et la différenciation des parcours des patients valides pour le reste de leurs traitements;
- $Ds7, Ds8, Ds9, Ds10, Ds12$  : permet le contrôle et la différenciation des parcours des patients sur brancard pour le reste de leurs traitements.

La modélisation proposée tient compte de tout type de soins et d'orientation au sein du SUA. Elle nous donne une cartographie pour n'importe quel parcours patient possible.

Pour que notre modèle reflète une image fiable et semblable à la réalité, nous avons choisi de représenter l'attente par une activité : (Attente) dans le modèle global, (Attente CC) dans le

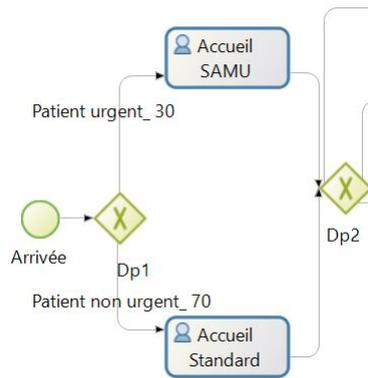


FIGURE 3.10 – Exemple de transitions

sous-processus du CC et les tâches (salle d'attente assise) et (salle d'attente secondaire A, B, C, et D) dans le sous-processus du CL.

### 3.8.3.3 Les modes de transitions entre les tâches

Le logiciel utilisé offre plusieurs moyens pour présenter le passage directe d'une tâche à une autre ou le passage après un nœud de jonction de flux (où ces flux peuvent se diriger vers des tâches diverses). Dans notre modélisation, nous utilisons 2 types de transitions : les transitions conditionnelles et les transitions probabilistes :

- Les transitions conditionnelles reposent sur des variables pour répartir les flux arrivant au nœud en fonction de la valeur de ces variables. Ce type de transition offre une garantie d'exécution pour chaque étape. Par exemple, lorsque un patient urgent arrive aux urgences, il est automatiquement envoyé vers le décochage chirurgical ou médical selon les besoins de son état de santé. En même temps, un membre de sa famille (ou un personnel de SAMU) effectue son enregistrement administratif afin de respecter le protocole d'admission.
- Les transitions probabilistes sont utilisées pour répartir le plus correctement possible le flux d'entrée des patients entre les différentes tâches. Elles sont appliquées notamment, pour les patients non urgents, vu la multitude de possibilités de leur orientation. Les pourcentages attribués sont basés sur une base de données fournie par l'hôpital (BDDH), qui récapitule les heures d'entrée et de sortie des patients ainsi que leur cause de venue aux SUA durant une année complète (depuis Juin 2016 jusqu'au Mai 2017).

La figure 3.10, montre un exemple de branchement *OU exclusif* qui assure l'enregistrement du patient dès son arrivée au SUA selon son type d'arrivé. Cependant, il ne pourra passer à la tâche suivante que s'il a bien été enregistré à l'accueil. Ensuite, en se basant sur la BDDH, nous avons adopté la méthode probabiliste pour rétablir le plus fidèlement possible les flux. Par exemple, les pourcentages choisis pour le *Dp1* sont 30% pour les patients urgents et 70% pour les patients non urgents.

### 3.8.3.4 Les connecteurs

L'outil workflow utilisé (Bonitasoft) offre plusieurs options de connecteurs. Par exemple, les connecteurs avec les systèmes d'information comme ceux des bases de données, les réseaux sociaux, etc. Nous avons exploité ces connecteurs pour mettre en place une application qui correspond au mieux à nos besoins. En effet, les connecteurs utilisés dans notre SAD sont :

- Le connecteur de base de données est relié à notre base de données réel fournie par le SUA. Le but est double : 1) enregistrer automatiquement le patient dès la validation du formulaire d'enregistrement et 2) alimenter son dossier numérique au fur et à mesure de la prise en charge en mettant à jour par exemple en temps réel ses constantes physiologiques.
- Le connecteur mailing, pour envoyer par exemple une copie du dossier patient au patient ou à son tuteur (à l'adresse électronique donnée au moment de l'enregistrement) dès sa sortie du SUA.

## 3.9 Le workflow collaboratif à base d'agents

Les agents sont des entités autonomes qui peuvent avoir des comportements sophistiqués et flexibles, capables de collaborer ensemble dans un système afin de s'adapter à des environnements complexes et évolutifs et atteindre ainsi des objectifs communs. La combinaison du SMA avec un workflow est une approche distribuée d'exécution des instances du workflow qui engageant des entités coopératives. Cette approche est appelée souvent par *SMA pour Workflow*. L'utilisation d'une telle approche dans le SUA offre les avantages suivants :

- une coopération agent au service des patients, c'est-à-dire qu'un agent logiciel peut représenter un agent physique du SUA (médecin) pour garantir une meilleure prise en charge du patient ;
- la coordination des tâches de soins grâce à un agent coordinateur ;
- la flexibilité de passage des agents d'un point de service à un autre. Par exemple, la migration d'un agent médecin d'une équipe à une autre au profit d'un patient urgent (caractère mobile des agents).

En effet, l'application d'une telle approche dans le SUA d'étude permet grâce aux comportements et aux caractéristique des SMA de générer des meilleures solutions pour les problèmes d'optimisation rencontrés, tel que le problème de décision concernant la sélection du patient à prendre en charge parmi les patients en attente lorsqu'ils ont le même degré de CCMU à un instant donnée.

### 3.10 Agents coopérant pour l'exécution des instances du workflow collaboratif

Le workflow collaboratif permet de modéliser le déplacement d'un patient (représenté par un jeton) d'une tâche à une autre dans le processus de soins. En outre, et vu l'imprévisibilité et l'incertitude de la demande de soins, la gestion dynamique de l'information devient primordiale. Dans ce cadre, l'adoption de la notion de coalition d'agents est adéquate avec notre besoin. Le but est de résoudre le problème de planification des tâches de soins, la gestion des ressources et le contrôle du workflow.

La notion de coalition d'agents correspond à un regroupement temporaire d'agents interactifs. Chaque agent de cette coalition joue un rôle bien défini dans le processus de soins correspondant à chaque patient. Ce processus de soins (en cours d'exécution) est représentée par un agent à part entière.

Les agents d'une coalition doivent collaborer entre eux afin de prendre des bonnes décisions au profit de la qualité de soins offert aux patients. Cette collaboration est faite grâce au protocole de négociation bien défini. Ce protocole permet aux agents d'établir des décisions appropriées en fonction des conditions d'exécution. Par exemple, le choix d'affecter une équipe médicale complète ou d'un seul personnel soignant. Ce protocole exploite principalement deux bases de connaissance :

- Une base déclarative qui permet la description des objectifs et du contexte de la négociation. Par exemple, déterminer la pathologie des patients et définir les salles de traitements adéquates au type de pathologie
- une base de règles de négociation, par exemple, choisir l'affectation des personnel médical pour offrir une prise en charge de qualité.

L'objectif est de déterminer un protocole de négociation entre les agents d'une même coalition au profit de l'exécution distribuée d'une instance du workflow. Pour ce faire, nous présentons une approche à deux phases pour la gestion du workflow collaboratif :

- Une phase d'ordonnancement et d'affectation des tâches de soins minimisant un ou plusieurs IPC. Cet ordonnancement sera intégré dans le comportement d'un agent ordonnanceur (AO) qui va analyser et décrire le schéma de workflow. Ce schéma détermine les propriétés essentielles satisfaisant l'ensemble de protocoles de soins. Ces protocoles sont fixés auparavant tels que le nombre et le type de compétences des ressources existantes, les liens de précedence entre les tâches, liste des tâches à exécuter, etc. Ceci est fait pour cerner chaque exécution.
- Une phase d'orchestration dynamique pilotée par des agents permettant la minimisation des IPC en cours d'exécution du workflow. Cette orchestration prend en compte non seulement les contraintes temporelles mais aussi la disponibilité réelle des ressources. À ce niveau, les tâches de soins sont ordonnancées selon un ordre de priorité calculé dynamiquement à chaque exécution du workflow en prenant en compte l'évolution de l'état de santé du patient.

L'avantage principal de cette division est la séparation, dans un même modèle (grâce à la coalition d'agent), de l'ordonnancement des tâches de soins (qui va être attribuée à un agent ordonnanceur par la suite) et de la phase d'orchestration dynamique (basée sur le protocole d'interaction entre les agents). Ces deux phases représentent la partie centrale du chapitre 4.

### 3.11 Les interactions entre les agents pour piloter les instances du workflow collaboratif

L'AO est l'agent déclencheur de la négociation entre l'ensemble d'agent concernés. Il englobe la totalité d'informations sur les patients telles que leurs pathologies et type de soins nécessaire. Néanmoins, cet agent ignore les informations concernant les ressources à allouer aux tâches de soins. La négociation est déclenchée grâce à l'envoi d'une requête par l'AO à l'ensemble des agents représentant le personnel médical qui est censé avoir les compétences médicales les plus adéquates pour l'exécution des tâches de soins. Dans cette requête, nous spécifions d'une part *la date de disponibilité* qui représentent la date au plus tôt où le personnel médical doit être disponible. D'autre part *l'ensemble des tâches de soins à exécuter à un instant  $t$* . Chaque membre de cette équipe médicale analyse la requête et en fonction de sa disponibilité actuelle répond à l'AO. Ce dernier choisit en fonction des réponses reçues l'équipe médicale la plus adaptée pour les besoins d'un patient donné. Chaque membre du personnel soignant doit confirmer ou refuser son association à cette équipe soignante pour un patient donnée. L'AO enregistre l'ensemble d'informations échangées durant la négociation afin de les exploiter dans une nouvelle négociation au profit d'une modification d'exécution d'une instance du workflow.

Nous avons un agent AO par coalition pour négocier les ressources en termes de personnel soignant pour chaque patient sachant que lorsqu'un personnel soignant est alloué à un patient, cette ressource reste bloquée et inaccessible par les autres agents (AO) (sauf en cas d'extrême urgence si le besoin est imminent) jusqu'à sa libération (fin du soins d'un patient). Les créneaux horaires réservés par l'AO pour la réalisation des tâches de soins appartiennent à des plages horaires bien définies liées aux instances concernées du workflow. Chaque réservation doit contenir le patient et les priorités des tâches de soins le concernant. À la fin de cette interaction, l'agent personnel médical sélectionne la tâche de soins du planning pour l'exécuter durant le créneau horaire réservé. Une fois la tâche en question est exécutée, l'AO continue à piloter le workflow de la même manière pour les autres tâches de soins suivantes du planning. Néanmoins, l'AO peut ne pas piloter l'exécution des tâches lorsqu'il est en attente de la date de fin de l'exécution de la tâche qui précède la tâche en cours.

### 3.12 Les difficultés d'exécution du workflow collaboratif

La difficulté de l'exécution du workflow collaboratif se situe en deux points :

- la cohérence globale : l'ensemble des tâches de soins a réalisé pour un patient dans les différentes structures du SUA sont liées par des contraintes. Afin de respecter ces contraintes, l'AO doit informer les différentes structures médicales de l'état de santé du patient. Puis, l'exécution des tâches de soins est faite après la vérification de la disponibilité des ressources matérielles et humaines appropriées à un instant donné.
- les comportements périodiques répétitifs : durant l'échange d'informations entre les agents d'une même coalition, l'état de chaque agent est mis à jours en fonction des informations reçues. Cette mise à jours est essentielle pour la suite de la négociation au sein de la coalition.

Dans ce contexte, et pour faire face à ces problématiques, nous proposons des solutions dans les paragraphes suivants.

### 3.12.1 Validation de la cohérence globale

Parmi les problèmes liés au workflow collaboratif est la propagation asynchrone des informations sur les soins déjà réalisés et les soins à faire pour un patient, tout en tenant compte des contraintes de précedence. Si nous considérons que la durée de négociation entre l'ensemble des agents est minime par rapport au créneau horaire disponible, alors les contraintes de précédences sont forcément respectées, parce que l'information spécifique aux tâches de soins prédécesseurs (précèdent la tâche en cours) est obligatoirement transmise avant le début de l'exécution des tâches de soins successeurs (suivent la tâche en cours).

Dans ce contexte, la durée d'une négociation agent doit être assez courte pour que l'allocation des ressources soit cohérente avec leur disponibilité en temps réel. Dans la pratique, la solution adoptée utilise une heuristique [BEN OTHMAN, 2015].

### 3.12.2 Les états oscillants du workflow

L'exécution d'une tâche de soins nécessite que chaque AO d'une coalition réserve les ressources nécessaires et selon la durée totale estimée pour cette tâche. Néanmoins, cette estimation est fondée fortement sur les probabilités d'exécution des tâches prédécesseurs. Ce qui rend l'état du système de gestion du workflow oscillant. Par exemple, lorsqu'un AO alloue une ressource médicale (médecin) pour l'exécution d'une tâche de soins et que les dates estimées d'exécution de cette tâche sont dépassées, cette ressource devient indisponible pour l'exécution des tâches de soins successeurs (pour lesquelles ce médecin est alloué). Par conséquent, l'AO administrateur de cette allocation informe l'ensemble des agents qui ont réservé cette ressource de la nouvelle indisponibilité. En effet, ces agents recalculent de nouveau les nouvelles dates d'exécution.

Afin d'éviter les états oscillants, nous insérons une variable d'amortissement dans les instances du workflow pour limiter l'impacte des nouvelles réservations sur l'estimation des disponibilités de personnel médical et atteindre ainsi une situation stable. Néanmoins, ce phénomène ne garantit pas forcément une situation stable optimale par rapport à notre objectif multicritère. Dans le chapitre

4, nous présentons une architecture agent doté de cette approche permettant d'ordonnancer et d'orchestrer notre workflow collaboratif.

### 3.13 Gestion de points de décision du Workflow collaboratif

Le schéma du workflow collaboratif proposé dans cette thèse comprend une multitude de points de décision. Ces points permettent le respect de la précédence des tâches. Ils sont présentés graphiquement par des losanges (langage BPMN). Après l'exécution d'une tâche de soins, les points de décision garantissent, en fonction des contraintes, l'orientation du patient vers la suite de son traitement en considérant l'encombrement du service en question. Néanmoins, lorsque l'allocation initiale des tâches est attribuée à l'AO (chapitre 4), nous pouvons mentionner deux types de traitements :

- À chaque achèvement d'une instance du workflow, une nouvelle instance commence. En effet, chaque fin d'une instance du workflow précède un point de décision ;
- Chaque point de décision peut proposer à l'AO des tâches à exécuter. Puis, c'est la tâche de soins la plus appropriée qui va être sélectionnée pour être exécutée. Par exemple, si l'orientation du patient est validée pour qu'il soit traité dans le CC, l'AO n'orchestre que la branche (transfert CC) du workflow. Néanmoins, et en cas de perturbation d'exécution d'une instance du workflow, l'AO peut engendrer un traitement d'exception, pendant l'étape en cours, comme par exemple la bifurcation du flux patient vers d'autres services.

Dans le chapitre 4, une étude détaillée montre que le choix d'une solution dépend fortement du contexte unique du workflow en traitement.

### 3.14 Synthèse

L'approche workflow collaboratif que nous avons choisi pour la modélisation du parcours patient au SUA, est fondée sur la coopération d'entités logicielles munies de capacité d'agir. La majorité des approches récentes s'orientent de plus en plus vers le concept d'agents mobiles, vu leurs capacités à transférer les informations nécessaires au profit de l'exécution des tâches. En effet, c'est la communication entre les agents selon le protocole de négociation proposé et la capacité des agents à réagir aux changements de leur environnement qui permet d'orchestrer correctement le workflow. Néanmoins, pour plus de flexibilité et face aux situations imprévues, l'outil de gestion du workflow doit inclure un module d'ordonnancement des tâches. Quoique la coopération interservices exige un moteur d'exécution distribué. Dans la littérature, il existe quelques travaux qui traitent le problème de l'ordonnancement distribué et dynamique [ZHU et al., 2019], [D. HUANG et al., 2018], [C. PHAM et al., 2018].

### 3.15 Le dynamisme des agents pour le Workflow collaboratif

Les acteurs de l'architecture multi-agent proposée dans cette thèse peuvent avoir différents types d'activités, en raison de leurs diverses propriétés : coopération, communication, etc. En effet, pendant que les agents négocient entre eux, d'autres agents peuvent transmettre des instructions, ou d'autres exécutent des tâches. Il existe 3 type d'activités :

- les activités dites échelonnées, sont caractérisées par le travail en décalage des agents. C'est à dire qu'un agent est capable de débiter une activité qui peut se chevaucher avec l'activité qui est en exécution par d'autres agents.
- les activités parallèles, sont définies par le fonctionnement simultané des agents.
- les activités morcelables, sont caractérisées par la possibilité d'arrêter une activité en cours d'exécution suite à la réception d'une information de mise à jours signalant l'existence d'une tâche plus urgente à effectuer.

Afin d'identifier le nombre de tâches de soins dirigées par un agent, nous avons fixé deux principaux objectifs :

- minimiser la dépendance entre les tâches de soins gérées par plusieurs agents. Le but est de diminuer le nombre de messages échangés (concernant les contraintes de précédences). En effet, lorsqu'un agent gère une seule tâche, toutes les contraintes de précédence deviennent des contraintes inter-agents, générant un nombre de message important.
- minimiser la durée globale de l'exécution d'une instance du workflow, par l'exécution en parallèle des tâches (si possible) et par l'optimisation de l'utilisation des ressources médicales. Par conséquent, et pour des raisons de cohérence spatio-temporelle, un seul agent (personnel médical) ne peut pas exécuter simultanément deux tâches différentes. En effet, lorsqu'il n'existe qu'un seul agent pour la gestion de toutes les tâches de soins, la durée globale de l'exécution du workflow est égale à la somme de durées de toutes les tâches de soins.

En effet, l'utilisation optimale des ressources médicales et la minimisation du temps global d'exécution exigent de confier les tâches de soins à plusieurs agents. Le but est d'exécuter de façon parallèle ces tâches par des ressources médicales différentes et ayant les compétences adéquates. Il est donc interdit d'exécuter les deux tâches de soins en parallèle par la même ressource médicale. Le formalisme mathématique de ces contraintes est présenté dans le chapitre 4.

### 3.16 Identification des IPC pertinents suite au modèle workflow

Le workflow collaboratif proposé dans cette thèse permet d'identifier deux goulets d'étranglements dans le SUA qui sont :

- à l'entrée du SUA, la zone d'attente primaire pour les patients sur brancards se remplit très vite car le CL est complet dans la plupart du temps. L'occupation du CL est due au faite que ces patients ont souvent des pathologies nécessitant un temps de consultation assez lents. ces

temps de consultations ralentissent l'avancement de la prise en charge des autres patients et rallongent ainsi l'attente primaire ;

- la sortie du SUA est aussi bloquée lorsqu'il n'y a plus des lits d'aval disponibles du SUA. Les patients nécessitant une prise en charge plus poussée sont bloqués dans les zones d'attente secondaires des circuits, en UHCD ou en ZHTCD sachant que ces dernières correspondent à des zones d'attente tampons entre le SUA et les services spécialisés.

L'ordonnancement et l'orchestration à base d'agents deviennent donc nécessaire pour maîtriser ces goulets qui représentent des points critiques de décisions. D'où la nécessité de la mise en œuvre d'un SAD permettant de gérer les flux patients au niveau de ces points.

Ainsi, et afin d'anticiper et d'éviter la situation de tension dans le SUA, les praticiens visent d'une part, à améliorer les indicateurs de performance du SUA et d'autre part, à effectuer un suivi en temps réel de certains indicateurs pertinents pour évaluer la situation de tension. En effet, le SAD que nous proposons dans cette thèse doit faire une comparaison continue entre l'évolution de référence et l'évolution en temps réel de ces indicateurs. Les praticiens peuvent donc anticiper la tension en analysant l'écart entre ces deux évolutions. C'est pourquoi, il est important de considérer en temps réel tous les indicateurs importants afin d'anticiper la tension. Dans la littérature, il existe plusieurs recherches scientifiques qui ont utilisé les indicateurs pour évaluer la performance dans les services des urgences. Les IPC le plus évoqués sont détaillés dans la section 2.4. Suite à cette étude, nous considérons deux catégories d'indicateurs de performance (IPC) au sein du SUA : l'IPC inter-SUA et l'IPC intra-SUA. Les plus utilisés sont :

- l'IPC inter-SUA
  - La réorientation des ambulances (RA) vers des services d'urgence moins surpeuplés nécessite de disposer des informations appropriées en temps réel sur l'état de tension des services des urgences voisins. Si ce n'est pas le cas, et si l'ambulance se rend à chaque fois dans un autre service des urgences surchargé, le patient peut mourir en route dans l'ambulance (cf.2.4.4).
  - La disponibilité des lits dans les services en aval (DLSA) : cet indicateur est essentiel pour évacuer les flux patients des urgences dans l'unité en aval. Sinon, le temps d'attente d'un patient pour avoir un lit dans le service en aval encombrera le service des urgences. Ainsi, son temps d'attente et celui des autres patients augmentent.
  - Le transfert de dossier patient (TDP) : Pour assurer la continuité des soins, nous devons garantir le transfert du bon dossier patient au bon moment vers la bonne unité.
- l'IPC intra-SUA
  - Durée total du séjour (DTS) (cf. 2.4.1)
  - Le temps d'attente primaire (TAP) (cf. 2.4.2)
  - Les abandons des SU (ASU) (cf. 2.4.3)
  - Charge de soins restants (CSR) : il s'agit d'un IPC réaliste permettant de distinguer les types de patients en attente. Il exprime le pourcentage de soins restant pour le

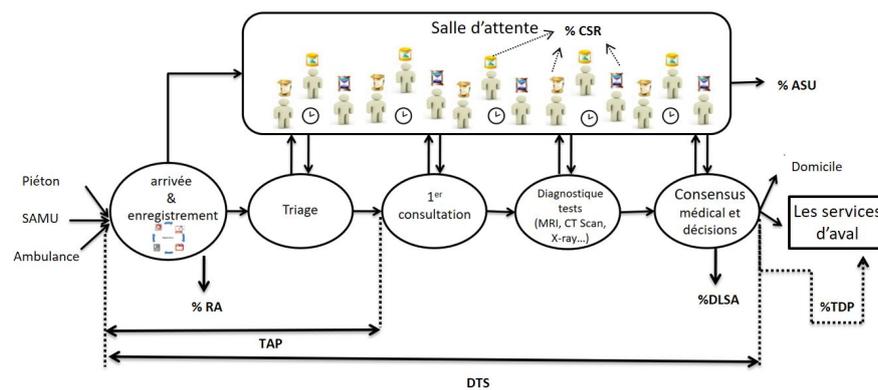


FIGURE 3.11 – le parcours patient et sa relation avec les IPC

patient par rapport aux soins totaux. L'attente pour la première consultation (CSR = 100%) diffère de l'attente des résultats d'examen complémentaires (par exemple : IRM, tomodensitométrie, rayons X, etc. CSR < 100%). En effet, il est très intéressant de prendre d'abord tous les patients dont le CSR est faible afin d'évacuer le flux de patients (quels que soient les cas d'urgence vitale). Il est donc important de prendre en compte cet IPC pour la planification.

La figure 3.11 illustre un parcours patient et sa relation avec les IPC.

En tenant compte de l'existence de ces indicateurs et des caractéristiques internes du SUA, l'analyse et la surveillance de ces indicateurs sont primordiales pour déterminer les situations de tension au sein du service. Cependant, nous avons choisi de travailler en particulier sur trois indicateurs de performance qui sont : le temps d'attente cumulé (TAC), la durée totale de séjour (DTS) et la charge de soins restants du parcours patient (CSR). Ce dernier donne une estimation sur les activités de soins restantes. L'idée directrice de nos travaux de recherche est de concevoir un SAD doté d'une architecture informatique de résolution qui permet d'orchestrer le workflow en cours d'exécution afin d'améliorer les IPC. En effet, dans la littérature, la majorité des travaux de recherche nationaux et internationaux mentionnés auparavant étudient et développent des modèles séparés pour représenter les dimensions structurelles, fonctionnelles et comportementales des systèmes hospitaliers. Dans la suite de cette thèse, nous représentons d'une manière unifiée ces trois dimensions dans un même schéma. L'idée est d'identifier tous les éléments essentiels afin de prendre en compte toutes les variables et les paramètres de décision pour l'optimisation locale, puis globale de la chaîne logistique hospitalière. De nombreux travaux sont apparus dans la littérature pour l'optimisation de la logistique hospitalière. La plupart d'entre eux n'ont pas utilisé une stratégie qui lie les mesures des performances aux actions du SAD pour piloter les activités de soins en temps réel.

### 3.17 Conclusion

La notion du workflow pour la gestion des processus de soins a été adoptée dans le domaine de la santé avec un grand succès. Néanmoins, cette utilisation endure l'échange des différents flux logistiques inter-hospitaliers. Dans ce chapitre, nous avons montré que l'ensemble des tâches du workflow est réglementé et doit respecter des contraintes temporelles et de ressources. Ainsi, nous avons expliqué que la nature distribuée du workflow collaboratif et des événements imprévisibles compliquent la maîtrise et la gestion des processus de soins. Par conséquent, et afin de réduire l'impact des perturbations, la coordination de l'exécution des tâches de soins doit être faite de manière dynamique.

Dans le chapitre suivant, nous étudions et développons une solution efficace basée sur une architecture à trois niveaux alliant l'optimisation et les systèmes multi-agents comme approche appropriée pour assurer l'optimisation collaborative qui génère des bonnes actions à adopter. Ces actions sont mises à jour par la communication, la coordination et la négociation entre les différents acteurs (agents) du SUA afin d'améliorer en temps réel les indicateurs de performance.

# Approche d'ordonnancement et d'orchestration dynamique des tâches de soins

## 4.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de réaliser un système d'aide à l'ordonnancement et à l'orchestration minimisant les effets de la tension au sein du SUA afin d'améliorer la prise en charge des patients. Néanmoins, la réalisation de cet ordonnancement est complexe vue l'existence de l'interférence permanente à chaque point de décision du workflow des trois types de patients : les patients programmés (PP), les patients non programmés (PNP) et les patients urgents non programmés (PUNP). Dans ce chapitre, nous proposons une architecture de résolution basée sur une alliance entre les systèmes multi-agents (SMA) et les métaheuristiques (algorithme mémétique). L'architecture proposée permet d'une part, de minimiser les effets de cette interférence et d'autre part de gérer en temps réel les instances workflow du parcours patient afin d'améliorer les indicateurs de performance en cours d'exécution du workflow. L'utilisation du système multi-agent au sein de l'architecture de résolution a pour objectif d'assurer la coordination entre le personnel médical afin de fournir les meilleurs soins aux patients. Pour ce faire nous commençons par établir une formulation mathématique du problème d'ordonnancement, suivie d'une présentation détaillée des algorithmes utilisés. Une approche d'orchestration dynamique à base d'agents est proposée pour améliorer les performances du SUA. l'intérêt de l'orchestration dynamique est d'optimiser les indicateurs de performance en cours d'exécution du workflow, pour cela nous avons choisi trois indicateurs : le temps d'attente cumulé (TAC), la durée totale de séjour (DTS) et la charge de soins restante du parcours patient (CSR).

## 4.2 Formulation mathématique du problème d'ordonnancement dans le SUA

Le workflow collaboratif présenté dans le chapitre précédent possède un moteur d'exécution distribué. Néanmoins, il ne contient pas un modèle d'ordonnancement des tâches capable de résoudre les indéterminismes au niveau des points de décisions du workflow. Ce qui justifie le besoin d'étudier et de développer une méthode d'ordonnancement et d'orchestration qui gère en temps réel les instances workflow du parcours patient au niveau de tous ces points de décisions pour fluidifier les flux patients.

Les interférences entre les trois types de patients (PP, PNP, PUNP) nécessitent une articulation efficace entre eux pour mieux gérer les activités de soins. Par exemple, l'arrivée non planifiée d'un PUNP perturbe le processus de traitement de soins dans le SUA impliquant un ré-ordonnancement autour du PP au profit de traitement de ce PUNP. Afin de résoudre ces problèmes, nous avons développé une nouvelle approche de planification dynamique des patients basée sur deux processus complémentaires. Le premier processus (ordonnancement) concerne la planification des patients présents dans le SUA en appliquant un algorithme mémétique (AM) minimisant une fonction objectif globale composée de plusieurs critères. Chaque critère correspondant à un indicateur de performance spécifique. Le second processus (orchestration) utilise un système multi-agent pour orchestrer d'une manière dynamique le parcours patient (ordonné par le premier processus). Cette orchestration dynamique est efficace car elle optimise les IPC en cours d'exécution du workflow.

Le modèle mathématique (y compris le coût de la pénalité, puis les notations d'ensembles, d'indices et de paramètres) est détaillé dans la section suivante. Ce modèle est utilisé pour formuler le problème et évaluer l'ensemble des solutions obtenues par notre approche.

### 4.2.1 Paramètres et variables de décision

$CP$  : l'ensemble de  $C$  patients à traiter,  $CP = \{P_1, P_2, \dots, P_C\}$ ,  
 $MS$  : l'ensemble de  $M$  membres du personnel médical,  $MS = \{m_1, m_2, \dots, m_M\}$ ,  
 $Cs$  : le nombre de PP dans le SUA,  
 $Cns$  : le nombre de PNP prévu dans le SUA,  
 $a$  : indice du membre du personnel médical  $m_a$ ,  
 $CPM_a$  : la charge de travail du personnel médical  $m_a$ ,  
 $CPM$  : la charge totale de travail du personnel médical,  
 $L_{n,a}$  : la compétence du personnel médical  $m_a$  nécessaire pour traiter le patient  $n$ ,  
 $td_n$  : la date d'arrivée du patient  $n$ ,  
 $Ttmx_{n,o}$  : le temps d'attente théorique maximum pour le patient  $n$  de type  $o$ ,  
 $i, j$  : indices des lieux de traitement dans le SUA ( $LS_i, LS_j$ ),

- $t$  : indice du temps,  
 $o$  : indice de type du patient (1 : PP, 2 : PNP, 3 : PUNP),  
 $S$  : l'ensemble des lieux dans le SUA ,  
 $H$  : horizon d'optimisation,  
 $O$  : l'ensemble de variations de l'état de santé du patient,  
 $\alpha_i$  : coût de l'augmentation d'une unité de capacité de soins dans le lieu  $i$  du SUA,  
 $\gamma_{i,j}$  : coût du transfert d'un patient du lieu  $i$  au lieu  $j$  du SUA,  
 $\delta_{i,o}$  : coût de l'attente du patient de type  $o$  dans le lieu  $i$  du SUA pour une période de temps,  
 $\zeta_{i,o}$  : coût d'une demande de soins non satisfaite du patient de type  $o$  dans le lieu  $i$  du SUA (abandon),  
 $\lambda_{i,o,t}$  : taux d'arrivée du patient de type  $o$  dans le lieu  $i$  du SUA à l'instant  $t$ ,  
 $\kappa_{a,i}$  : coût de l'augmentation d'une unité de charge de soins du personnel médical  $m_a$  occupé dans le lieu  $i$  du SUA,  
 $Cns_{i,o,t}$  : le nombre estimé de patients non programmés de type  $o$  dans le lieu  $i$  du SUA à l'instant  $t$ ,  
 $G_{d,n}$  : l'opération de soins  $d$  pour le patient  $n$ ,  $d \in F_n$ ,  
 $F_n$  : l'ensemble des opérations de soins qu'un patient  $n$  doit faire en fonction de sa pathologie,  
 $P_{d,n}$  : la durée du traitement théorique de la tâche de soins  $d$  pour le patient  $n$ ,  
 $s_{d,n}$  : la date de début d'exécution de l'opération  $G_{d,n}$  du patient  $n$ ,  
 $X_i$  : Capacité de soins considérée/attribuée pour le lieu  $i$  du SUA,  
 $y_{i,o,t}$  : nombre de patients du type  $o$  qui attendent dans le lieu  $i$  du SUA à l'instant  $t$ ,  
 $T_{i,j,t}$  : nombre de patients envoyés du lieu  $i$  du SUA au lieu  $j$  du SUA à l'instant  $t$ .  $j$  peut être un lieu qui correspond au domicile du patient,  
 $b_{a,i}$  : nombre du personnel médical  $m_a$  qui ont une surcharge de travail dans le lieu  $i$  du SUA,  
 $U_{i,o,t}$  : nombre de patients de type  $o$  qui ont abandonné le lieu  $i$  du SUA à l'instant  $t$ ,  
 $CC_{i,t}$  : charge de soins dans le lieu  $i$  du SUA à l'instant  $t$ ,  
 $NB_{i,t}$  : nombre total de patients en attente dans le lieu  $i$  du SUA à l'instant  $t$ ,  
 $OP_{a,n,t}$  : booléen, 1 si le membre du personnel médical  $m_a$  traite le patient  $n$  à l'instant  $t$ ,  
 $OP_{a,n,t}^d$  : booléen, 1 si deux membres du personnel médical  $m_a$  traitent l'opération  $d$  du patient  $n$  à l'instant  $t$ ,  
 $HP_{a,b,t_1,t_2}^n$  : booléen, 1 si deux membres du personnel médical  $m_a$  et  $m_b$ , traitent le même patient  $n$  dans deux lieux différents du SUA durant deux instants différents  $t_1, t_2$ .

#### 4.2.2 La fonction objectif

$$FO = \text{Min} \left( \sum_{i \in S} \alpha_i X_i + \sum_{\substack{i,j \in S \\ i \neq j}} \sum_{t \in H} \gamma_{i,j} T_{i,j,t} + \sum_{i \in S} \sum_{o \in O} \sum_{t \in H} \delta_{i,o} y_{i,o,t} + \sum_{i \in S} \sum_{a \in M} \kappa_{a,i} b_{a,i} + \sum_{i \in S} \sum_{o \in O} \sum_{t \in H} \zeta_{i,o} U_{i,o,t} \right) \quad (4.1)$$

La fonction objectif (Eq. (4.1)) représente la minimisation de plusieurs critères. Le premier

critère retourne le coût d'augmentation des capacités du lieu  $i$  du SUA. Le second critère reflète le coût de transfert de patient entre les différents lieux du SUA. Le troisième critère reflète les pénalités liées au temps d'attente des patients. Le quatrième critère est lié au coût de la surcharge de travail du personnel médical. Le dernier critère reflète les pénalités liées aux patients qui ont abandonné les lieux du SUA.

Pour traiter ce problème d'optimisation, nous avons décidé d'adopter une approche agrégée sans chercher à utiliser des pondérations appropriées. Dans les systèmes hospitaliers, notamment dans les urgences, il est très difficile de définir des poids appropriés pour ces critères. La présente étude a obtenu des résultats de simulations (chapitre 5) ayant générés certains de ces critères séparément ou/dans certains cas ensemble. Dans ce qui suit, nous résolvons le problème décrit ci-dessus en respectant les différentes contraintes.

### 4.2.3 Les contraintes

L'Eq. (4.2) vérifie que la somme des patients dans le lieu  $i$  du SUA à l'instant  $t$  ne doit pas dépasser la capacité du lieu  $i$  du SUA.

$$(Cns_{i,o,t} + Cs_{i,o,t}) \leq X_i \quad \forall i \in S, \forall o \in O, \forall t \in H \quad (4.2)$$

L'Eq. (4.3) vérifie que le personnel médical  $m_a$  à l'instant  $t$  peut être affecté aux tâches de soins uniquement pour un seul patient  $n$ . Cependant, plusieurs membres du personnel médical peuvent être attribués pour le traitement du même patient  $n$ . L'eq. (4.4) assure cette contrainte pour plusieurs membres du personnel médical différents.

$$\sum_{n \in CP} OP_{a,n,t} = 1 \quad \forall a \in M, \forall t \in H \quad (4.3)$$

$$\sum_{a \in M} OP_{a,n,t} > 1 \quad \forall n \in CP, \forall t \in H \quad (4.4)$$

L'Eq. (4.5) vérifie l'ordre des opérations effectuées pour le même patient (contrainte de précédence). L'opération  $d$  est le prédécesseur de l'opération  $d + 1$ .  $\forall G_{d,n}, G_{d+1,n}$  deux opérations successives du patient  $n$ .

$$s_{d+1,n} \geq s_{d,n} + P_{d,n} \quad (4.5)$$

L'Eq. (4.6) vérifie que les opérations  $d$  et  $d'$  sont exécutées en parallèle par deux membres différents du personnel médical  $m_a$  et  $m_b$  à l'instant  $t$  dans le même créneau horaire. La différence entre l'Eq. (4.4) et l'Eq. (4.6) c'est que le staff médical dans (Eq. (4.4)) peut seulement donner ensemble un diagnostic médical pour la pathologie du patient  $n$ , tandis que dans l'Eq. (4.6) plusieurs membres du staff médical (par exemple, 2 médecins  $m_a$  et  $m_b$ ) peuvent exécuter plusieurs tâches de soins (par exemple, deux opérations différentes  $G_{d,n}$  et  $G_{d',n}$ ) simultanément pour le

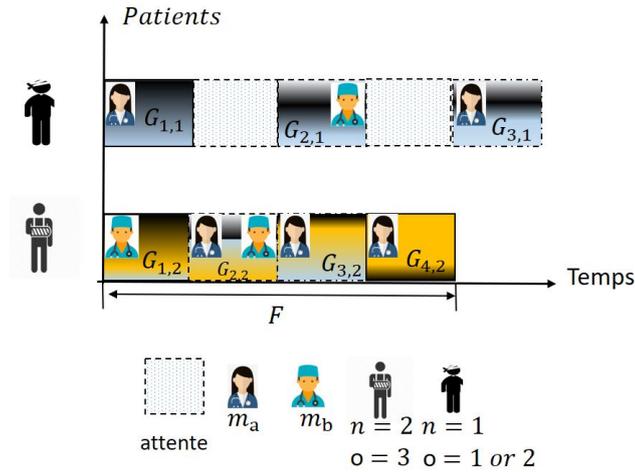


FIGURE 4.1 – Vérification des contraintes (4.3), (4.4), (4.5) et (4.6)

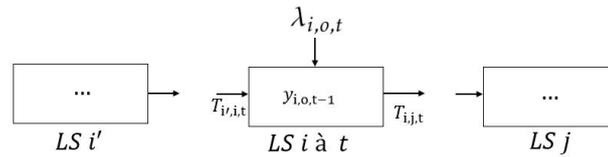


FIGURE 4.2 – La dynamique du flux patient entre les différents lieux du SUA

patient  $n$ . La Fig. 4.1 résume la vérification de l'Eq. (4.3), (4.4), (4.5) et (4.6) dans un exemple simple.

$$\begin{cases} s_{d,n} = s_{d',n} + \Delta \\ OP_{a,n,t}^d = OP_{b,n,t}^{d'} = 1 \quad \forall a, b \in M, \quad a \neq b \\ 0 \leq \Delta \leq P_{d',n} \end{cases} \quad (4.6)$$

La figure 4.2 exprime qu'à l'instant  $t$ , le nombre de patients présents dans un lieu  $i$  du SUA est égal au nombre de patients qui n'ont pas été traités à l'instant  $t - 1$  additionné des patients qui sont transférés pour être traités dans le lieu  $i$  et le nombre de patients non programmés et non programmés urgent qui sont arrivés au SUA à l'instant  $t$  et qui sont affectés au lieu  $i$ . À cette somme, il faut soustraire le nombre de patients qui sont transférés à l'instant  $t$  du lieu  $i$  vers un autre lieu du SUA. Ceci montre la difficulté de faire une planification prévisionnelle du SUA en raison de la nature dynamique du flux patient entre les différents lieux du SUA. Dans la section suivante, nous présentons une approche d'ordonnancement à horizon glissant qui tient compte de la dynamique des flux patient entre les différentes périodes de l'horizon considéré.

### 4.3 Environnement d'ordonnancement à horizon glissant

La figure 4.3 montre l'environnement de planification avec les trois types de patients (PP, PNP, PUNP).

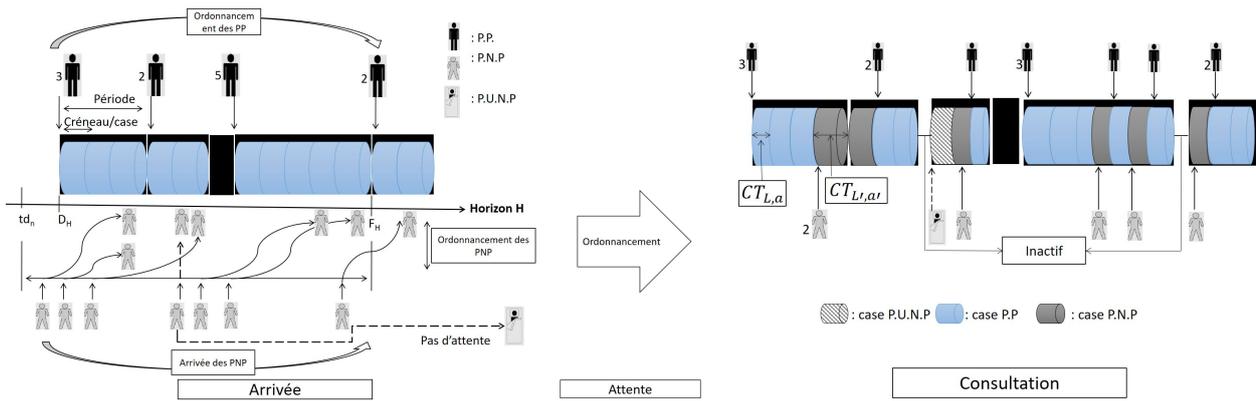


FIGURE 4.3 – Environnement d'ordonnancement [f. AJMI et al., 2017]

### 4.3.1 Hypothèses

- Un membre du personnel médical est présent et engagé dans l'horizon de planification du SUA. Le nombre de patients programmés dans un horizon de planification est  $C_s$ , alors que le nombre attendu de patients non programmés est  $C_{ns}$ . Tous les patients non programmés arrivent aléatoirement aux urgences, puis un temps de consultation théorique doit leur être attribué au moment de leur arrivée ;
- Le SUA ne ferme jamais. Chaque patient qui arrive devrait être enregistré à la réception à l'heure d'arrivée (par exemple,  $td_n$  pour le patient  $n$ ). Tous les patients qui arrivent aux urgences sont acceptés et doivent être traités pendant l'horizon de planification courant ou le prochain horizon ;
- Un traitement de soins pour un patient correspond à un ensemble d'opérations de soins à exécuter de façon parallèle ou séquentielle par un ou plusieurs membres du personnel médical (médecins, infirmiers, internes, etc.).
- Les membres du personnel médical sont organisés en équipes. Chaque équipe contient au moins un médecin. Certaines équipes comptent des effectifs supplémentaires (infirmiers, spécialiste, etc.), en fonction de la pathologie du patient.
- L'horizon d'optimisation  $H$  commence à l'instant  $D_H$  et se termine à l'instant  $F_H$ .
- L'horizon d'optimisation est divisé en plusieurs périodes dont les durées ne sont pas nécessairement équivalentes. Si deux périodes ont la même durée, le nombre et la durée des créneaux horaires de chaque période peuvent varier. En général, une période contient plusieurs créneaux horaires. Un créneau est attribué à un patient programmé. Chaque période contient au moins un créneau. La durée d'un créneau de consultation programmée est donnée par l'heure de début de la période à laquelle il appartient. En effet, si deux créneaux ou plus sont inclus dans une période, les patients programmés affectés au même créneau ont la même durée de consultation programmée.
- Vu l'aspect stochastique de la durée de consultation effectuée par le personnel médical, nous supposons que  $CT_{L,a}^n$  est la durée moyenne de consultation du membre du personnel médical

$m_a$  ayant les compétences  $L$  pour traiter le patient  $n$ .

- Lorsque le membre du personnel médical devient disponible, le patient en attente qui a la date de début de consultation ordonnancée la plus proche est appelé. Si la salle d'attente est pleine et qu'il n'y a aucune possibilité d'appeler tous les patients dans leur période d'affectation, les patients restants et les nouveaux arrivées reçoivent un créneau de consultation dans la prochaine période.
- Dans le SUA, la priorité est donnée aux patients les plus urgents. Ainsi, dès l'arrivée de ces patients, l'ordonnancement courant est mis à jour.
- Le taux d'admission dans chaque lieu du SUA est fixe alors que le taux de demande de soins est dynamique et aléatoire.

### 4.3.2 Mesures de performance

Soit le temps d'attente du patient programmé  $n$  ( $W_{s_n}$ ) est égal à la somme du temps d'attente de ce patient depuis la date de son enregistrement jusqu'à la date théorique donnée de sa première prise en charge  $W_{ar}$  et le temps d'attente réel avant la première consultation  $W_{fc}$ , où :

$$W_{s_n} = W_{ar_n} + W_{fc_n} \quad (4.7)$$

$$W_{ar_n} = \max(0, t_{s_n} - td_n) \quad (4.8)$$

$$W_{fc_n} = \max(0, t_{fc_n} - t_{s_n}) \quad (4.9)$$

Où  $td_n$ ,  $t_{s_n}$  et  $t_{fc_n}$  sont respectivement l'heure d'arrivée, l'heure de consultation théorique prévue et l'heure de première consultation du patient  $n$ .

Le temps d'attente du patient non programmé  $k$  ( $W_{ns_k}$ ) est la somme des temps d'attente de ce patient depuis la date de son enregistrement jusqu'à la date théorique donnée de sa première prise en charge  $W_{ar_k}$  et le temps d'attente réel avant la première consultation  $W_{fc}$ , où :

$$W_{ns_k} = W_{ar_k} + W_{fc_k} \quad (4.10)$$

$$W_{ar_k} = \max(0, t_{s_k} - td_k) \quad (4.11)$$

$$W_{fc_k} = \max(0, t_{fc_k} - t_{s_k}) \quad (4.12)$$

Les deux équations (4.7) et (4.10) sont mathématiquement équivalentes mais sémantiquement différentes [B. S. OTHMAN et al., 2018]. En fait, la méthode d'ordonnancement mise au point dans ce chapitre attribue un temps de consultation théorique à chaque patient non programmé dès son

arrivée, puis le guide vers la salle d'attente. Grâce à l'heure programmée attribuée,  $W_{ar}$  est calculé pour chaque patient enregistré. L'objectif est de réconforter les patients et de réduire leur stress en les tenant informés de leur temps d'attente avant la première consultation. Si le premier temps de consultation est égal à l'heure planifiée, les temps d'attente  $W_{fc_n}$ , et  $W_{fc_k}$  sont égaux à 0. En cas de perturbation (manque de personnel médical, dégradation de l'état de santé du patient, etc.), les temps de consultation sont re-ordonnés, le premier temps de consultation augmente et le temps d'attente du patient s'allonge.

Par ailleurs, la plupart des patients préfèrent les consultations des horaires plus tôt (en particulier à leur arrivée). Pour satisfaire ces préférences, le temps d'attente basé sur l'heure d'arrivée  $W_{ar}$  doit être réduit en affectant le plus rapidement possible le personnel médical disponible doté des compétences nécessaires demandées.

## 4.4 Processus d'ordonnancement

L'approche d'ordonnancement dynamique proposée génère, à chaque fois qu'un nouveau patient arrive au SUA (indépendamment du type de patient  $\forall o \in O$ ), une séquence de traitement de soins adaptée à ses besoins. Ce qui implique une génération de plans d'activités en temps réel pour chaque membre du personnel médical. Ainsi, une équipe médicale multidisciplinaire est formée et un rôle de traitement est ensuite attribué à chaque membre de l'équipe dans l'un des lieux du SUA appartenant à  $S$ . Cette planification est mise à jour à chaque fois que le flux d'entrée du patient change.

Notre approche repose sur deux phases principales et complémentaires ; le processus d'ordonnancement et le processus d'orchestration dynamique :

- La phase d'ordonnancement (hors ligne) consiste à ordonner l'ensemble des patients arrivant au SUA dans l'horizon courant. Nous utilisons dans cette phase un algorithme mémétique d'ordonnancement (AMOR) afin de minimiser le **TAC** et le **CPM**.
- La phase d'orchestration dynamique (en ligne) met à jour l'ordonnancement de la première phase en permutant et/ou en insérant les nouveaux patients (PNP et/ou PUNP) qui arrivent au SUA. Ce processus basé sur des agents communicants, chaque agent est doté d'un comportement spécifique afin de réordonner les tâches de soins en améliorant les indicateurs de performance (IPC) en cours d'exécution du workflow. Ces indicateurs (**DTS**, **TAC**, **CSR**) ont été choisis auparavant (cf 3.16). Ce processus permet de mieux gérer les interférences permanentes entre les trois types de patients (PP, PNP et PUNP) qui arrivent au SUA.

### 4.4.1 Algorithme mémétique d'ordonnancement proposé (AMOR)

Un algorithme mémétique (AM) est une combinaison d'algorithme génétique (AG) et de technique de recherche locale dans le but d'accélérer la convergence vers une population de bonnes solutions [GOËFFON, 2006]. Dans ce contexte, l'algorithme AMOR doit optimiser le processus de

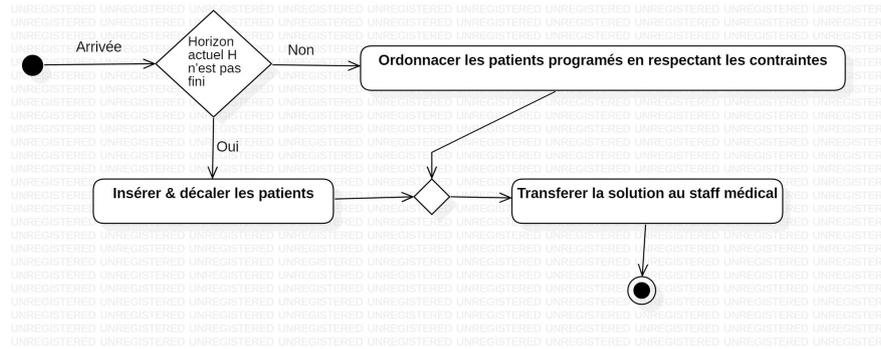


FIGURE 4.4 – Approche d'ordonnancement

traitement du patient, en affectant efficacement l'ensemble de patients au bon personnel médical et au bon lieu du SUA, tout en minimisant le TAC et CPM. Pour ce faire, deux étapes interdépendantes doivent être exécutées conjointement : qui sont l'affectation et l'ordonnancement (algorithmes 1 et 2). Dans les paragraphes suivants, nous construirons les différentes étapes de l'algorithme AMOR proposé afin de fournir une bonne solution d'ordonnancement des patients.

#### 4.4.1.1 Définition du chromosome

Dans son exécution, AMOR traverse différentes phases, et utilise un codage directe des chromosomes. Chaque chromosome est représenté par un *hypercube à quatre dimensions* dont les axes sont : personnel médical, patients, temps et lieu du SUA (figure 4.5). L'axe du temps est divisé en intervalles (des créneaux horaires) de tailles différentes. Comme il a été mentionné précédemment, l'horizon d'optimisation est divisé en plusieurs périodes de longueurs différentes. Si deux périodes ont la même longueur, le nombre et la durée des intervalles dans chaque période peuvent différer sachant que généralement une période contient plusieurs intervalles. L'idée de diviser l'axe du temps en plusieurs créneaux permet d'attribuer le bon personnel médical au bon patient au bon lieu du SUA dans un créneau (case) précis appartenant à une période spécifique. Par exemple, comme le montre la figure 4.6, le personnel médical  $m_a$  traite le patient  $n$  dans le deuxième intervalle de la période 2, dans le lieu  $i$  du SUA. Sur la figure 4.7, nous avons assigné deux membres du personnel médical  $m_a$  et  $m_b$  respectivement aux patients  $n$  et  $k$ , dans les lieux  $i$  et  $j$  du SUA dans les périodes 2 et 3. La figure 4.8 illustre plusieurs affectations hypercube de personnel médical, ceci est possible grâce au modèle choisi du chromosome. Par exemple, le patient  $n$  a besoin de deux compétences différentes pour son traitement, les membres du personnel médical  $m_f$  et  $m_a$  sont affectés à la même période 2 et au même créneau horaire dans le même lieu  $i$  du SUA.

#### 4.4.1.2 Construction de la population initiale

L'algorithme AMOR commence par générer une population initiale de solutions viables. Pour assurer la diversité des solutions, cette population est obtenue en utilisant deux méthodes :

- la première méthode consiste à construire la population initiale (*IniPopL*) en utilisant un algorithme de liste qui permet de générer des solutions en appliquant des règles de priorité

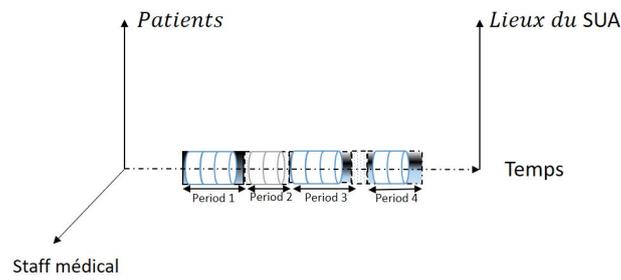


FIGURE 4.5 – Une représentation d'un hypercube à quatre dimensions

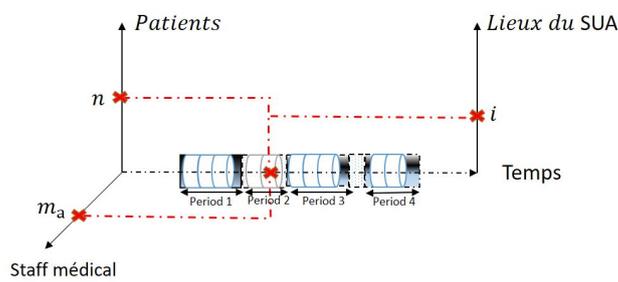


FIGURE 4.6 – Affectation hypercube d'une seule tâche

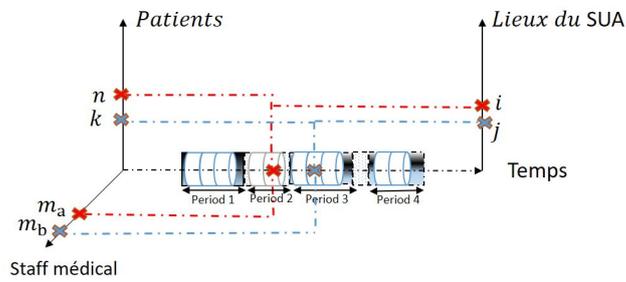


FIGURE 4.7 – Affectation hypercube des tâches séquentielles

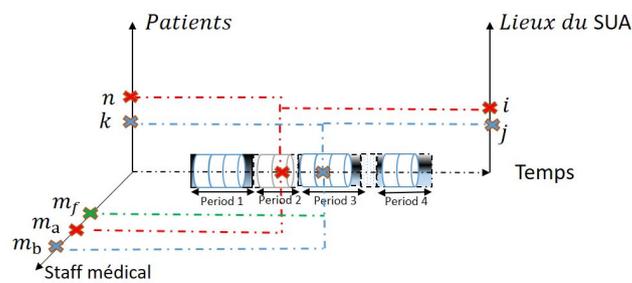


FIGURE 4.8 – Affectation hypercube des tâches multi-compétences

dynamiques.

- la seconde méthode consiste à générer des solutions viables d'une manière aléatoire pour construire la population initiale (*IniPopR*).

L'algorithme 1 est utilisé pour construire la population initiale globale en effectuant une combinaison linéaire des populations *IniPopL* et *IniPopR* afin de générer des solutions diversifiées permettant d'éviter une convergence prématurée dès le début du processus.

---

**Algorithme 1** : Construction de deux populations initiales *IniPopL* et *IniPopR*

---

```

input : Fixé NL, la taille de la première population initiale IniPopL
         Fixé NR, la taille de la deuxième population IniPopR
output : IniPopL de NL chromosomes générés par l'algorithme de liste
         IniPopR de NR chromosomes générés aléatoirement

1 Begin
2  $i \leftarrow 0$ ;
3  $j \leftarrow 0$ ;
4  $IniPopL = \emptyset$ ;
5  $IniPopR = \emptyset$ ;
7 while ( $i < NL$ ) OU ( $j < NR$ ) do
8   if  $i < NL$ ; then
9     Trouver un hypercube chromosome  $i$  viable généré par l'algorithme de liste ;
10     $IniPopL = IniPopL \cup \{chromosome\ i\}$ ;
11     $i \leftarrow i + 1$ ;
12  end
13  if  $j < NR$  then
14    Trouver un hypercube chromosome  $j$  viable généré aléatoirement ;
15     $IniPopR = IniPopR \cup \{chromosome\ j\}$ ;
16     $j \leftarrow j + 1$ ;
17  end
18 end
19 end

```

---

#### 4.4.1.3 Opérateur de croisement contrôlé

L'étape de croisement consiste à récupérer deux chromosomes parents, les combiner afin de produire deux nouveaux chromosomes enfants appelés également progéniture. Dans AMOR, l'opérateur de croisement utilisé nous permet d'avancer ou de reculer l'heure de début d'une tâche dans le processus de traitement du patient pour un membre du personnel médical donné. Cela ne change pas l'affectation des patients (quel membre du personnel médical traite quel patient). Seuls les axes "temps" et "patient" sont considérés.

**Exemple d'étape de croisement contrôlé** : l'axe du temps est divisé en plusieurs créneaux (intervalles) de 5 minutes. Chaque intervalle dans l'axe du temps correspond à un booléen, il est égal à 1 si le patient est affecté à cet emplacement, sinon à 0 (les chromosomes 1 et 2 de la

**Algorithme 2 : AMOR**


---

```

input : InitPopL, InitPopR, N la taille globale de la population initiale
output : Un ensemble de N solutions
1 Begin
2 Initialization : Algorithme 1
3 Fusion de IniPopL et IniPopR (N hypercubes chromosomes viables)
5 while (un nombre fixe de générations n'est pas atteint) do
6   Évaluer les individus en fonction de TAC et de la CPM ;
7   Sélectionner 2 parents P1 et P2 aléatoirement pour la reproduction ;
8   Appliquer un algorithme de croisement contrôlé avec une probabilité  $p_c$ , afin d'obtenir le
   fil1 et le fil2 viables ;
9   Appliquer un algorithme de mutation contrôlé avec une probabilité  $p_m$  ;
10  Appliquer la méthode de hill-climbing ;
11  Mettre à jour la population en gardant les N meilleurs individus
12 end
13 end

```

---

figure 4.9). Le *fil1* et le *fil2* de la figure 4.9 résultant de l'étape de croisement avec un masque de codage égal à 01. Ces deux chromosomes *fil1* et *fil2* sont contrôlés par les deux axes restants (Lieu du SUA) et (Personnel médical) pour qu'ils soient viables. Par exemple, nous avons besoin de deux membres du personnel médical différents dans l'intervalle de temps [80,85] pour le *fil1* car le même membre du personnel médical ne peut pas traiter deux patients différents en même temps (contrainte liée à l'équation. (4.3)). De plus, les patients 1 et 2 du *fil2* doivent être traités également par deux membres du personnel médical dans l'intervalle de temps [65,70]. La figure 4.10 montre un exemple de vérification de la disponibilité de deux axes de ressources demandées, tout en tenant compte des compétences demandées du personnel médical et du type de ressources disponibles dans l'un des lieux du SUA. Ce phénomène montre l'intérêt d'utiliser un chromosome hypercube en quatre dimensions pour vérifier la conformité aux contraintes. Grâce à la conception des chromosomes et des opérateurs de mutation et de croisement contrôlés nous n'avons pas besoin d'appliquer un processus de correction.

#### 4.4.1.4 Opérateur de mutation contrôlé

La mutation est une opération qui a besoin d'un seul individu pour évoluer selon un facteur de probabilité  $p_m$ . Cet opérateur permet de diversifier la population afin d'éviter une convergence prématurée de l'algorithme vers un optimum local. Dans notre cas, la mutation vise à modifier les booléens présents dans nos chromosomes. Tous les chromosomes ne sont pas mutés, nous choisissons d'une manière aléatoire le chromosome qui sera muté. Si le chromosome est sélectionné, il passe par les créneaux selon les axes (Personnel médical, Patients, Temps, Lieu du SUA) et change ses valeurs conformément aux contraintes (cf 4.2.3).

Les cases (créneaux) sont changées aléatoirement. Chaque case a une probabilité prédéterminée d'être mutée. Si l'emplacement sélectionné doit être changé de 1 à 0, il n'y a pas de conditions

Chromosome 1															
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-45	45-50	50-55	60-65	65-70	70-75	75-80	80-85	85-90
P1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1
P2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0

Chromosome 2															
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-45	45-50	50-55	60-65	65-70	70-75	75-80	80-85	85-90
P1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0

Fils1															
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-45	45-50	50-55	60-65	65-70	70-75	75-80	80-85	85-90
P1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0

Fils2															
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-45	45-50	50-55	60-65	65-70	70-75	75-80	80-85	85-90
P1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
P2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0

FIGURE 4.9 – Exemple de croisement des chromosomes

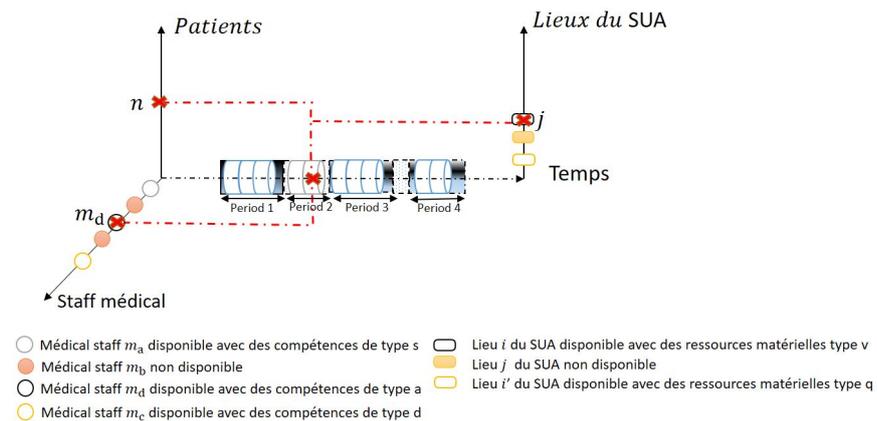


FIGURE 4.10 – Exemple d'affectation des tâches de soins hypercube en quatre dimensions conformant aux contraintes

	0-5 min	5-10 min	10-15 min	15-20 min
Patient 1 (durée de traitement : 10 min)	0	1	1	0
Patient 2 (durée de traitement : 3 min)	1	0	0	0
Patient 3 (durée de traitement : 5 min)	1	0	0	0

*Mutation : les changements sont en bleu* ↓

	0-5 min	5-10 min	10-15 min	15-20 min
Patient 1 (durée de traitement : 10 min)	0	0	1	1
Patient 2 (durée de traitement : 3 min)	0	1	0	0
Patient 3 (durée de traitement : 5 min)	1	0	0	0

FIGURE 4.11 – Mutation

supplémentaires, un seul patient est traité à un moment donné par un membre du personnel médical. Si la case choisie doit être changée de 0 à 1, nous devons vérifier que le membre du personnel médical possède les compétences requises et qu'il est disponible pour traiter le patient qui se trouve dans cet intervalle. Si la condition est vérifiée, l'emplacement est muté.

Cette première phase de mutation permet ainsi de changer l'affectation du personnel médical aux patients. Cependant, les durées des processus de traitements du patient peuvent être imprécises et le traitement est divisé en plusieurs intervalles. Cette mutation est contrôlée par les deux axes de ressources (Personnel médical et Lieu du SUA), afin de respecter la viabilité de l'ensemble final des solutions générées.

#### 4.4.1.5 Recherche locale

Nous avons utilisé l'algorithme de hill-climbing comme une méthode de recherche locale. L'idée est de chercher d'une manière itérative parmi les solutions voisines d'un individu la meilleure solution. La génération des solutions voisines est effectuée en gardant le même voisinage (le même axe) et en variant une seule composante à la fois de la solution (changement des coordonnées) ou en changeant l'axe (changement de voisinage) jusqu'à l'obtention d'un optimum local (algorithme 3).

---

#### Algorithme 3 : Recherche locale : algorithme de hill-climbing

---

**input** : Solution  $Sh$  générée après la mutation  
**output** : Meilleure solution (optimum local)

- 1 **Begin**
- 2 **while** (*optimum local n'est pas atteint*) **do**
- 3     Sélectionner un axe dans le chromosome hypercube  $Sh$  ;
- 4     Chercher le voisinage de  $Sh$  sur cet axe ;
- 5     Évaluer les solutions voisines ;
- 6      $Sh \leftarrow$  meilleur voisin
- 7 **end**
- 8 **end**

---

## 4.5 Processus d'orchestration dynamique

Le processus d'orchestration dynamique vise à réduire l'impact de l'interférence permanente entre les 3 types de patients (PP, PNP et PUNP) qui arrivent au SUA. Cette interférence dépend entre autres de l'aspect stochastiques, de la durée de consultation et du flux d'arrivée totalement aléatoire des patients, empêchant ainsi toute planification préventive [F. AJMI, ZGAYA et al., 2019].

L'idée directrice de nos travaux de recherches est de développer une architecture d'orchestration qui pilote en temps réel le workflow du parcours patient au SUA (cf. 3.8.3), évaluant et améliorant les IPC pendant l'exécution de chaque instance de ce workflow. Dans cette architecture, nous utilisons un système multi-agent dans lequel chaque agent a son propre comportement et peut représenter une fonction logicielle ou un rôle humain tel que celui d'un patient ou celui d'un membre du personnel médical. Ces agents assurent la communication, la coordination et la négociation entre eux afin de fournir les meilleurs soins aux patients. Grâce aux comportements des agents et aux protocoles d'interaction, le système proposé établit un lien direct en temps réel entre les performances requises (IPC) sur le terrain et les décisions prises afin de réduire l'impact de la tension.

L'architecture présentée dans la figure 4.12 est composée de 3 niveaux :

- Le 1<sup>er</sup> niveau (le supérieur) contient des modèles mathématiques (critères, contraintes) et algorithmiques permettant de caractériser une situation logistique de référence du SUA.
- Le 2<sup>e</sup> niveau contient un SMA qui analyse la situation réelle du terrain dans le SUA afin d'avoir, en temps réel, les bonnes informations. En cas de tension, ces agents doivent collaborer et négocier afin d'atteindre le plus rapidement possible la situation logistique de référence. Ceci est possible grâce à l'optimisation collaborative entre eux.
- Le 3<sup>e</sup> niveau représente la situation réelle du terrain du SUA qui est analysée par les agents du 2<sup>e</sup> niveau. L'objectif est de réorchestrer le parcours patients représenté par le Workflow en cours d'exécution.

Cette architecture innovante et générique est basée sur des agents communicants (2<sup>e</sup> niveau) représentant les différents acteurs du SUA (3<sup>e</sup> niveau) : patients, personnel médical, ect. Les agents communicants examinent en permanence l'information sur le 3<sup>e</sup> niveau en comparant la situation logistique réelle avec la situation logistique de référence. Selon l'écart entre ces deux situations, les agents doivent adapter leurs comportements et leurs rôles pour atteindre le fonctionnement normal du SUA le plus rapidement possible.

### 4.5.1 Système multi-agent (Le 2<sup>e</sup> niveau de l'architecture)

Dans cette partie, nous présentons les 6 types d'agents principaux du 2<sup>e</sup> niveau de l'architecture proposée. La communication entre ces agents est représentée par le diagramme de séquences de la figure 4.15 :

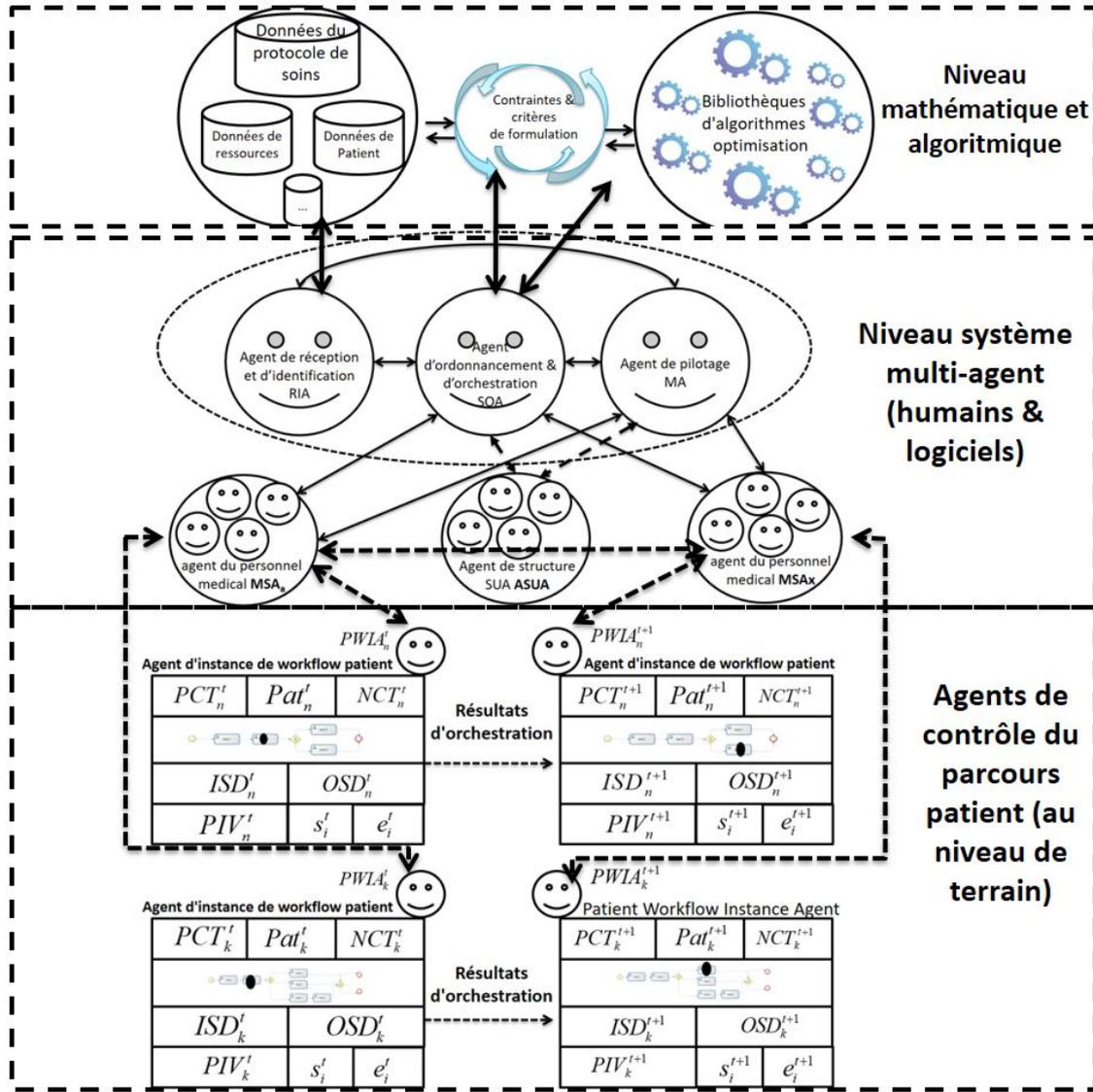


FIGURE 4.12 – L'architecture à trois niveaux proposée

- L'agent de réception et d'identification (RIA) il a principalement deux comportements
  - le comportement d'accueil : permet la gestion de l'arrivée des nouveaux patients par la création pour chaque patient d'un agent qui va représenter ce patient dans le système. Ainsi, pour chaque patient  $n$  à l'instant  $t$ , nous avons un *agent patient* doté d'un contexte dynamique représenté par les instances du workflow : l'agent d'instance de workflow patient  $PWIA_n^t$ .
  - Le comportement d'identification : permet d'identifier les pathologies du patient et la liste des tâches de soins nécessaires. Pour ce faire, le RIA doit être connecté à la base de données des protocoles médicaux. Toutes les tâches de soins identifiées doivent être envoyées à l'agent d'ordonnancement et d'orchestration SOA présenté ci-dessous.
- L'agent d'ordonnancement et d'orchestration (SOA) il a pour rôle de calculer régulièrement l'ordonnancement des patients tout en leur affectant les ressources les plus adéquates. L'ordonnancement généré est envoyé à tous les agents du personnel médical (MSA) à l'instant ( $t$ ). Ainsi, pour chaque  $PWIA_n^t$ , nous devons affecter le membre du personnel médical ( $a$ )  $MSA_{n,a}^t$  au traitement de soins du patient  $n$  à l'instant  $t$ . La SOA a deux comportements :
  - Le comportement ordonnanceur : grâce à l'intégration de l'algorithme AMOR dans le comportement de SOA, les tâches de soins sont ordonnancés en fonction des informations envoyées par le RIA, optimisant les IPC.
  - Le comportement orchestrateur : le SOA orchestre et ré-orchestre le workflow du parcours patient lorsque des perturbations se produisent dans le SUA, tout en optimisant les indicateurs de performance lors de l'exécution du workflow. Les informations correspondant aux perturbations sont reçues par l'agent de pilotage (MA). Par exemple : équipement non disponible, présence d'un patient plus urgent, absence d'un personnel médical, etc.
- L'agent de pilotage (MA) il contrôle les instances du workflow tout en pilotant leur exécution en temps réel. Ainsi, il reçoit toutes les informations relatives aux perturbations du  $PWIA_n^t$  ou du membre du personnel médical correspondant. En outre, le MA vérifie quand les tâches de soins suivantes doivent être exécutées et quelles informations doivent être reçues des tâches de soins précédentes. Ainsi, pour un patient  $n$  à l'instant  $t$ , le MA contrôle le changement d'états de l'agent : de  $PWIA_n^t$  à  $PWIA_n^{t+1}$ . De plus, lorsque l'état du patient change (la pathologie évolue), il est nécessaire de retirer, de modifier ou d'ajouter certaines tâches de soins. Cet agent communique les nouvelles tâches de soins au RIA afin d'identifier la bonne liste des tâches de soins puis il les communique au SOA ;
- L'agent du personnel médical  $m_a$  pour le patient  $n$  à l'instant  $t$  :  $MSA_{n,a}^t$ . Cet agent représente le membre du personnel médical  $a$  qui traite le patient  $n$  à l'instant  $t$ . Il correspond à un agent mobile, représentant la mobilité du membre du personnel médical dans le SUA pour réaliser le traitement du patient ;
- L'agent d'instance du Workflow pour le patient  $n$  à l'instant  $t$  :  $PWIA_n^t$  cet agent représente l'évolution dynamique de l'état de santé du patient au fil du temps. Le patient qui arrive

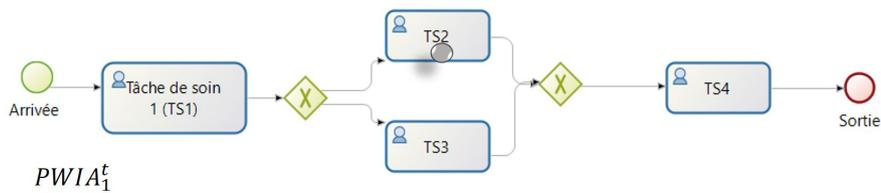


FIGURE 4.13 – Exemple d'instance du workflow avec une tâche en cours

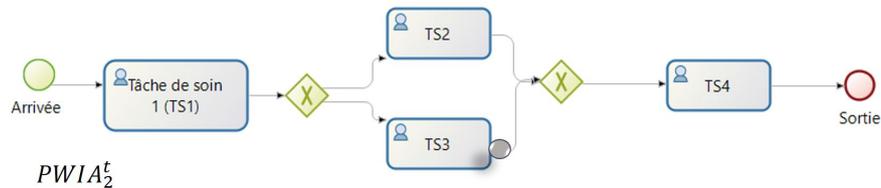


FIGURE 4.14 – Exemple d'une instance du workflow avec une tâche terminée

au SUA déclenche la création de la première instance de son workflow par le RIA pour l'exécuter à l'instant  $t_0$ . Chaque instance de workflow comprend une ou plusieurs tâches à exécuter. La figure 4.13 donne un exemple d'instance avec une tâche en cours. La figure 4.14 donne un autre exemple d'une instance avec une tâche terminée. Le patient est représenté par un marquage dans le workflow déclenché par l'événement d'arrivée du patient. Ensuite, le  $PWIA_n^t$  met à jour son environnement : variables, paramètres, IPC, tâches suivantes et précédentes, etc. Dès que la tâche en cours est terminée (instant  $t + 1$ ), l'état de l'agent est modifié. Donc, il bascule vers un nouvel état avec une instance de workflow différente (avec une nouvelle tâche en cours). Les paramètres d'environnement de  $PWIA_n^t$  sont expliqués dans la section suivante.

- L'agent qui gère les différents lieux de SUA (ASUA). Chaque lieu du SUA possède un type de matériel spécifique et contient plusieurs box (n'ayant pas nécessairement le même type de matériel). Par exemple, toute zone (A,B,C et D), l'IRM, l'unité de soins de courte durée, etc, représentent un lieu du SUA à part entière. L'ASUA vérifie l'adéquation du type de matériel du box dans lequel le patient est affecté avec sa pathologie. L'agent ASUA gère les lieux d'une manière souple au sein de l'architecture proposée. Par exemple, en mode tension si il n'y a aucun box disponible l'ASUA autorise le traitement de patients dans les couloirs.

#### 4.5.2 Le niveau du SUA (Le 3<sup>e</sup> niveau de l'architecture)

Ce niveau contient entre autres les instances du workflow qui modélisent les parcours patients (cf. 3.8.3). Dès que le RIA identifie les pathologies du patient ainsi que la liste des tâches de soins demandées. Le SOA crée l'agent  $PWIA$  correspondant avec un état initial. L'événement de démarrage du workflow correspondant déclenche le processus, mais le  $PWIA$  attend les ordres d'ordonnancement ou d'orchestration du SOA.

En effet, les agents communiquent et collaborent entre eux pour atteindre un objectif commun qui est *lutter contre la tension* au SUA. l'agent *PWIA* intègre plusieurs paramètres et des variables de décisions qui sont définis dans le paragraphe suivant.

### 4.5.3 Les paramètres d'environnement du PWIA

Toutefois, pour accéder à la variable de décision  $V$  de  $PWIA_n^t$  : pour tout instant  $t$  et pour tout patient  $n$ , nous utilisons ce symbole ( $\rightarrow$ ) :  $PWIA_n^t \rightarrow V$

- $PWIA_n^t \rightarrow Pat$  définit la pathologie à traiter du patient  $n$  à l'instant  $t$ . Néanmoins, la pathologie du patient peut évoluer au cours du temps. Dans ce cas, le MSA envoie au SOA la liste des nouvelles tâches de soins à effectuer avec les nouvelles contraintes correspondantes. Par conséquent, le SOA active son rôle d'orchestration afin d'envoyer à la  $MSA_{n,a}^t$  la nouvelle liste des tâches à accomplir. Alors le  $PWIA_n^t$  met à jour son état ;
- $PWIA_n^t \rightarrow PCT$  et  $PWIA_n^t \rightarrow NCT$  représentent respectivement à l'instant  $t$  pour le patient  $n$ , la liste ordonnée des tâches de soins déjà effectuées (PCT) et la liste ordonnée des tâches de soins à faire (NCT).
  - $PWIA_n^t \rightarrow PCT = null$  s'il n'y a pas des tâches prédécesseurs. Cette liste est initialement nulle (à l'arrivée du patient) et au cours du temps augmente en ajoutant par ordre chaque tâche de soins effectuée. c'est à dire à chaque fois qu'une tâche est terminée, elle est ajoutée à la fin de cette liste.
  - $PWIA_n^t \rightarrow NCT = null$  s'il n'y a pas des tâches successeurs. Cette liste est également dynamique car l'état de santé du patient évolue au cours du temps. Ainsi, cette liste augmente ou diminue au cours du temps. Dès que cette liste devient nulle, cela signifie que le patient est susceptible de subir son dernier traitement avant sa sortie.
- $PWIA_n^t \rightarrow ISD$  et  $PWIA_n^t \rightarrow OSD$  représentent respectivement à l'instant  $t$  et pour le patient  $n$ , les données d'entrée et les données de sortie de l'état de santé de ce patient
  - $PWIA_n^t \rightarrow ISD$  représente l'ensemble des informations nécessaires à l'exécution de la tâche de soins en cours  $PWIA_n^t$ . Ces informations peuvent contenir des données provenant de l'exécution du  $PWIA_n^{t-1} \rightarrow OSD$
  - $PWIA_n^t \rightarrow OSD$  représente l'ensemble des informations générées à partir de l'exécution de la tâche de soins en cours  $PWIA_n^t$ . Ces informations peuvent être utilisées pour l'exécution de  $PWIA_n^{t+1} \rightarrow ISD$
- $PWIA_n^t \rightarrow PIV$  représente le vecteur des indicateurs de performance à l'instant  $t$  pour le patient  $n$ . Ce vecteur contient une liste de composants dont chacun correspond à une valeur d'IPC. Ces valeurs sont mises à jour lors de l'exécution du Workflow. Le  $PWIA_n^t$  vérifie l'évolution de chaque composant du  $PWIA_n^t \rightarrow PIV$ . S'il détecte un écart entre l'évolution en temps réel et l'évolution de référence de ces IPC, alors le  $PWIA_n^t$  communique ces modifications à la SOA. Ce dernier orchestre le parcours patient en fonction de l'évaluation de ces IPC lors de l'exécution de l'instance de workflow. Comme mentionné auparavant, nous

nous concentrons que sur trois IPC intra-SUA : la durée totale de séjour (DTS), le temps d'attente cumulé (TAC) et la charge de soins restants (CSR).

- $PWIA_n^t \rightarrow s_i$  et  $PWIA_n^t \rightarrow e_i$  représentent respectivement pour le patient  $n$ , l'heure de début et l'heure de fin réelle de la tâche de soins  $i$  correspondante à l'état actuel de  $PWIA_n^t$ . Au début de la tâche de soins  $i$ ,  $PWIA_n^t$  met à jour la valeur réelle de sa  $s_i$ . À la fin de la tâche de soins  $i$ ,  $PWIA_n^t$  met à jour la valeur réelle de son  $e_i$ . L'enregistrement de ces temps est très important car il permet au  $PWIA_n^t$  de transmettre les dates exactes de début et de fin de la tâche en cours  $i$  au SOA. Ce dernier pourra ajuster l'ordonnancement grâce à l'orchestration dynamique du workflow.

#### 4.5.4 Calcul en temps réel des indicateurs de performance

Après la création du  $PWIA_n^t$ , l'état de l'agent évolue au cours du temps en fonction de l'évolution des soins prodigués au patient. À chaque variation d'état, le  $PWIA_n^t$  met à jour en temps réel ses variables de décision et ses indicateurs de performance.

1. **Le calcul du temps d'attente cumulé (TAC) :**  $PWIA_n^t \rightarrow PIV \rightarrow TAC$  : Sachant que  $td_n$  correspond à l'heure d'arrivée du patient  $n$  dans le SUA (cette information est enregistrée par le RIA), ainsi pour une tâche en cours donnée  $i$  dans le workflow d'instance  $PWIA_n^t$  du patient  $n$  et à l'instant donné  $t$ , nous pouvons calculer le temps d'attente cumulé du patient : TAC comme indiqué dans l'algorithme 4.

---

##### Algorithme 4 : temps d'attente cumulé (TAC)

---

```

input :  $PWIA_n^t, PWIA_n^{t-1}, td_n, i$ 
output :  $PWIA_n^t$  // mis à jour
1 Begin
2 if ( $i \geq 2$ ) // l'indice de la tâche déjà exécutée  $i$  du patient  $n$  est supérieur ou égal à 2 then
3   |  $PWIA_n^t \rightarrow PIV \rightarrow TAC = (PWIA_n^{t-1} \rightarrow PIV \rightarrow TAC) + ((PWIA_n^t \rightarrow s_i) - (PWIA_n^{t-1} \rightarrow e_i))$ 
4 else
5   | if  $i = 1$  // la première consultation then
6     |  $PWIA_n^t \rightarrow PIV \rightarrow TAC = (PWIA_n^t \rightarrow s_i) - td_n$ 
7     | end
8 end
9 end calcul TAC

```

---

2. **Durée totale de séjour (DTS) :** durée du séjour du patient  $n$  après l'exécution de la tâche de soins  $i$  à l'instant donné  $t$  est calculée par l'équation (4.13) sachant que ce patient est arrivé au SUA à  $td_n$  :

$$PWIA_n^t \rightarrow PIV \rightarrow DTS = (PWIA_n^t \rightarrow e_i) - td_n \quad (4.13)$$

3. **La charge de soins restante du patient (CSR) :** sachant que la durée totale estimée (ETD) de la pathologie du patient  $n$  est connue et mise à jour à chaque évolution de l'état de pathologie. en effet, la charge de soins restante du patient (CSR) à la fin de la tâche de traitement  $i$  ( $i \geq 1$ ) est calculée avec l'équation (4.14).

$$PWIA_n^{t+1} \rightarrow PIV \rightarrow CSR = (PWIA_n^t \rightarrow PIV \rightarrow CSR) - \theta_n^{t+1} \quad (4.14)$$

$$\text{Avec ; } PWIA_n^{t_0} \rightarrow PIV \rightarrow CSR = 100\% \text{ et } \theta_n^{t+1} = \frac{(PWIA_n^t \rightarrow e_i) - (PWIA_n^t \rightarrow s_i)}{ETD(PWIA_n^t \rightarrow PAT)} * 100$$

#### 4.5.5 Algorithme d'orchestration dynamique

Nous supposons que chaque tâche nécessite une ressource humaine  $MSA_a$  pour son exécution. Pendant cette exécution, la ressource humaine est indisponible, elle devient disponible juste après le traitement de cette tâche. L'algorithme 5 affecte, en fonction d'une heuristique adéquate (sans prendre en compte les urgences vitales car ils ont toujours la priorité absolue), les ressources disponibles pour les instances du workflow patient, à l'aide des variables suivantes :

$N_t$  : le nombre de patients (PP+PNP) dans le SUA à l'instant  $t$ ,

$$N_t = NB_{i,t} - y_{i,o,t} \quad (\text{avec } o = 3) \quad (4.15)$$

$M_t$  : le nombre de membres du personnel médical dans le SUA à l'instant  $t$

$MSA_a^t$  : est un membre du personnel médical du SUA avec  $a \in [1, M_t]$

$$PWIA^t = \{PWIA_n^t\} \text{ avec } n \in [1, N_t] \quad (4.16)$$

$$PIV^t = \{PWIA_n^t \rightarrow PIV\} \text{ avec } n \in [1, N_t] \quad (4.17)$$

$$MSA^t = \{MSA_a^t\} \text{ avec } a \in [1, M_t] \quad (4.18)$$

---

#### Algorithme 5 : Algorithme d'orchestration dynamique

---

**input** :  $t, PWIA^t, MSA^t$  // à l'instant donné  $t$

**output** : Tous les patients en attente à l'instant donné  $t$  sont ordonnancés ou orchestrés

1 **Initialisation** :  $a = 0$

2 **while** ( $MSA^t \neq \emptyset$ ) et ( $PWIA^t \neq \emptyset$ ) **do**

3     **if**  $\exists a \neq 0 / MSA_a^t \in MSA^t$  avec une compétence requise **then**

4         Sélectionner le  $MSA_a^t \in MSA^t$  avec la compétence demandée disponible ;

5         Sélectionner le patient  $n$  le plus prioritaire qui a besoin de la compétence sélectionnée avec l'instance  $PWIA_n^t \in PWIA^t$  selon l'heuristique HOD (algo 6) ;

6         Attribuer le  $MSA_{n,a}^t$  au patient d'instance  $PWIA_n^t$  ;

7         Calculer et mettre à jour  $PWIA^t \rightarrow PIV$  // Cette mise à jour des IPC est essentielle pour la prise de décision

8     **end**

9 **end**

---

Suite à l'algorithme 5, une fois que le  $MSA_a^t$  fait son travail, il redevient disponible dans  $MSA^t$ .

L'heuristique de priorité d'instance MSA de l'algorithme 6 correspond à la décision du personnel médical en fonction de l'évolution de l'état de santé du patient.

---

**Algorithme 6** : Heuristique d'orchestration dynamique

---

**input** :  $t, PWIA^t$   
**output** : Sélectionner le patient  $n$  le plus prioritaire avec le workflow d'instance  
 $PWIA_n^t \in PWIA^t$

- 1 **Initialisation** : Sélectionner l'ensemble  $\varepsilon$  d'instances incluses dans  $PWIA^t$  à l'instant  $t$  avec la valeur maximale de  $PIV^t \rightarrow CSR$
- 2 **if**  $Card(\varepsilon) = 1$  **then**
- 3 | sélectionner l'instance unique  $PWIA_j^t \in \varepsilon$
- 4 **else**
- 5 | **if**  $Card(\varepsilon) > 1$  **then**
- 6 | | sélectionner l'ensemble  $\varepsilon_1 \subseteq \varepsilon$  de  $PWIA^t$  avec la valeur maximale de  $PIV^t \rightarrow TAC$
- 7 | **end**
- 8 | **if**  $Card(\varepsilon_1) = 1$  **then**
- 9 | | sélectionner l'instance unique  $PWIA^t$  de  $\varepsilon_1$
- 10 | **else**
- 11 | | **if**  $Card(\varepsilon_1) > 1$  **then**
- 12 | | | sélectionner l'ensemble  $\varepsilon_2 \subseteq \varepsilon_1$  de  $PWIA^t$  avec la valeur maximale de  
 $PIV^t \rightarrow DTS$
- 13 | | **end**
- 14 | | **if**  $Card(\varepsilon_2) = 1$  **then**
- 15 | | | sélectionner l'instance unique  $PWIA_n^t$  de  $\varepsilon_2$
- 16 | | **else**
- 17 | | | **if**  $Card(\varepsilon_2) > 1$  **then**
- 18 | | | | Sélectionner le  $PWIA_n^t$  plus prioritaire selon *l'heuristique de priorité d'instance*  
 $MSA$
- 19 | | | **end**
- 20 | | **end**
- 21 | **end**
- 22 **end**

---

## 4.6 Comportement global du système

Dans cette section, nous présentons le pourcentage de gain de performance moyen (PGPM) mesuré pour chaque IPC calculé par les agents afin d'orchestrer le workflow en cours d'exécution. Ce phénomène est illustré dans le diagramme de séquence (figure 4.15) représentant l'interaction entre les principaux agents du système.

### 4.6.1 Diagramme de séquence

Le comportement dynamique global du système est décrit par la figure 4.15 sous la forme d'un diagramme de séquence déployé avec l'outil UML. Dans ce diagramme, les différents agents collaboratifs du système sont représentés sous la forme de lignes de vie interactives qui communiquent par les échanges de messages. Un message est un élément de communication bidirectionnel entre lignes de vie qui déclenche un comportement spécifique au sein de l'agent récepteur. Il existe trois types de messages : *un message synchrone* (représenté par une flèche pleine) qui bloque l'agent émetteur jusqu'à la réception de la réponse, *un message asynchrone* (représenté par une flèche creuse) et *un message réflexif* (représenté par une boucle) qui représente un comportement interne. Les bandes verticales le long d'une ligne de vie représentent les périodes d'activation. Ce diagramme montre comment les séquences de messages se succèdent et à quels moments les acteurs sont sollicités. On peut donc voir sur la figure 4.15 qu'à l'arrivée d'un ou plusieurs patients, l'agent RIA identifie les différentes tâches de soins et leurs niveaux d'urgence et envoie toutes ces informations à l'agent SOA. Ce dernier crée les PWIA correspondantes et déclenche le processus d'orchestration et de ré-orchestration qui se poursuit tout au long qu'il existe des patients en attente.

### 4.6.2 Orchestration basée sur des indicateurs de performance

La stratégie qui relie les actions aux indicateurs de performance correspond à l'orchestration dynamique. Cette dernière est mise en évidence par l'agent qui contrôle en temps réel l'instance du workflow et calcule pour cette instance les valeurs réelles des indicateurs (DTS, CSR, TAC), enregistrées dans le PIV. Dans le chapitre 5, nous testons à travers plusieurs scénarios l'impact de l'orchestration statique (suivi de la séquence entre les tâches données par le processus de l'ordonnancement tout au long de l'exécution du workflow) ainsi que l'impact de l'orchestration dynamique (qui consiste à modifier l'ordonnancement en cours d'exécution) sur ces indicateurs de performance. Pour ce faire, nous calculons, pour chaque IPC dans le PIV, sa valeur moyenne pour tous les patients participant à l'expérimentation (cf. 5.5.4.1). Nous devons calculer ces valeurs pour l'orchestration statique et dynamique (OS et OD).

Pour chaque IPC enregistré dans le PIV, le pourcentage de gain de performance moyen (PGPM) est calculé comme suit :

$$PGPM(IPC) = \frac{OD(IPC) - OS(IPC)}{|OS(IPC)|} * 100 \quad \forall \quad IPC \in \{DTS, CSR, TAC\} \quad (4.19)$$

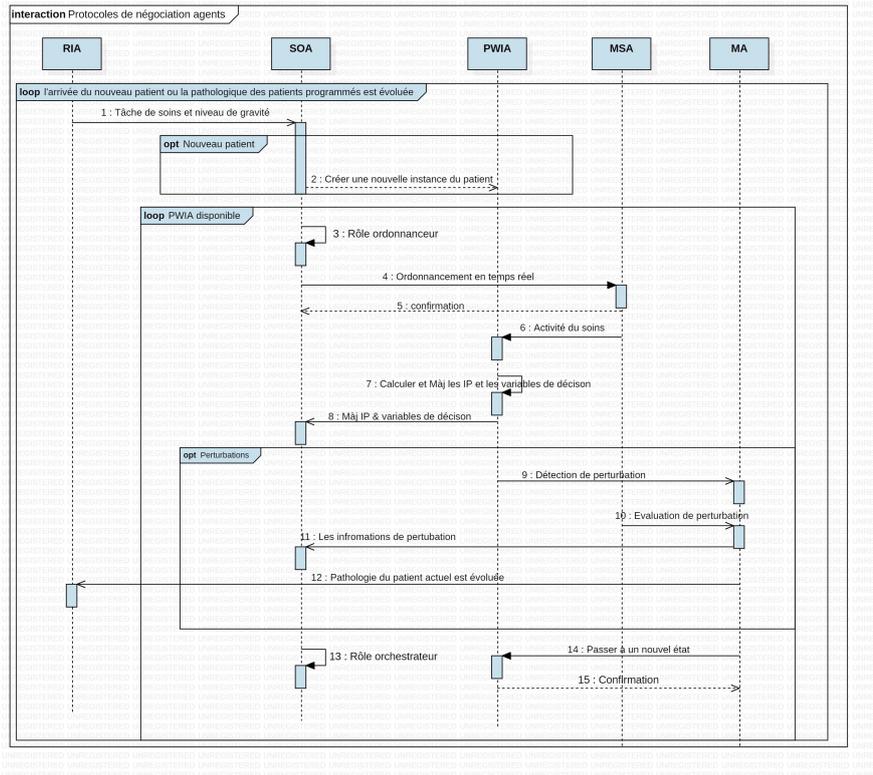


FIGURE 4.15 – Diagramme de séquence

Où

- $PGPM(IPC)$  est le pourcentage de gain de performance moyen de IPC,
- $OD(IPC)$  est la valeur moyenne totale de l'IPC pour l'orchestration dynamique du workflow,
- $OS(IPC)$  est la valeur moyenne totale de l'IPC pour l'orchestration statique du workflow.

Puis :

- Si  $PGPM(IPC) < 0$  alors, l'IPC a été amélioré grâce à l'orchestration dynamique,
- Si  $PGPM(IPC) > 0$  alors, l'IPC s'est détérioré dans le contexte de l'OD par rapport au contexte de l'OS,
- Si  $PGPM(IPC) = 0$  alors, il n'y a pas de gain dans les valeurs d'IPC considéré.

## 4.7 Synthèse

L'ordonnancement à horizon glissant proposé est basé sur deux processus, un processus d'ordonnancement et un processus d'orchestration. Lors de la première période du premier horizon, le processus d'ordonnancement est lancé en appliquant l'AM pour donner un bon ordonnancement des patients présents dans cette période. Ensuite, pendant que l'ordonnancement se relance à nouveau dans la deuxième période, le processus d'orchestration dynamique est lancé en parallèle sur la première période, et ainsi de suite jusqu'à la dernière période de l'horizon. Ce phénomène de

l'exécution d'ordonnancement et de l'orchestration avec un décalage d'une période se répète pour tous les autres horizons. Ceci est présenté dans une architecture à base d'agents qui permet d'unifier les dimensions structurelles, fonctionnelles et comportementales du SUA dans un même schéma. L'idée est d'identifier tous les éléments cruciaux afin de prendre en compte tous les paramètres pour l'optimisation locale et globale de la structure du SU en générale et du SUA spécifiquement. Par exemple, cette architecture permet de combiner les méthodes d'optimisation et les systèmes multi-agents pour optimiser d'une manière collaborative les différents flux logistiques hospitaliers. D'autres architectures de SU ont été élaborées dans la littérature pour optimiser le flux logistique dans les SU telles que dans [WIMMER et al., 2016] et dans [WAUTELET et al., 2018]. Néanmoins, la plupart de ces travaux n'ont pas utilisé des stratégies qui relient les mesures de performance aux actions réelles. Par exemple, actuellement dans les organisations de santé, il y a un manque de communication entre les différents acteurs des hôpitaux. Les informations de dossier patient ne sont pas échangées en temps réel entre les différents membres du personnel médical (arrivent parfois en retard ou sont oubliées).

## 4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une méthode d'ordonnancement à horizon glissant présentée en deux phases. la première phase est basée sur l'algorithme AMOR pour l'ordonnancement des patients programmés et non programmés dans le SUA. L'utilisation d'AMOR attribue un temps de consultation théorique à chaque patient dès son arrivée, en accordant non seulement une priorité plus élevée aux patients les plus urgents, mais aussi, en optimisant la charge de travail du personnel médical. La performance de l'algorithme AMOR a été améliorée par l'incorporation d'un modèle de chromosome en hypercube. Ensuite, afin de mieux articuler l'interférence entre les trois types de patients (PP, PNP, PUNP), nous avons intégré une architecture informatique à trois niveaux pour le SUA. Cette architecture intègre des agents communicants afin d'atteindre un objectif commun qui est *lutter contre la tension*. Cette architecture a un rôle efficace, elle permet effectivement de relier les indicateurs de performance aux actions réelles à travers la phase de l'orchestration dynamique. En effet, pour évaluer en temps réel les IPC, l'architecture à base d'agents proposée orchestre et ré-orchestre d'une manière dynamique les instances du workflow patient en cours d'exécution. Ceci est possible grâce à l'intégration des algorithmes de planification et de ré-orchestration dans le comportement de l'agent SOA afin d'optimiser les trois indicateurs de performance (TAC, DTS, CSR) lors de l'exécution du PWIA. Dans le chapitre 5, nous présentons des résultats de simulation utilisant des bases de données réelles du SUA portant sur l'année (2016-2017), ces résultats prouvent l'intérêt des approches proposées.



# Simulations et Résultats

## 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats et les différents scénarios de simulation de l'approche de résolution proposée dans le chapitre 4 en utilisant la base de données réelle du SUA fournie par l'hôpital (BDDH). Cette BDDH porte sur une année (de juin 2016 jusqu'à mai 2017) et ses données sont collectées grâce au logiciel ResUrgence du SUA de CHRU de Lille. En effet, nous commençons par analyser minutieusement les données de cette BDDH, puis nous nous focalisons sur la simulation de notre architecture de résolution dynamique qui est basée sur l'alliance entre la métaheuristique utilisée dans AMOR et les SMA. Les résultats trouvés prouvent l'intérêt d'adopter une telle approche pour mieux gérer le problème de tension dans le SUA qui représente notre terrain d'expérimentation.

## 5.2 Analyse de la BDDH

Pour analyser l'état de tension dans notre SUA, nous commençons par analyser statistiquement les données fournies par le logiciel ResUrgences. Pour ce faire, il a fallu comparer ces analyses en situation de fonctionnement normal (SN) qu'en situation de tension (ST) du SUA. Cette analyse de données est essentielle pour la détermination des indicateurs clés de la tension. En effet, elle nous montrera qu'une situation de tension n'est pas seulement caractérisée par des périodes où la fréquentation des patients est élevée mais également par la combinaison de plusieurs d'autres indicateurs. Grâce à la collaboration avec les médecins urgentistes nous avons défini un certain nombre d'indicateurs qui seront détaillés dans les paragraphes suivant.

**Les indicateurs possibles :** Nombre de patients aux urgences par heure, Le flux d'arrivée de patients, La durée de séjour, Temps d'attente, Nombre de patients actuellement en unité d'hospitalisation courte durée depuis plus de 24h, Nombre de patients depuis plus de 10h aux urgences, Temps de passage moyen en fonction du niveau de l'état de gravité, Nombre de patients ayant eu recours à un examen complémentaire, Nombre d'hospitalisations depuis 3 jours, Nombre de transferts pour manque de places depuis 24h, Durée moyenne d'attente depuis 2h, DTS moyenne, Le flux d'arrivée de patients, La durée de séjours, Temps d'attente, etc.

Informations du passage->CAC d'admission	IAO->date de prise en charge	Localisation->Salles	Informations du passage->date et he	Informations du passage->date	Examens complémentaires->date et heure d
1 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 00:08	((Attente pré IOA,2016-07-31 22:04:00 Etc/GMT,2016-07-	01/08/2016 00:04	01/08/2016 16:45	01/08/2016 00:04
2 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 00:13	((Attente pré IOA,2016-07-31 22:07:00 Etc/GMT,2016-07-	01/08/2016 00:07	01/08/2016 03:18	01/08/2016 00:07
3 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 00:29	((Attente pré IOA,2016-07-31 22:21:00 Etc/GMT,2016-07-31 2	01/08/2016 00:21	01/08/2016 03:01	01/08/2016 00:21
4 URGENCE PÉDIATRIQUE CONSULTATIONS (3091)	01/08/2016 00:49	((Attente IOA,2016-07-31 22:43:00 Etc/GMT,2016-07-31 2	01/08/2016 00:43	01/08/2016 03:15	01/08/2016 00:43
5 URGENCE PÉDIATRIQUE CONSULTATIONS (3091)	01/08/2016 01:11	((Attente IOA,2016-07-31 22:51:00 Etc/GMT,2016-07-31 2	01/08/2016 00:51	01/08/2016 03:44	01/08/2016 01:11
6 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 01:11	((Attente pré IOA,2016-07-31 23:04:00 Etc/GMT,2016-07-	01/08/2016 01:04	01/08/2016 04:08	01/08/2016 01:11
7 ANEST RÉA SOINS INTENSIFS (3082)		((Attente,2016-07-31 23:35:00 Etc/GMT,2016-07-31 23:47	01/08/2016 01:35	01/08/2016 18:00	01/08/2016 01:35
8 URGENCE PÉDIATRIQUE CONSULTATIONS (3091)	01/08/2016 02:18	((Attente IOA,2016-08-01 00:12:00 Etc/GMT,2016-08-01 0	01/08/2016 02:12	01/08/2016 06:03	01/08/2016 02:18
9 URGENCE PÉDIATRIQUE CONSULTATIONS (3091)	01/08/2016 02:36	((Attente IOA,2016-08-01 00:13:00 Etc/GMT,2016-08-01 0	01/08/2016 02:13	01/08/2016 05:38	01/08/2016 02:36
10 URGENCE PÉDIATRIQUE CONSULTATIONS (3091)	01/08/2016 02:31	((Attente IOA,2016-08-01 00:18:00 Etc/GMT,2016-08-01 0	01/08/2016 02:18	01/08/2016 15:00	01/08/2016 02:31
11 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 03:22	((Attente pré IOA,2016-08-01 01:19:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 03:19	01/08/2016 11:03	01/08/2016 03:22
12 ANEST RÉA SOINS INTENSIFS (3082)		((Attente,2016-08-01 01:25:00 Etc/GMT,2016-08-01 02:33	01/08/2016 03:25	02/08/2016 15:48	01/08/2016 03:22
13 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 03:35	((Attente pré IOA,2016-08-01 01:30:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 03:30	01/08/2016 06:33	01/08/2016 03:35
14 ANEST RÉA SOINS INTENSIFS (3082)		((Attente,2016-08-01 03:25:00 Etc/GMT,2016-08-01 03:45	01/08/2016 05:25	04/08/2016 17:15	01/08/2016 03:35
15 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 06:39	((Attente pré IOA,2016-08-01 04:36:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 06:36	01/08/2016 12:05	01/08/2016 06:39
16 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 07:02	((Attente pré IOA,2016-08-01 04:53:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 06:53	01/08/2016 08:48	01/08/2016 07:02
17 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 07:08	((Attente pré IOA,2016-08-01 05:05:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 07:05	01/08/2016 11:23	01/08/2016 07:08
18 URGENCE PÉDIATRIQUE CONSULTATIONS (3091)	01/08/2016 07:25	((Attente IOA,2016-08-01 05:18:00 Etc/GMT,2016-08-01 0	01/08/2016 07:18	01/08/2016 09:54	01/08/2016 07:25
19 URGENCE PÉDIATRIQUE CONSULTATIONS (3091)	01/08/2016 08:28	((Attente IOA,2016-08-01 06:16:00 Etc/GMT,2016-08-01 0	01/08/2016 08:16	01/08/2016 11:29	01/08/2016 08:28
20 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 08:32	((Attente pré IOA,2016-08-01 06:25:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 08:25	01/08/2016 13:24	01/08/2016 08:32
21 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 08:33	((Attente pré IOA,2016-08-01 06:29:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 08:29	02/08/2016 15:15	01/08/2016 08:33
22 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 08:43	((Attente pré IOA,2016-08-01 06:35:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 08:35	01/08/2016 12:41	01/08/2016 08:43
23 CIRCUIT COURT (3088)	01/08/2016 08:47	((Attente pré IOA,2016-08-01 06:43:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 08:43	01/08/2016 09:32	01/08/2016 08:47
24 CIRCUIT COURT (3088)	01/08/2016 08:50	((Attente pré IOA,2016-08-01 06:46:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 08:46	01/08/2016 09:30	01/08/2016 08:50
25 CIRCUIT COURT (3088)	01/08/2016 08:55	((Attente pré IOA,2016-08-01 06:49:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 08:49	01/08/2016 10:42	01/08/2016 08:55
26 URGENCE PÉDIATRIQUE CONSULTATIONS (3091)	01/08/2016 09:06	((Attente IOA,2016-08-01 06:53:00 Etc/GMT,2016-08-01 0	01/08/2016 08:53	01/08/2016 10:57	01/08/2016 09:06
27 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 09:02	((Attente pré IOA,2016-08-01 06:58:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 08:58	01/08/2016 13:14	01/08/2016 09:02
28 CIRCUIT COURT (3088)	01/08/2016 09:09	((Attente pré IOA,2016-08-01 07:03:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 09:03	01/08/2016 09:54	01/08/2016 09:09
29 ACCUEIL MÉDICO CHIRURGICAL (3093)	01/08/2016 09:12	((Attente pré IOA,2016-08-01 07:08:00 Etc/GMT,2016-08-	01/08/2016 09:08	01/08/2016 11:03	01/08/2016 09:12
30 Export centrale tous secteurs A					

FIGURE 5.1 – Extrait de la base de données brut 2016-2017 du SUA.

### 5.2.1 Le flux d'arrivée des patients

Nous pouvons penser qu'un état de tension est directement proportionnel à une importante augmentation du nombre d'arrivées des patients au SUA. Nous réalisons donc une analyse de données sur les flux d'arrivée des patients au SUA. Pour cela nous avons un extrait des données concernant tous les patients passés aux urgences, leurs pathologies, leur heure d'arrivée ainsi que leur heure de sortie, et les examens qui leur ont été attribués sur un an (figure 5.1).

A partir de cette base de données nous pouvons déterminer quelques caractéristiques liées au parcours patient au SUA telles que le nombre annuel moyen des visites qui atteint 9610 visites; le nombre moyen de fois où le patient a été transféré entre les différentes unités externes et internes qui ont respectivement atteint 189 et 1694 transferts; ainsi que la durée d'attente moyenne des patients qui atteint 144,86 minutes ( $\approx$  2h et 30 minutes). Ce dernier chiffre englobe l'ensemble des attentes du parcours patient y compris l'attente pour les examens complémentaires et l'attente des résultats.

Conformément aux données de BDDH, nous notons que le flux d'arrivée des patients au SUA est totalement aléatoire. Néanmoins, une analyse détaillée de l'évolution des flux des patients exprime un aspect cyclique et redondant dans les périodes de tension. En effet, le flux aléatoire d'arrivée des patients dépend en partie de l'heure et de la période d'arrivée ainsi que de certains événements épidémiques. Par exemple, nous avons pu constater que la tension est présente souvent en période hivernale qu'en période d'estivale. Ceci est dû à l'intensification des maladies transmissibles dans ces périodes telles que la grippe, la bronchiolite, etc.

La figure 5.2 montre la variation des flux d'arrivée des patients au SUA par mois durant l'année étudiée. Ceci nous permet de déterminer les mois les plus fréquentés dans la base de données fournie qui sont mai 2017, avril 2017 et octobre 2016. Afin d'affiner nos résultats, nous avons étudié le flux d'arrivée des patients par jour (figure 5.3). La courbe de la figure 5.3 évolue autour

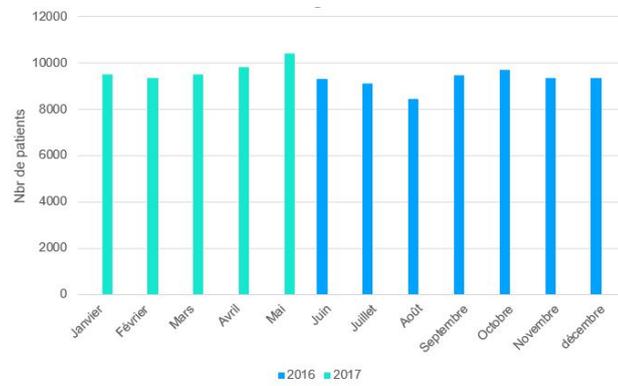


FIGURE 5.2 – Variation du nombre de patients en fonction des mois

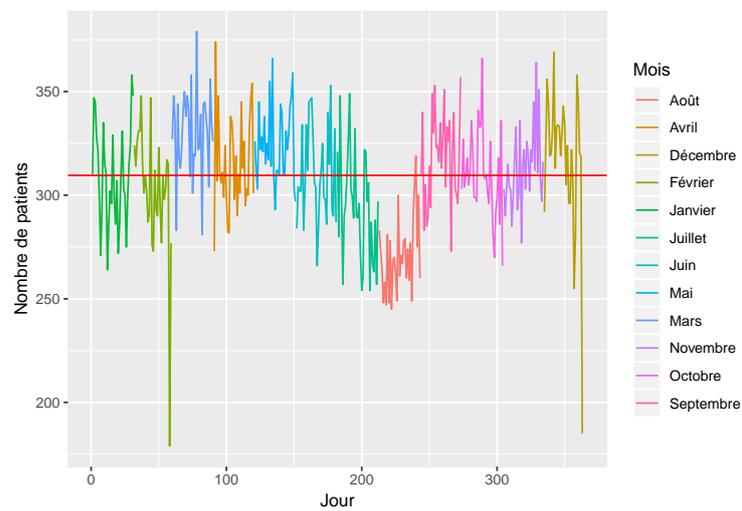


FIGURE 5.3 – Le nombre d'arrivées de patients par jour

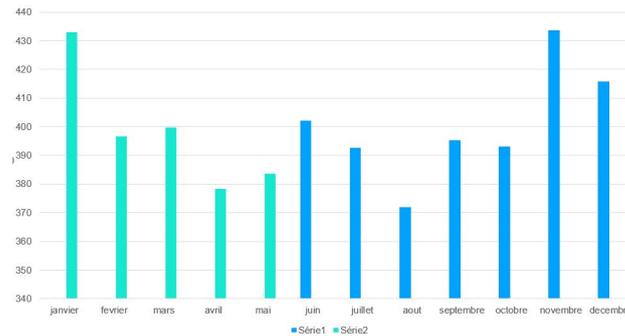


FIGURE 5.4 – Variation de la durée de séjour (moyenne par mois)

de la moyenne afin d'évaluer les hausses et les baisses de la demande. Cette courbe nous montre que la variation du flux d'arrivée du patient est très variable à cause de la présence des oscillations qui ont été auparavant absorbées par des vues plus macros. Elle nous montre également l'existence des pics journaliers. Les pics les plus importants sont identifiés aux mois d'avril, mai et septembre. En outre, le BDDH nous permet d'observer la répartition des patients mais sans préciser leurs niveau de gravité (CCMU). Un seul indicateur comme *le flux d'arrivée des patients* ne peut pas prouver l'existence de tension sur une période. En conséquence et afin de cerner les périodes les plus impactées par le phénomène de tension nous avons, décidé d'étudier d'autres indicateurs de performance au SUA.

### 5.2.2 La durée totale de séjours : DTS

La figure 5.4 montre qu'en novembre 2016, décembre 2016 et janvier 2017, la moyenne de la DTS est considérablement longue et est de l'ordre de 432 minutes par patient (7 heures et 20 minutes). Ensuite, nous avons poursuivi l'analyse en traitant le *nombre de patients dont la DTS est supérieur à 10h* (figure 5.5). Le tableau dans la figure 5.5 montre un ratio en pourcentage qui exprime le nombre de patients avec un *DTS > 10h* et le nombre de patient total par mois. Ce ratio montre que 16% à 18% des patients ont une durée de séjour qui dépasse les 10h pour les mois de novembre, décembre et janvier. A partir de ce graphique nous notons que les périodes sous tension sont les mois de novembre, décembre et janvier. Les périodes en situation de fonctionnement normal sont les mois de février, mars et avril en excluant les mois particuliers tels que la période estivale. Dans ce cadre, plus la DTS est prolongée, moins les patients en attente sont satisfaits.

Suite à nos différentes réunions avec le personnel médical du SUA et la publication d'un article dans *liberation*<sup>1</sup>, le SUA du CHRU de Lille a déclaré un état de tension la semaine du 11 janvier 2017, qui a causé le déclenchement du plan blanc. Par conséquent, nous orientons nos analyses des indicateurs vers cette période de tension. Pendant cette période, nous observons que les patients sont présents aux urgences pendant des heures, en particulier le TAP moyen

1. [https://www.liberation.fr/france/2017/01/11/grippe-plan-hopital-sous-tension-declenche-a-lille\\_1540664](https://www.liberation.fr/france/2017/01/11/grippe-plan-hopital-sous-tension-declenche-a-lille_1540664)

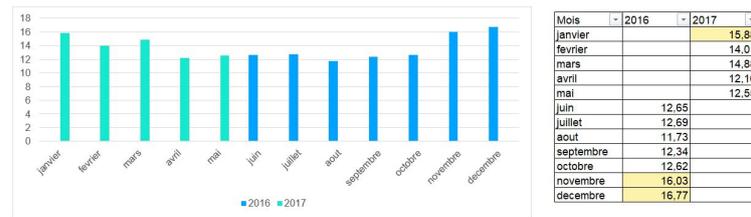


FIGURE 5.5 – Ratio du nombre de patients avec ( $DTS > 10$ ) et du nombre des patients total par mois

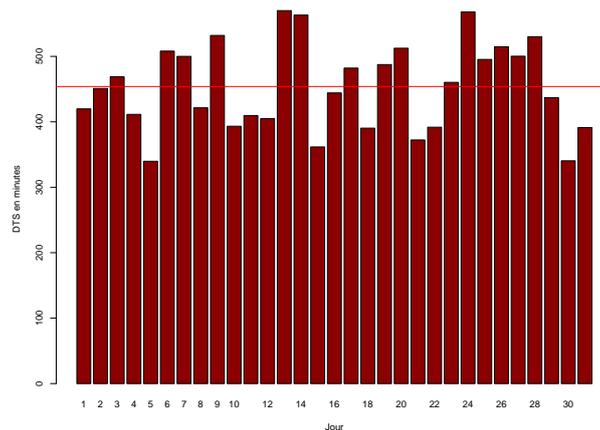


FIGURE 5.6 – Moyenne de la DTS par jour (Janvier 2017)

est égale au 71.8 minutes. Le nombre d'entrées est alors supérieur au nombre de sorties, ce qui provoque un déséquilibre entre le flux d'entrée et le flux de sortie. Ce déséquilibre provoque une surfréquentation du SUA et une surcharge de travail pour l'équipe soignante qui peuvent entraîner une perte de la qualité des soins prodiguée aux patients. Afin de mieux comprendre les causes de cet état de tension, nous avons étudié la moyenne de la DTS par jours (en janvier). En effet, la moyenne de la DTS de cette période de tension atteint  $\approx 8$  heures. La figure 5.6 montre la moyenne de la DTS des patients dans le SUA par jour pour le mois de janvier. Nous observons qu'un allongement significatif de la durée de séjour a débuté dès le 6 Janvier et est resté relativement important à partir de cette date, nous remarquons ainsi l'existence des pics notamment le 13, le 14 et le 24 Janvier.

La figure 5.7, montre la moyenne de la DTS par rapport aux jours de la semaine pour ce mois de janvier. Nous observons que les patients qui entrent au SUA le vendredi et le samedi restent plus longtemps que les autres jours. Mais, de manière globale, nous ne voyons pas de différence très marquée entre les différents jours de la semaine. La figure 5.8 exprime la moyenne de la DTS par rapport à l'heure d'entrée des patients, nous observons qu'en général les patients qui entrent entre 18 heure et 23 heure restent plus longtemps. Ensuite, la figure 5.9 affiche le nombre de patients qui entrent aux SUA par rapport au jours de la semaine, ceci nous montre que tous les lundi nous avons un nombre d'arrivées important, ces informations sont essentielles et peuvent contribuer à

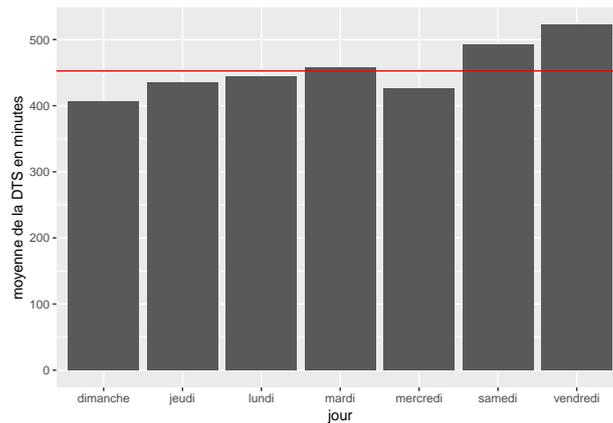


FIGURE 5.7 – Moyenne de la DTS par jour de la semaine (janvier 2017)

la prévision de la tension.

Après ces analyses globales sur cette période de tension, nous choisissons de cibler nos analyses sur la semaine de tension (du 9 au 15 janvier). L'idée est de mieux comprendre et cerner l'évolution des indicateurs de tension. Nous avons donc étudié sur cette semaine le temps de consultation moyen restant par patient et par heure. Ce temps de consultation restant correspond à la charge de travail que le médecin doit réaliser par patient. Puis, nous calculons de la même manière le temps d'attente primaire TAP (le temps d'attente avant la première consultation par un médecin) et secondaire (le temps d'attente après la première consultation par un médecin) restants. Nous avons comparé ces indicateurs par rapport à la moyenne obtenue par le mois en question pour observer les divergences (figures 5.10 et 5.11). Nous observons des forts écarts la nuit du 9 janvier qui sont dus à une surcharge de travail des médecins qui a engendré l'augmentation de l'attente primaire moyen par patient. Or, les médecins veulent réduire au maximum ce temps d'attente en raison de ses conséquences sur l'état de santé du patient. Puis, nous vérifions s'il existe une corrélation entre le temps de consultation et le temps d'attente primaire. Nous avons comparé ces calculs sur plusieurs jours sans résultats probants (figure 5.12) ce qui prouve l'existence d'autres indicateurs qui impactent la tension.

Dans ce contexte et en raison de l'existence des échelles de triage qui définissent le délai d'attente souhaitable (en fonction de la pathologies de patient) entre l'arrivée du patient et la consultation médicale (cf.2.4.2). Le dépassement de ces délais exige une réévaluation des patients engendrant un changement d'ordonnancement au sein du système. Il est important d'analyser l'état de cet indicateur lors de fonctionnement actuel de SUA.

### 5.2.3 Le temps d'attente

Nous continuons les analyses avec la *durée d'attente moyenne une fois les 2h d'attente dépassés aux urgences*. Une fois que cette attente de 2h est dépassée, la durée d'attente moyenne fluctue entre 8h

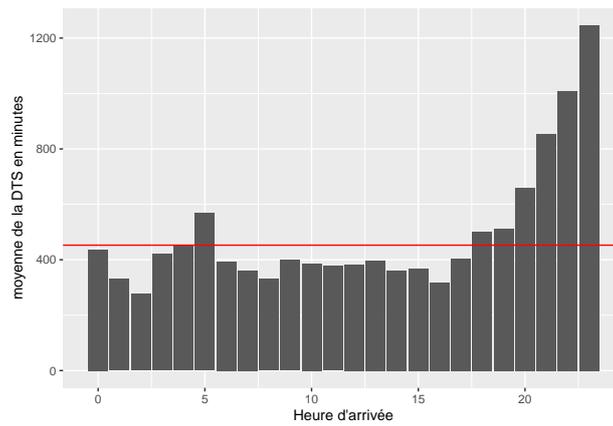


FIGURE 5.8 – Moyenne de la DTS par rapport à l'heure d'entrée (Janvier 2017)

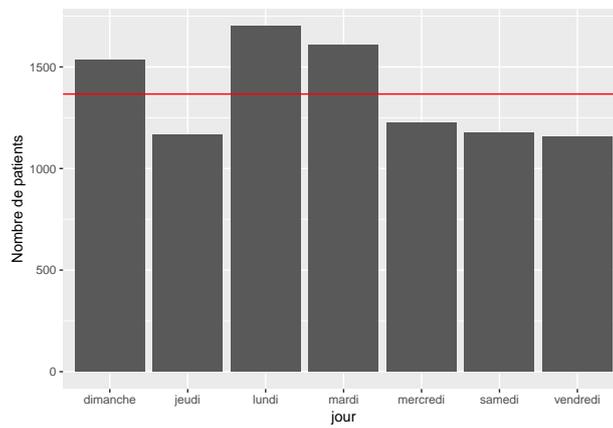


FIGURE 5.9 – Nombre des patients par jour de la semaine (Janvier 2017)

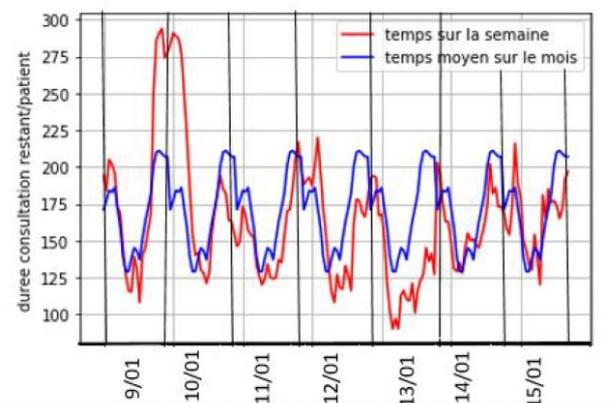


FIGURE 5.10 – Comparaison des temps de consultation restants moyens par patient et par heure

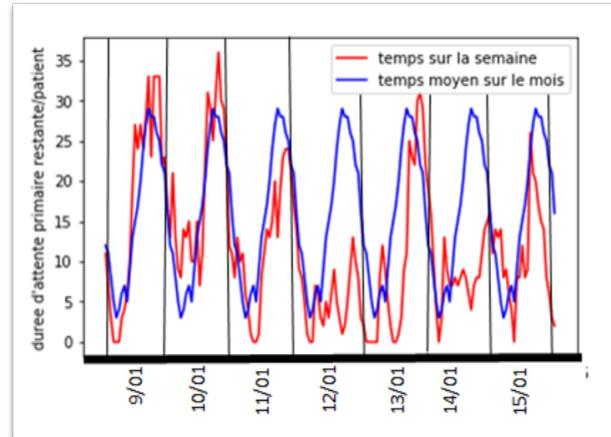


FIGURE 5.11 – Comparaison de la durée d'attente primaire par patient et par heure

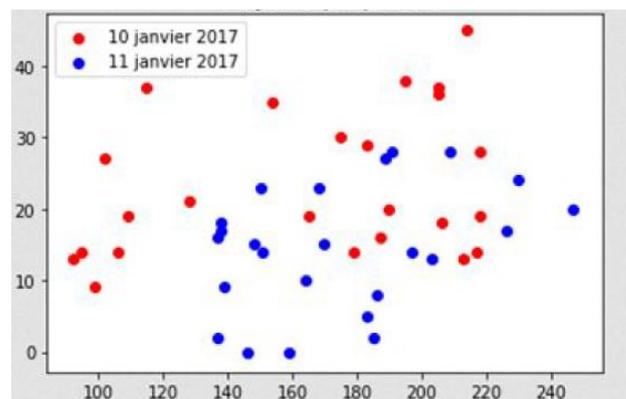


FIGURE 5.12 – Répartition du temps d'attente primaire restant en fonction du temps de consultation restant (moyenne par patient) Axe des abscisses en heures de consultation restantes Axes des ordonnées en heures d'attente primaire restantes

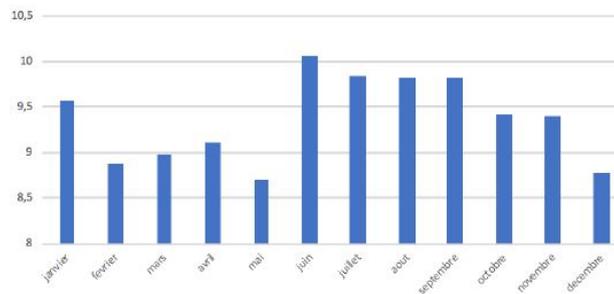


FIGURE 5.13 – Temps d'attente moyen quand l'attente dépasse 2h au SUA

et 10h comme le montre la figure 5.13. Ceci peut provoquer des conséquences néfastes sur l'état de santé des patients non traités qui vont avoir leur état de santé se dégrader progressivement au cours du temps. Pour rendre les résultats plus significatifs, nous avons réalisé un ratio du nombre de patients dont le temps d'attente dépasse 2h sur le nombre de patients total par mois. Ce pourcentage atteint les 80% pour les mois de novembre, décembre et janvier. L'attente est donc significativement prolongée lors de ces trois mois. Suite aux multiples visites du SUA et à l'avis du personnel médical, nous avons constaté que les niveaux d'état de santé des patients changent au cours du temps notamment durant le TAP. En effet, plus ce TAP est long plus l'état de santé du patient s'aggrave nécessitant ainsi une modification de l'ordonnancement des patients dans le système.

#### 5.2.4 Le nombre de patients urgents

Vu le manque dans le BDDH d'une colonne indiquant le niveau de CCMU des patients qui arrivent au SUA. Nous avons trié les patients par type de maladie afin d'avoir une idée globale sur le type d'urgence des patients présents au SUA. En effet, nous avons supposé que les patients de CCMU 4 sont tous ceux qui ont une situation pathologique engageant le pronostic vital dont la prise en charge ne comportant pas de manœuvres de réanimation immédiate. Les patients de CCMU 5 sont ceux qui ont une situation pathologique engageant le pronostic vital dont la prise en charge comporte la pratique immédiate de manœuvres de réanimation. nous calculons donc le nombre de patients qui ont le CCMU 4 et CCMU 5 en faisant le filtrage sur la colonne de *diagnostique principale* selon les conditions décrites dans le tableau 5.1.

Au final, nous obtenons que le nombre de patients de CCMU 4 est 1078 et que celui de CCMU 5 est 455. Sachant que le nombre de patient total durant notre année d'étude est 113306, le rapport pour CCMU 4 est 0.01 et celui pour CCMU 5 est 0.004. Nous constatons à partir de ces résultats que le nombre de patients qui ont vraiment besoin de soins immédiats est minime par rapport au nombre de patients moins urgents, la figure 5.14 montre bien que la courbe 1 contient le flux d'arrivée des patients de CCMU 1,2 et 3 alors que la courbe 2 contient le flux d'arrivée des patient de CCMU 4 et 5 sur l'année d'étude. En effet, la majorité des patients choisit d'aller aux urgences lors d'une situation de santé imprévue. Cela procure certainement une forte tension à l'hôpital.

CCMU 4	CCMU 5
insuffisance respiratoire chronique obstructives insuffisance respiratoire sans précision de type 1 insuffisance respiratoire sans précision de type 2 insuffisance respiratoire sans précision accident ischémique cérébral transitoire, sans précision accident ischémique transitoire de territoire artériels précérébraux accident vasculaire cérébrale, non précisé comme étant hémorragique acidose , chocs, brûlure entre 20 et 30, cardionéphropathie hypertensive, avec insuffisance cardiaque, cardionéphropathie hypertensive, avec insuffisance cardiaque et rénale, coma hypoglycémique, coma	insuffisance respiratoire aiguë insuffisance respiratoire aiguë de type 1 insuffisance respiratoire aiguë de type 2 arrêt cardiaque réanimé avec succès arrêt cardiaque, sans précision asphyxie cardiopathie ischémique aiguë fibrillation

Table 5.1 – Types de maladie graves

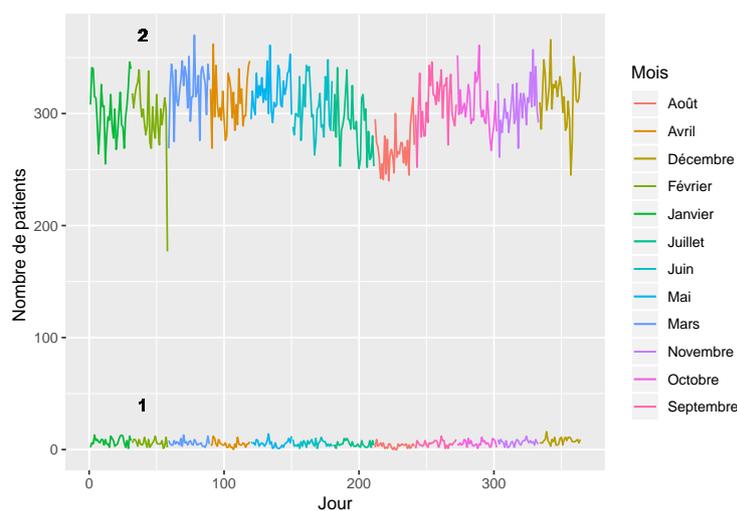


FIGURE 5.14 – Comparaison entre le flux d'arrivée des patients urgents (1) et les patients non urgents (2)

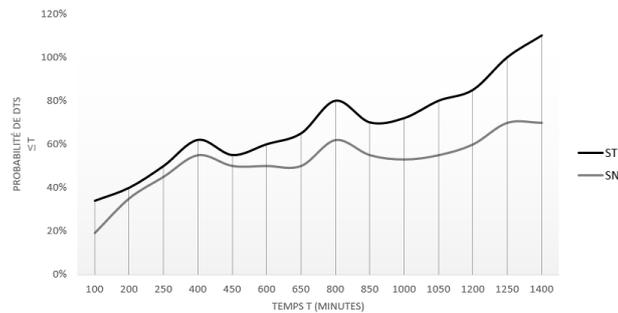


FIGURE 5.15 – Distribution cumulative de la DTS entre SN et ST

### 5.3 Comparaison des IPC en situation normale et en situation de tension

Suite à l'analyse de la BDDH, nous notons qu'il est assez difficile de collecter des données exactes et précises, notamment parce qu'il existe de nombreuses données manquantes. Nous avons choisi de comparer l'évolution de ces trois indicateurs : la DTS, le taux de la CPM et le taux de ASU en fonction de deux situations ST et SN. L'évaluation de ces indicateurs est nécessaire pour identifier tout problème au niveau du fonctionnement actuel du système.

#### 5.3.1 Comparaison de la DTS en SN et ST

La figure 5.15 montre une comparaison de la distribution cumulative de la DTS entre les situations SN et ST. Nous notons que les deux distributions sont très proches pour une durée de séjour  $\leq 450$  minutes, ce qui implique qu'en cas de SN, plusieurs patients présentant des pathologies graves nécessitent un traitement de longue durée. Lorsque la DTS est  $> 450$  minutes, ce qui explique que la plupart des patients ont une DTS excessive en raison du nombre élevé des patients arrivant au cours de cette période.

#### 5.3.2 Comparaison de la CPM en SN et ST

La CPM est le taux d'occupation du personnel médical. L'observation de la courbe CPM (figure 5.16) montre que la nature de l'évolution de la CPM dépend de l'évolution du flux patient au cours du temps. Nous notons qu'un flux d'arrivée de patients de 5% suivi de 10% supplémentaires en moins de 20 minutes a provoqué une augmentation de 10% pour la CPM. Cette augmentation dure plus de 35 minutes, ce qui implique que certains de ces patients ont des pathologies graves nécessitant un traitement de longue durée. Ensuite, lors d'une augmentation de 15% du flux de patients, la CPM n'a pas été augmentée, ce qui implique que, dans cette nouvelle vague de patients, ces derniers n'ont pas de pathologies graves, ce qui a diminué le niveau de la CPM. La même logique pour le reste de points.

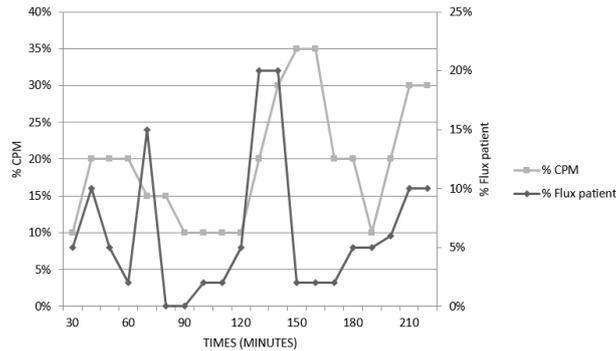


FIGURE 5.16 – L'évolution des CPM en fonction du flux de patients et du temps

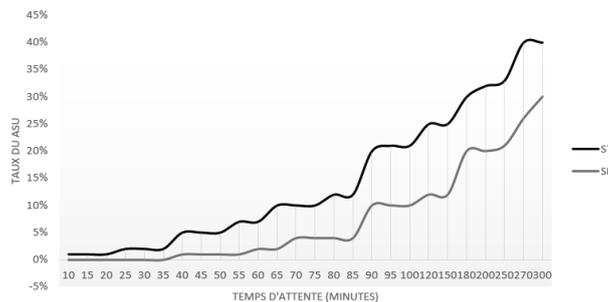


FIGURE 5.17 – Distribution cumulative d'ASU entre SN et ST

### 5.3.3 Comparaison de ASU en SN et ST

L'ASU est le pourcentage de patients qui quittent le SUA avant la première consultation médicale. La figure 5.17 montre une comparaison de la distribution cumulative du ASU entre SN et ST. Nous notons que l'ASU dans le ST commence à augmenter dès les 40 premières minutes d'attente, impliquant que pour des raisons psychologiques, le patient observe que de plus en plus de nouveaux patients arrivent au SUA. Bien que dans la SN, l'ASU commence à augmenter à partir de la 70e minute d'attente, ce qui implique que dans la SN, le temps d'attente peut augmenter excessivement en raison du nombre de patients urgents à traiter en priorité, ce qui augmente l'indicateur de la CPM.

### 5.3.4 Comparaison entre ST et SN

Pour améliorer la performance de tout système de santé, il faut d'abord savoir comment identifier et mesurer correctement les IPC. Les différentes visites effectuées auprès du SUA, les observations et les discussions avec le personnel médical et la modélisation du parcours patient prouvent que les indicateurs de performance (DTS, CPM et ASU) comparés entre les SN et ST peuvent convenir à l'étude de la tension au SUA. Grâce aux courbes de ces 3 indicateurs, nous concluons que le temps d'attente des patients au SUA peut être excessif dans les deux situations SN et ST, en raison de l'arrivée massive des patients (PNP, PUNP) dans le SUA impacte la disponibilité du personnel médical. Ensuite, nous notons que les indicateurs de performance comparés sont

fortement corrélés à l'apparition de la tension et à la satisfaction des patients. Par conséquent, ni la communauté scientifique ni les praticiens ne sont en mesure de décider des indicateurs de performance clés les plus appropriés, chaque indicateur présente à la fois des avantages et des inconvénients. Par exemple, la DTS donne une vue d'ensemble de la performance du système, mais ne permet pas de déterminer les forces et les faiblesses locales. Autre exemple, la mesure de l'ASU dépend de facteurs externes sur lesquels le SUA n'a aucun contrôle. Nous notons également que la CPM est un indicateur de performance clé crucial pour les niveaux de charge de travail critiques des médecins, mais il ne donne aucune information sur les opérations de soins restantes à effectuer sur les patients en cours d'autres étapes importantes du processus (au-delà de la première consultation). Par conséquent, nous examinons le reste de nos résultats avec la combinaison pertinente des trois IPC choisis qui sont la DTS, le TAC et la CSR définis auparavant (cf.3.16). Nous soulignerons l'interdépendance potentielle entre eux afin de cibler certaines mesures quantitatives universelles de tension dans le SUA. Enfin, nous simulons nos approches d'ordonnancement et d'orchestration dynamique afin d'améliorer ces indicateurs en cours d'exécution du workflow.

## 5.4 Synthèse sur l'analyse globale de BDDH

À partir des données et des courbes établies précédemment, nous constatons que la tension au SUA devient de plus en plus forte. Avec une moyenne de 9443 patients et 1357 types de maladies en un an le SUA du CHRU de Lille est l'une des urgences les plus surchargées après ceux de Paris et Lyon. Ceci est dû en partie au fait que les Français ne connaissent pas assez le système de santé actuel et se dirigent principalement vers le SUA lors d'une complication soudaine de santé. Cette tension prolonge le temps d'attente ainsi que la durée de séjours. Néanmoins, si certains patients ne sont pas traités dans les bons délais, leur état de santé peut s'aggraver. Dans ce contexte et suite à nos analyses de données, nous pouvons souligner trois principales causes du problème de tension dans le SUA :

- les périodes épidémiques en novembre, décembre et janvier, ainsi que les moments des pics d'afflux par jour, par exemple, il y a plus de patients au SUA entre 18h et 23h en mois de janvier.
- le patient lui-même, par exemple, le nombre de patients urgents est très faible par rapport au nombre de patients moins urgents.
- le manque d'outils d'optimisation et de gestion de flux est le problème qui nous intéresse le plus. En effet, il est nécessaire que le SUA affecte efficacement ses ressources médicales afin d'optimiser au maximum le temps d'attente. Dans ce contexte, la mise en œuvre de notre approche de résolution devient primordiale.

Actuellement le SUA du CHRU de Jeanne de Flandre n'ont pas de système d'aide à la décision ou un système d'information capable de gérer la tension. En effet, le personnel médical accorde la plus haute priorité de consultation aux patients les plus urgents, puis aux patients préalablement programmés. Les patients non programmés doivent attendre dans la salle d'attente et parfois dans

les couloirs sans obtenir un premier temps de consultation prévue, ce qui augmente leur niveau de stress. Par conséquent, ce fonctionnement engendre un temps d'attente plus long pour les patients les moins urgents qui sont les plus nombreux au sein de notre SUA. Ceci peut causer certaines tensions lors d'un flux d'arrivée important de patients. Notre but ultime dans ce mémoire de thèse est de pouvoir traiter l'ensemble des patients (PP, PNP, PUNP) en même temps afin de diminuer les attentes et de régulariser les flux patients. Par ailleurs, nous avons constaté que la moyenne du transfert interne est beaucoup plus importante que le transfert externe. Ceci explique l'importance de réserver des lits en aval dans le SUA. Néanmoins, ceci n'est pas aussi simple pour des raisons politiques où le système doit fonctionner avec un objectif de zéro lit vide alors qu'il n'existe pas d'outil de gestion des lits en temps réel au CHRU de Lille.

L'analyse de la base de données réelle nous a permis d'affirmer l'existence des interférences entre les trois types de patients (PP, PNP, PUNP). Ce qui implique une mise à jour de l'ordre du passage de patients au cours de leur prise en charge. Dans l'objectif de gérer cette interférence et d'atténuer l'ensemble des pics d'activités identifiés lors de l'analyse de la BDDH, il est primordial d'adopter un outils de gestion, d'ordonnancement et d'orchestration dynamique du parcours patient au sein du SUA. Dans la suite, nous présentons les résultats de la simulation des approches d'ordonnancement et d'orchestration afin d'optimiser les trois IPC choisis (DTS, TAC et CSR).

## 5.5 Simulations et résultats des approches proposées

Dans la présente section, nous décrivons les simulations et présentons les résultats des approches d'ordonnancement et d'orchestration dynamique. Pour ce faire, nous présentons des scénarii de petite taille montrant l'intérêt de la gestion des interférences entre les trois types de patients qui arrivent au SUA. Ensuite, nous détaillons les résultats de la mise en œuvre de l'algorithme AMOR avec son modèle de chromosome en hypercube. Une étude de comparaison de ces résultats sera détaillée en conséquence. Enfin, nous testons l'architecture proposée selon deux scénarii : un scénario de petite taille et un scénario de grande taille. Ces scénarii sont issus de la BDDH réelle (2016-2017) du CHRU de Lille.

### 5.5.1 Simulations de l'interférence entre les 3 types de patients

Pour ces simulations, nous avons choisi de se focaliser sur le jour de la tension du 11 janvier 2017. Les processus d'ordonnancement et d'orchestration sont testés par des scénarii à horizon de 5 heures (de 6h00 à 11h00) du jour concerné, sachant qu'en moyenne 13 patients arrivent toutes les heures au SUA. Il est supposé que seuls 50% de ces patients sont des PNP incluant les PUNP. À  $t = 0$  on suppose que tous les membres du personnel médical sont disponibles ainsi que tous les lieux du SUA. Le tableau 5.2 résume le nombre de médecins dans chaque intervalle de temps au cours de la journée.

Dès l'arrivée de chaque patient au SUA, un agent PWIA spécifique est attribué à ce dernier, contenant son parcours patient avec l'ensemble des paramètres de ses soins. Le tableau 5.3 présente une comparaison de TAC et de la moyenne de la DTS au SUA avec ou sans les approches d'ordonnement et d'orchestration proposées. Ce tableau indique que le TAC avec le fonctionnement actuel du SUA (pendant ces 5 heures) est souvent élevé par rapport au TAC de notre approche. Ceci est dû principalement au mode de fonctionnement actuel dans le SUA. En effet, le personnel médical interrompt les soins en cours d'un patient au profit d'un patient plus grave PUNP et il ne redevient disponible qu'à la fin du traitement de ce PUNP. En utilisant nos approches, le TAC moyen diminue de 28,12% (figure 5.18) impliquant une amélioration significative de la moyenne de la DTS, qui a diminuée également de 16,86% (figure 5.19). Pour mieux comprendre la mise en œuvre de deux processus d'ordonnement et d'orchestration, nous détaillons les différentes étapes de la première ligne du tableau 5.3 en interprétant les résultats présentés dans les 3 gantt des figures ( 5.20, 5.21 et 5.22). Le tableau 5.4 montre le type de maladies des 9 patients du scénario de la première ligne. En effet, nous ne sommes intéressés que par la tâche de soins qui nécessite un médecin, sachant que chaque tâche de soins dure 5 minutes et que chaque patient de type PP, PNP et PUNP ne nécessite respectivement que 3, 4 et 6 tâches de soins. En fait, le passage du gantt 1 (figure 5.20) au gantt 2 (figure 5.21) s'effectue grâce à l'utilisation du processus d'ordonnement. Par exemple, dans le gantt 1 (figure 5.20) sur les 3 patients qui sont arrivés à 06 :10 (PUNP(P4), PNP(P5), PP(P6)), le personnel médical  $m_a$  a interrompu le traitement du PP(P3) et il s'est occupé du PUNP(P4), ce qui a entraîné une augmentation du temps d'attente du patient PP(P3) qu'il n'a plus qu'une tâche à effectuer. Grâce au modèle de chromosome qui discrétise l'axe temps en plusieurs intervalle, le personnel médical  $m_a$  a traité le PUNP(P4) pendant le premier intervalle. Dès que le PUNP(P4) n'est plus en situation d'urgence grave, le  $m_a$  a interrompu son traitement au profit de la dernière tâche du patient PP(P3). À la fin du traitement de PP(P3), le personnel médical  $m_a$  continue le traitement du PUNP(P4) qui est devenu PNP(P4). Ceci est bien illustré dans le gantt 2 (figure 5.21). Le passage du gantt 2 (figure 5.21) au gantt 3 (figure 5.22) se réalise grâce à la mise en œuvre de la phase d'orchestration dynamique à base d'agents. Ainsi, suite à une dégradation de l'état de santé du PNP(P5) à 6h30 (figure 5.21), le protocole de négociation entre les agents du système se déclenche. En effet, le PWIA spécifique de ce patient (créé dès son arrivée par le RIA) calcule et met à jour l'évolution de son état de santé, informe l'agent MA qu'il y a des perturbations. Ensuite, le MA envoie à son tour un message au SOA afin de re-orchestrer en temps réel tous les patients au profit de ce PNP(P5). Les figures 5.23 et 5.24 présentent un scénario de deux patients ayant effectué leurs examens complémentaires dans le lieu  $j$  du SUA (eg. radiologie) et ont été transférés ensuite au lieu  $i$  du SUA juste pour que le médecin fasse son dernier diagnostic après lequel il les libère.

<b>23h-8h</b>	<b>8h-18h</b>	<b>18h-23h</b>
3 médecins	5 médecins	4 médecins
6 Infirmiers , 4 aide soignants, 2 hôtesse		
36 box de consultation, UHCD, ZHTCD , Zone de transfert		

Table 5.2 – Ressources physiques et humaines du SUA

Patients	Situation IPC	Fonctionnement actuelle			notre approche								
		TAC			Moy DTS	Phase 1			Moy DTS	Les 2 Phases			Moy DTS
		PP	PNP	PUNP		PP	PNP	PUNP		PP	PNP	PUNP	
9	6h-7h	4	3	2	30.5	4	3	2	27.7	4	3	2	26.6
95 min			70 min			60 min							
8	7h-8h	3	3	2	39.3	3	3	2	31.8	3	3	2	30.6
140 min			80 min			75 min							
10	8h-9h	4	4	2	30	4	4	2	28	4	4	2	27
100 min			80 min			70 min							
14	9h-10h	4	7	3	47.1	4	7	3	36.7	4	7	3	36
270 min			225 min			220 min							
12	10h-11h	4	5	3	38.7	4	5	3	34.1	4	5	3	34.1
195 min			160 min			150 min							

Table 5.3 – Simulation de plusieurs scénario

PP(P1)	Examen médical général
PP(P2)	Carie dentaire
PP(P3)	Examen médical général
PUNP(P4)	Insuffisance respiratoire aiguë
PNP(P5)	Malaise Rhinopharyngite (rhume banal)
PP(P6)	Entorse et foulure de la cheville
PNP(P7)	Gastroentérites et colites d'origine non précisée
PNP(P8)	Douleur au niveau d'un membre
PUNP(P9)	Commotion cérébrale

Table 5.4 – Type de maladies des 9 patients du première scénario du tableau 5.3

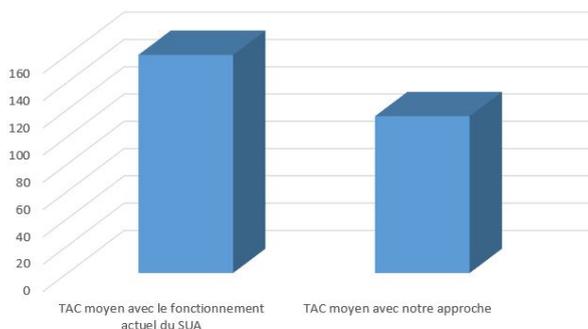


FIGURE 5.18 – Comparaison du TAC moyen avec et sans notre approche

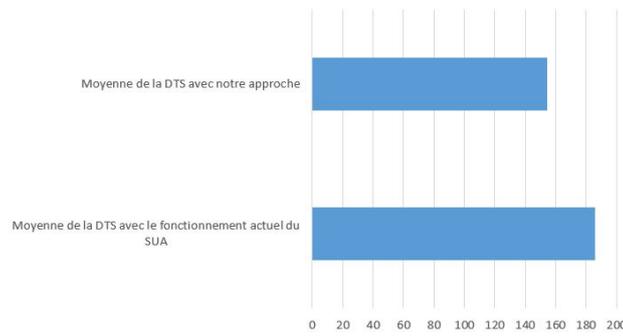


FIGURE 5.19 – Comparaison de la moyenne de la DTS avec et sans notre approches

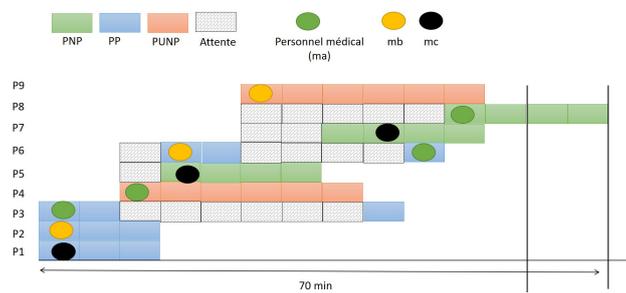


FIGURE 5.20 – Gantt sans notre approche

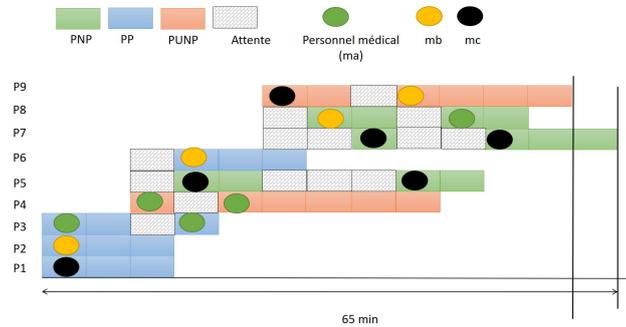


FIGURE 5.21 – Gantt avec phase 1 de notre approche

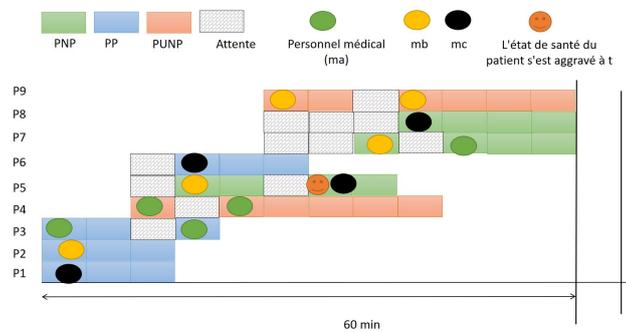


FIGURE 5.22 – Gantt avec les deux phases de notre approche

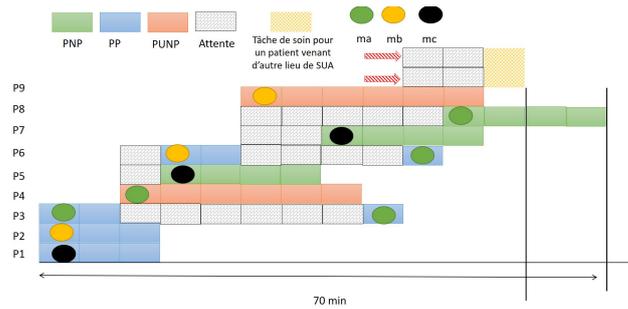


FIGURE 5.23 – Gantt sans notre approche expliquant le fonctionnement actuel au SUA lorsqu’un patient vient d’un autre lieu du SUA

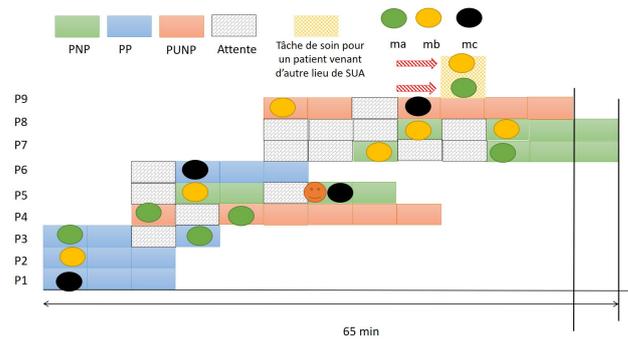


FIGURE 5.24 – Gantt avec notre approche expliquant le fonctionnement lorsqu’un patient vient d’un autre lieu du SUA

### 5.5.2 Résultats et simulations du processus d’ordonnancement

Nous avons également utilisé le processus d’ordonnancement seul pour simuler 10 instances des problèmes générés aléatoirement avec un nombre différent de patients. Ces instances ont été générées à partir de données réelles. Pour évaluer la performance de l’algorithme AMOR nous comparons les résultats obtenus par rapport à ceux obtenus en pratique (selon le BDDH) et à ceux générés par l’algorithme de liste en utilisant des règles de priorité dynamiques.

Le tableau 5.5 présente 10 instances issues de la BDDH pour tester et comparer plusieurs méthodes d’ordonnancement. Nous avons choisi de mettre les résultats de comparaison dans les colonnes du tableau relatives à l’algorithme AMOR, l’algorithme de liste et le fonctionnement pratiqué actuellement au SUA. L’écart entre les solutions lié au temps d’attente cumulé TAC moyen par patient et par instance (un jour) est présenté à la figure 5.25. Ce tableau montre que la minimisation du temps d’attente est associée à une légère augmentation de la CPM en particulier lors de l’utilisation de l’AMOR (figure 5.26). Grâce au modèle de chromosome utilisé nous pouvons contrôler l’axe personnel médical pour d’une part changer judicieusement les affectations (personnel/patient), et d’autre part ajuster les temps d’inactivités total du personnel médical au profit de la minimisation du TAC. La colonne du tableau 5.5 relative à l’algorithme de liste présente des solutions dont les sept premières instances de test sont proches de celles obtenues avec la solution du fonctionnement actuelle au SUA. Pour les instances 8, 9 et 10, la solution de l’algorithme de liste

est nettement meilleure que la solution de la pratique actuelle au SUA. Les écarts moyens constatés entre les solutions atteignent 28.02% en termes de TAC et 6.82% en termes de CPM. Par ailleurs, l'algorithme de liste utilise des règles de priorité dynamiques pour ordonnancer les patients. Ces règles dépendent des tâches de soins à faire. Néanmoins, ces tâches de soins sont différentes d'un parcours patient à un autre, le temps d'attente peut être réduit pour certains patients (pour le même scénario), tandis que la charge de travail du personnel médical reste la même.

Le tableau 5.6 présente les temps de calcul pour l'algorithme de liste et l'algorithme AMOR. Afin d'éviter l'aspect aveugle des opérateurs génétiques, nous avons conçu dans AMOR un modèle de chromosome en hypercube, des opérateurs génétiques contrôlés ainsi qu'une méthode de recherche locale. De plus, nous avons intégré les solutions trouvées par l'algorithme de liste dans la population initiale d'AMOR, afin d'accélérer la convergence vers la meilleure solution. L'algorithme AMOR a été simulé en utilisant la configuration suivante :

- la taille de la population est égal à 30 individus;
- probabilité de croisement est égal à 0.72;
- probabilité de mutation est égal à 0.035;
- nombre de génération est égal à 5000.

Les deux tableaux ( 5.6 et 5.5) montrent que AMOR fonctionne beaucoup mieux que l'algorithme de liste en termes de temps de calcul et fonctionne mieux que la pratique actuelle au SUA ainsi que l'algorithme de liste en termes de temps d'attente. Le temps de calcul d'AMOR est nettement plus court dans la majorité des cas que celui des autres méthodes. Le tableau 5.6 indique également que la différence de temps d'exécution entre AMOR et l'algorithme de liste est inférieure à une minute. Cette différence de temps est suffisante pour permettre à AMOR de générer des solutions de haute qualité minimisant le temps d'attente des patients, en explorant d'autre espace de recherche.

Comme mentionné auparavant, le processus d'ordonnancement basée sur l'algorithme AMOR peut résoudre les problèmes d'ordonnancement réels dans notre SUA, de sorte que le temps d'attente des patients soit réduit au minimum tout en tenant compte de l'état de gravité des patients. Le deuxième processus qui est l'orchestration nécessite un système d'information fiable et une coordination efficace entre le personnel médical. Ceci explique l'utilisation d'un SMA doté des protocole d'interaction et de négociation entre les agents, afin d'orchestrer et de réorchestrer les tâches de soins en minimisant les temps d'attente en cours d'exécution du workflow patient.

### 5.5.3 L'implémentation de notre architecture d'orchestration

#### 5.5.3.1 Le choix de la structure de l'agent

Le besoin de mettre en œuvre des systèmes autonomes multi-composants nécessite une infrastructure logicielle utilisée comme environnement de déploiement et d'exécution d'un ensemble

Jour	Nombre de patients		Algorithme AMOR		Algorithme de liste		Pratique actuelle		Pourcentage d'arrivées
	PP	PNP	TAC(min)	CPM (%)	TAC(min)	CPM (%)	TAC(min)	CPM (%)	PUNP (%)
1	8	48	184.77	88.22	249.46	84.46	253.09	82.4	0.56
2	17	50	191.34	78.43	222.89	75.70	225.02	74.16	0.51
3	20	44	207.45	73.70	275.83	66.95	274.38	66.95	0.49
4	28	31	268.65	97.02	369.56	89.81	369.85	87.55	0.59
5	6	58	177.75	88.55	221.65	81.37	222.11	80,34	0.53
6	12	105	261.18	97.13	312.50	92.90	314.20	91.67	0.51
7	12	70	200.34	82.50	237.10	78.28	237.97	78.28	0.65
8	14	38	201.15	93.50	273.36	92.7	278.28	92.7	0.70
9	10	29	250.56	102.52	305.08	94.76	314.41	94.76	0.59
10	18	24	168.84	91.52	204.45	84.97	215.91	83.43	0.80

Table 5.5 – Comparaison des résultats de l'AMOR proposé, de l'algorithme de liste et du fonctionnement pratiqué actuellement au SUA.

Jour	Algorithme AMOR		Algorithme de liste	
	TAC(min)	Temps de calcul (s)	TAC(min)	Temps de calcul (s)
1	184.77	9.57	249.46	10.50
2	191.34	10.81	222.89	11.74
3	207.45	80.23	275.83	67.67
4	268.65	124.21	369.56	122.87
5	177,75	14.62	221,65	15.65
6	261.18	123.80	312.50	144.40
7	200.34	83.32	237.10	79.20
8	201.15	95.37	273.36	151.10
9	250.56	72.30	305.08	91.97
10	168.84	9.88	204.45	10.71

Table 5.6 – Temps de calcul

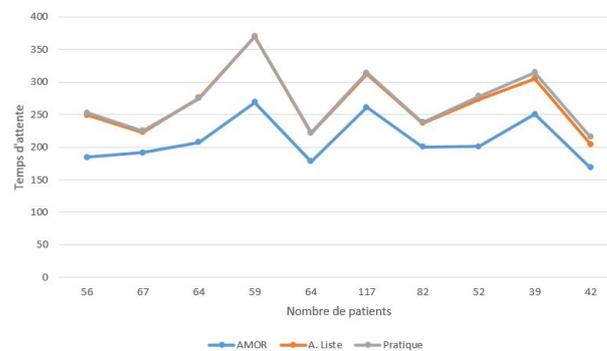


FIGURE 5.25 – Le temps d'attente en fonction du nombre de patients

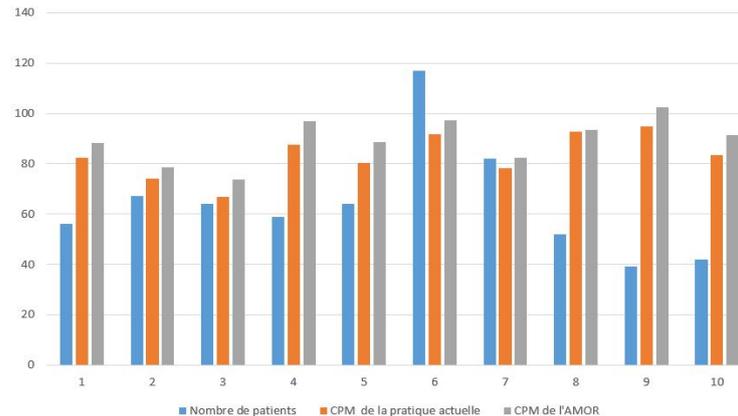


FIGURE 5.26 – La charge de travail du personnel médical en fonction des instances

d'agents. Cette infrastructure s'appelle la plate-forme de développement SMA. Cependant, la mise en œuvre de tels systèmes s'avère souvent difficile en ce qui concerne le traitement de structures de données complexes, la distribution, la communication ainsi que le niveau de contraintes matérielles imposées. De plus, l'IA (intelligence artificielle) est un domaine de recherche extrêmement riche et cette richesse induit une grande complexité et une grande multiplicité d'approches proposées, ce qui conduit à de nombreux modèles d'agents, d'environnements, d'interactions et d'organisations. Ces modèles sont souvent combinés dans le même SMA. Ainsi, le mieux est de choisir une plate-forme multi-agent adaptée aux contraintes du système à mettre en œuvre. Il existe plusieurs plates-formes multi-agents, telles que MadKit, JADE, ZEUS, AgentBuilder, Jack, etc.

Les deux plates-formes qui ne spécifient aucune méthodologie sont JADE et Jack, mais JADE l'emporte avec plusieurs autres fonctionnalités intéressantes telles que la possibilité d'intégration de services Web et l'existence d'un support efficace des *content languages* et ontologies. Par conséquent, pour le développement de notre système et la simulation de nos approches d'ordonnancement, c'est JADE (Java Agent Development Framework) qui a été choisi. JADE est un *middleware* permettant une mise en œuvre flexible des SMA communicants grâce au transfert efficace des messages ACL (langage de communication agent), conformes aux spécifications FIPA. JADE est écrit en Java, prend en charge la mobilité et il est aujourd'hui l'une des rares plates-formes multi-agents offrant la possibilité d'intégration de services Web [BELLIFEMINE et al., 2005]. D'autre part, JADE tente de faciliter le développement d'applications d'agents en optimisant les performances d'un système d'agents distribués.

### 5.5.3.2 Outils et paramètres

Pour voir les communications et les comportements des agents, JADE propose des outils graphiques (figure 5.27), qui sont eux-mêmes des agents, tels que l'agent de gestion à distance (RMA), qui représente l'interface administrative principale *Introspector*, qui contrôle le cycle de vie de l'agent, son ACL a échangé des messages et des comportements ainsi que le *sniffer* qui suit le flux

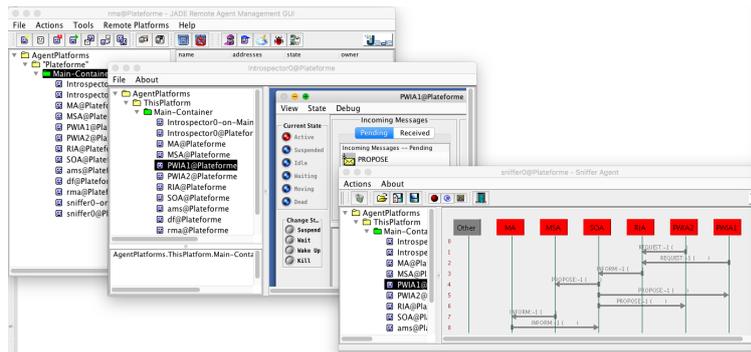


FIGURE 5.27 – La plate-forme multi-agents et les outils utilisés

de communication entre les différents agents du système.

Il existe un dernier outil important sur la plate-forme JADE qui correspond à l'agent facilitateur d'annuaire, ou *DF*. Ceci est un service de page jaune. L'annuaire facilitateur est l'agent qui gère ce service. Ainsi, tout agent fournissant un service doit s'inscrire auprès du *DF*, et tout agent recherchant un service particulier doit le consulter.

### 5.5.4 Résultats et simulations de processus d'orchestration

L'architecture proposée est testée selon des scénarii de petites tailles et de grandes tailles. Le premier test est utilisé pour évaluer des instances de petites tailles intégrant deux patients, dont le parcours est modélisé par le workflow et orchestré en tenant compte des approches détaillées dans le chapitre 4. Le second test mesure la performance d'une orchestration statique par rapport à celle dynamique en utilisant les données de la BDDH.

#### 5.5.4.1 Scénarii de petites tailles

Nous considérons dans ce test que tous les patients ayant participé à cette expérimentation suivent le même workflow avec les mêmes tâches de soins qui nécessitent toutes le même temps de traitement.

L'approche proposée basée sur une orchestration dynamique contrôlée par un agent est testée avec plusieurs scénarii afin de montrer l'intérêt de notre architecture. Ces scénarii utilisent notre BDDH. En réalité, le séquençage exact des tâches de traitement et les temps d'attente n'ont pas été stockés dans le système d'information du SUA. Ainsi, afin d'élaborer le parcours patient, présenté par le workflow de la figure 5.28 nous avons collaboré avec le personnel médical du SUA. Ce workflow est composé de plusieurs tâches, comme indiqué dans le tableau 5.7. Pour ces scénarii, le personnel médical est composé d'un seul médecin et nous avons deux patients qui nécessitent les mêmes tâches de soins. Dans les tableaux 5.9 à 5.16, les tâches en gras correspondent aux tâches en cours d'exécution.

- À  $t = 0$

Tâche	Désignation	Durée moyenne théorique (mn)
CT0	Enregistrement et triage	5
CT1	Plâtre	60
CT2	Suture	45
CT3	Attente	15
CT12	Examens complémentaires	30
CT31	Consultation en box	10
CT4	Contrôle/transfert	10

Table 5.7 – Tâches du workflow du patient

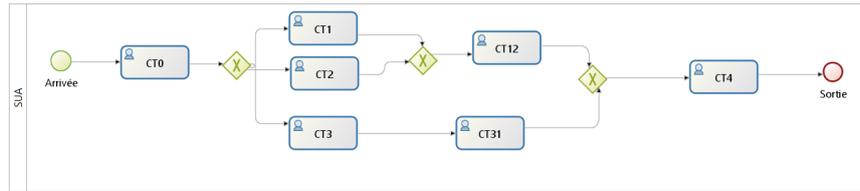


FIGURE 5.28 – Le parcours patient

— Tout le personnel médical est disponible :  $MSA^t = \{MSA_1^t\}$  ( $M_t = 1$ )

— Nous avons 2 patients qui sont arrivés ( $N_t = 2$ ). Cette arrivée déclenche la création simultanée de 2 patients :  $PWIA^0 = \{PWIA_1^0, PWIA_2^0\}$  (figure 5.29 et figure 5.30)

Les valeurs des paramètres d'environnement de  $PWIA^0$  sont représentées par le tableau 5.8. En fonction du comportement global du système (figure 4.15), le SOA active son comportement d'ordonnanceur :  $PWIA_1^0$  est affecté au  $MSA_1^0$ . La première tâche  $CT0$  pour le premier patient a duré plus de ce qui était prévu ;  $CT0$  a duré 10 minutes au lieu de 5 minutes.

- À  $t = 10$  :  $PWIA^{10} = \{PWIA_1^{10}, PWIA_2^{10}\}$  (figure 5.31 et figure 5.32). Affectation de  $PWIA_2^{10}$  au  $MSA_1^{10}$ . Les valeurs des paramètres d'environnement de  $PWIA^{10}$  sont représentées par le tableau 5.9.
- À  $t = 15$  : affectation de  $PWIA_2^{15}$  au  $MSA_1^{15}$ .  $PWIA^{15} = \{PWIA_1^{15}, PWIA_2^{15}\}$  (figure 5.33, figure 5.34). Les valeurs des paramètres d'environnement de  $PWIA^{15}$  sont représentées par le tableau 5.10.
- À  $t = 60$  : affectation de  $PWIA_1^{60}$  au  $MSA_1^{60}$ .  $PWIA^{60} = \{PWIA_1^{60}, PWIA_2^{60}\}$  (figure 5.35, figure 5.36). Les valeurs des paramètres d'environnement de  $PWIA^{60}$  sont représentées par le tableau 5.11.
- À  $t = 120$  : affectation de  $PWIA_2^{120}$  au  $MSA_1^{120}$ .  $PWIA^{120} = \{PWIA_1^{120}, PWIA_2^{120}\}$  (figure 5.37, figure 5.38). Les valeurs des paramètres d'environnement de  $PWIA^{120}$  sont représentées par le tableau 5.12.
- À  $t = 150$  : affectation de  $PWIA_1^{150}$  au  $MSA_1^{150}$ .  $PWIA^{150} = \{PWIA_1^{150}, PWIA_2^{150}\}$  (figure 5.39, figure 5.40). Les valeurs des paramètres d'environnement de  $PWIA^{150}$  sont représentées par le tableau 5.13.
- À  $t = 180$  : affectation de  $PWIA_2^{180}$  au  $MSA_1^{180}$ .  $PWIA^{180} = \{PWIA_1^{180}, PWIA_2^{180}\}$  (figure 5.41,

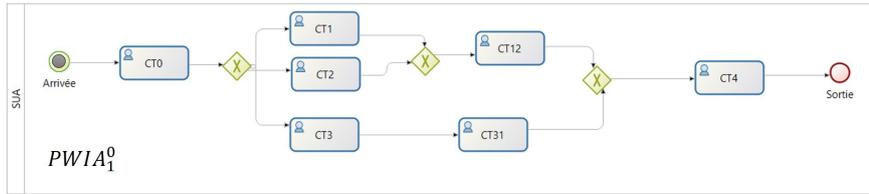


FIGURE 5.29 –  $PWIA_1^0$

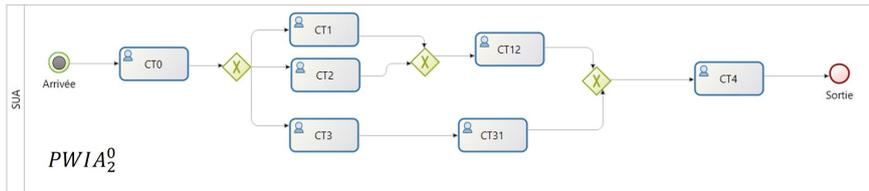


FIGURE 5.30 –  $PWIA_2^0$

figure 5.42 ). Les valeurs des paramètres d’environnement de  $PWIA^{180}$  sont représentées par le tableau 5.14.

- À  $t = 190$  : affectation de  $PWIA_1^{190}$  au  $MSA_1^{190}$ .  $PWIA^{190} = \{PWIA_1^{190}, PWIA_2^{190}\}$  (figure 5.43, figure 5.44). Les valeurs des paramètres d’environnement de  $PWIA^{190}$  sont représentées par le tableau 5.15.
- À  $t = 200$  : affectation de  $PWIA_1^{200}$  au  $MSA_1^{200}$ .  $PWIA^{200} = \emptyset$  (figure 5.45). Les valeurs des paramètres d’environnement de  $PWIA^{200}$  sont représentées par le tableau 5.16.

Cet exemple illustratif montre que notre approche est axée sur la production d’une orchestration dynamique pouvant être déployée en tant que système décisionnel fonctionnant en temps réel dans le service des urgences.

### 5.5.4.2 Scénarii de grandes tailles

Le but est de tester notre architecture dynamique à trois niveaux à l’aide des instances de tests qui sont basées sur l’analyse de données historiques issues de notre BDDH et de la contribution du personnel médical. Dans ce contexte, nous avons mené un certain nombre d’expériences, avec une taille variable de patients. Dans ces expériences, le  $PWIA(x)$  sur l’axe des abscisses correspond à l’instances du workflow patient au cours du temps, avec (x) correspondant au

	$td_n$	$SUA(Pat_n)$	$t = 0$						
			$CSR_n$	$TAC_n$	$PCT_n$	$DTS_n$	$NCT_n^t$	$s_i$	$e_i$
$PWIA_1^0$	0	105	100%	0	null	0	CT0, CT1, CT12, CT4	0	5
$PWIA_2^0$	0	90	100%	0	null	0	CT0, CT2, CT12, CT4	N/A	N/A

Table 5.8 – Les valeurs des paramètres d’environnement  $PWIA^0$  (la tâche CT0 du patient 1 est sélectionnée pour exécution)

	$td_n$	$SUA(Pat_n)$	$t = 10$						
			$CSR_n$	$TAC_n$	$PCT_n$	$DTS_n$	$NCT_n^t$	$s_i$	$e_i$
$PWIA_1^{10}$	0	110	91%	0	CT0	10	CT1, CT12, CT4	0	10
$PWIA_2^{10}$	0	90	100%	10	null	10	<b>CT0</b> , CT2, CT12, CT4	10	15

Table 5.9 – Les valeurs des paramètres d’environnement  $PWIA^{10}$  (CT0 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 1 et CT0 du patient 2 est sélectionnée pour exécution)

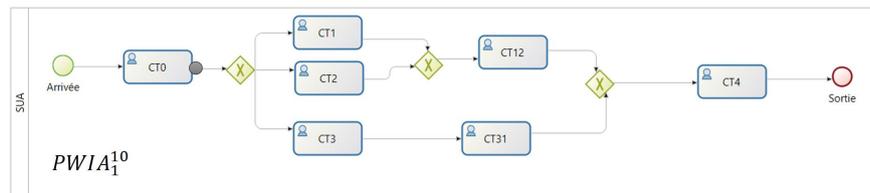


FIGURE 5.31 –  $PWIA_1^{10}$

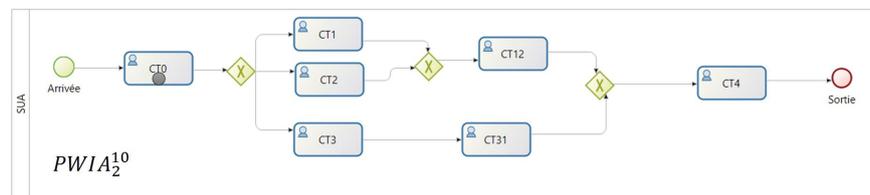


FIGURE 5.32 –  $PWIA_2^{10}$

	$td_n$	$SUA(Pat_n)$	$t = 15$						
			$CSR_n$	$TAC_n$	$PCT_n$	$DTS_n$	$NCT_n^t$	$s_i$	$e_i$
$PWIA_1^{15}$	0	110	91%	5	CT0	15	CT1, CT12, CT4	0	10
$PWIA_2^{15}$	0	90	94%	10	CT0	15	<b>CT2</b> , CT12, CT4	15	60

Table 5.10 – Les valeurs des paramètres d’environnement  $PWIA^{15}$  (CT0 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 2 et CT2 du même patient est sélectionnée pour exécution.)

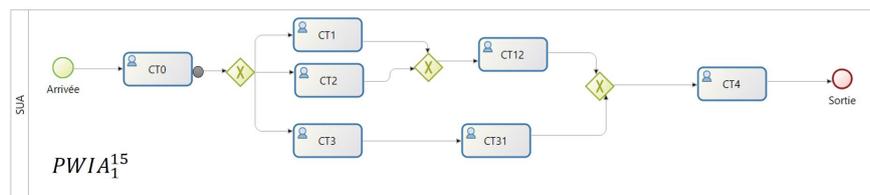


FIGURE 5.33 –  $PWIA_1^{15}$

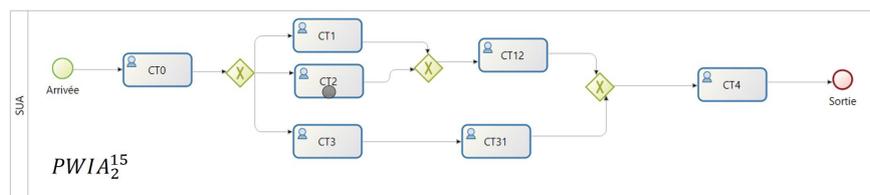


FIGURE 5.34 –  $PWIA_2^{15}$

	$td_n$	$SUA(Pat_n)$	$t = 60$						
			$CSR_n$	$TAC_n$	$PCT_n$	$DTS_n$	$NCT_n^t$	$s_i$	$e_i$
$PWIA_1^{60}$	0	110	91%	50	CT0	60	CT1, CT12, CT4	60	120
$PWIA_2^{60}$	0	90	44%	10	CT0, CT2	60	CT12, CT4	15	60

Table 5.11 – Les valeurs des paramètres d’environnement  $PWIA^{60}$  (CT2 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 2 et la CT1 du patient 1 est sélectionnée pour exécution.)

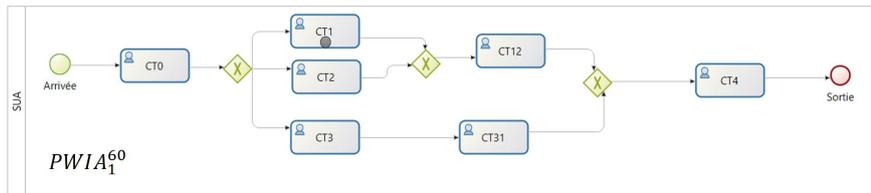


FIGURE 5.35 –  $PWIA_1^{60}$

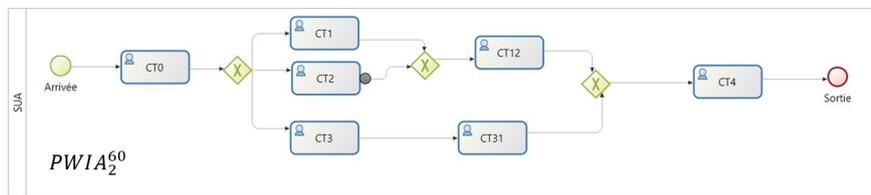


FIGURE 5.36 –  $PWIA_2^{60}$

	$td_n$	$SUA(Pat_n)$	$t = 120$						
			$CSR_n$	$TAC_n$	$PCT_n$	$DTS_n$	$NCT_n^t$	$s_i$	$e_i$
$PWIA_1^{120}$	0	110	36%	50	CT0, CT1	120	CT12, CT4	60	120
$PWIA_2^{120}$	0	90	44%	70	CT0, CT2	120	CT12, CT4	120	150

Table 5.12 – Les valeurs des paramètres d’environnement  $PWIA^{120}$  (CT1 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 1 et CT12 du patient 2 est sélectionnée pour exécution.)

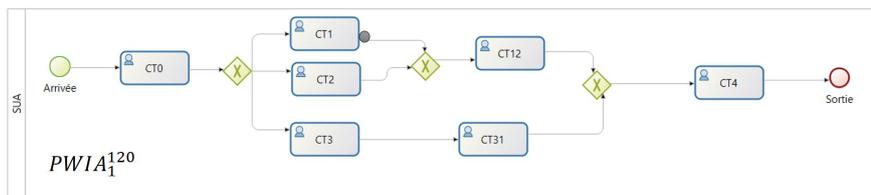


FIGURE 5.37 –  $PWIA_1^{120}$

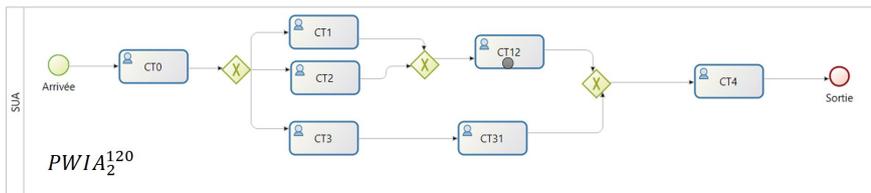


FIGURE 5.38 –  $PWIA_2^{120}$

	$td_n$	$SUA(Pat_n)$	$t = 150$						
			$CSR_n$	$TAC_n$	$PCT_n$	$DTS_n$	$NCT_n^t$	$s_i$	$e_i$
$PWIA_1^{150}$	0	110	41%	80	CT0, CT1	150	<b>CT12,</b> CT4	150	180
$PWIA_2^{150}$	0	90	11%	70	CT0, CT2, CT12	150	CT4	120	150

Table 5.13 – Les valeurs des paramètres d’environnement  $PWIA^{150}$  (CT12 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 2 et CT12 du patient 1 est sélectionnée pour exécution.)

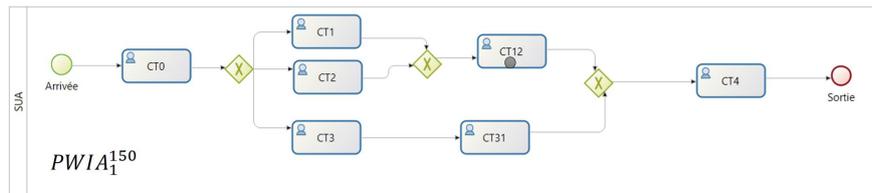


FIGURE 5.39 –  $PWIA_1^{150}$

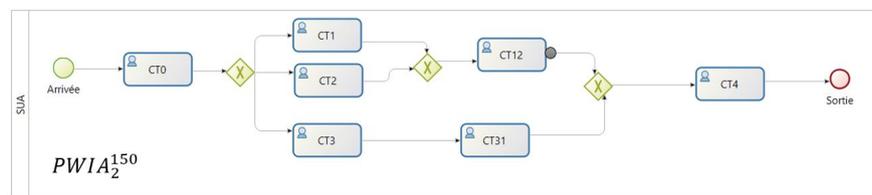


FIGURE 5.40 –  $PWIA_2^{150}$

	$td_n$	$SUA(Pat_n)$	$t = 180$						
			$CSR_n$	$TAC_n$	$PCT_n$	$DTS_n$	$NCT_n^t$	$s_i$	$e_i$
$PWIA_1^{180}$	0	110	10%	80	CT0, CT1, CT12	180	CT4	150	180
$PWIA_2^{180}$	0	90	11%	100	CT0, CT2, CT12	180	<b>CT4</b>	180	190

Table 5.14 – Les valeurs des paramètres d’environnement  $PWIA^{180}$  (CT12 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 1 et CT4 du patient 2 est sélectionnée pour exécution.)

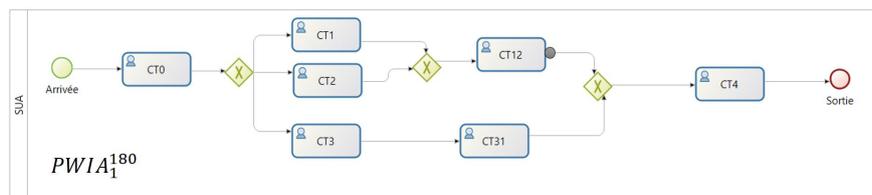


FIGURE 5.41 –  $PWIA_1^{180}$

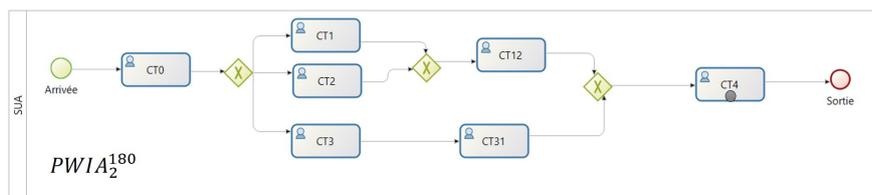


FIGURE 5.42 –  $PWIA_2^{180}$

	$td_n$	$SUA(Pat_n)$	$t = 190$						
			$CSR_n$	$TAC_n$	$PCT_n$	$DTS_n$	$NCT_n^t$	$s_i$	$e_i$
$PWIA_1^{190}$	0	110	10%	90	CT0, CT1, CT12	190	<b>CT4</b>	190	200
$PWIA_2^{190}$	0	90	0%	100	CT0, CT2, CT12, CT4	190	<b>Null</b>	180	190

Table 5.15 – Les valeurs des paramètres d’environnement  $PWIA^{190}$  (CT4 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 2 et CT4 du patient 1 est sélectionnée pour exécution.)

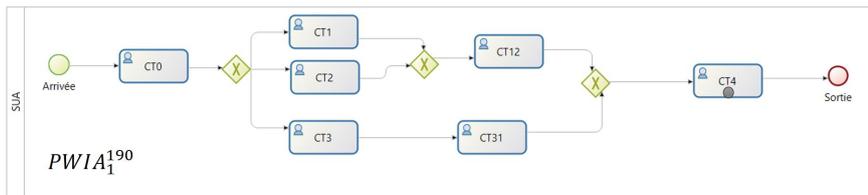


FIGURE 5.43 –  $PWIA_1^{190}$

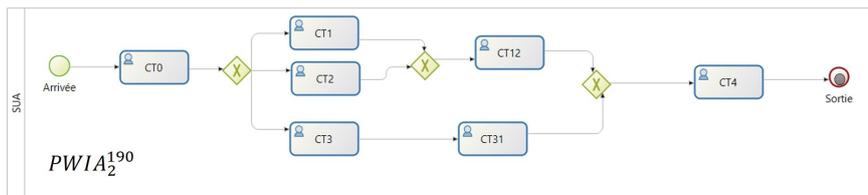


FIGURE 5.44 –  $PWIA_2^{190}$

	$td_n$	$SUA(Pat_n)$	$t = 200$						
			$CSR_n$	$TAC_n$	$PCT_n$	$DTS_n$	$NCT_n^t$	$s_i$	$e_i$
$PWIA_1^{200}$	0	110	0%	90	CT0, CT1, CT12, CT4	200	<b>Null</b>	190	200
$PWIA_2^{200}$	0	90	0%	100	CT0, CT2, CT12, CT4	190	<b>Null</b>	180	190

Table 5.16 – Les valeurs des paramètres d’environnement  $PWIA^{200}$  (La CT4 est supprimée de la liste des tâches à effectuer du patient 1 et toutes les tâches de soins des deux patients sont maintenant exécutées)

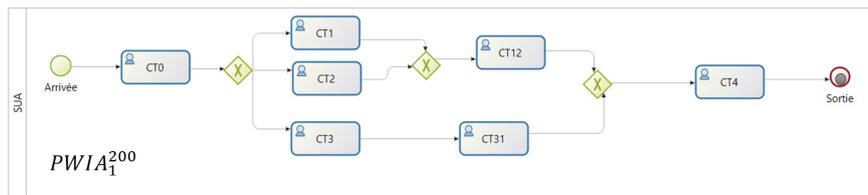


FIGURE 5.45 –  $PWIA_1^{200}$

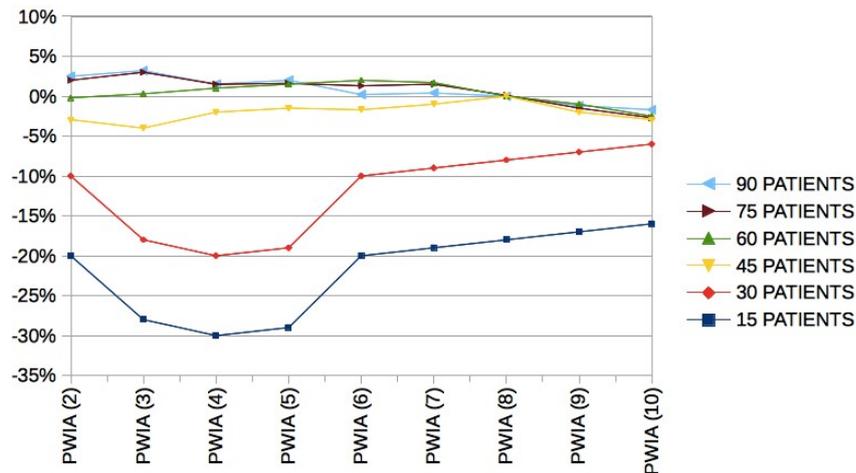


FIGURE 5.46 – Evolution du PGPM (TAC)

nombre d'instances exécutées par patient. L'axe des ordonnées correspond aux valeurs PGPM(IPC)  $IPC \in \{TAC, DTS, CSR\}$  calculées par l'Eq 4.19. Nous considérons dans cette simulation que le taux d'arrivée des patients respecte la loi de Poisson non stationnaire. Cela signifie qu'il existe un taux exponentiel différent entre les arrivées à différents intervalles de temps sur une journée (cycle de 24h). Le taux d'arrivée varie entre 15 et 20 patients par heure.

1.  $IPC = TAC$  sur la figure 5.46, nous constatons que le PGPM (TAC) varie de -4% à 3,2% en excluant les simulations de 15 et 30 patients. La valeur minimale (-30%) de PGPM(TAC) correspond à la simulation sur 15 patients. Cela est dû au fait que chaque patient dispose de quatre instances de workflow (correspondant aux tâches déjà réalisées) et que le nombre d'arrivées est équivalent au taux d'arrivée. Cela signifie que le service des urgences n'est pas en situation de tension. À partir de 8 instances de workflow et entre 45 et 90 instances des patients, la ré-orchestration dynamique a bien rempli son rôle en réduisant le temps d'attente lors de l'exécution du workflow avec  $PGPM = -4\%$ . Dans ce contexte, le PGPM diminue malgré l'évolution du nombre d'instances de workflow (de 8 à 10 instances) et du nombre de patients (de 45 à 90). Par conséquent, la ré-orchestration dynamique conduit à des actions sous-optimales.
2.  $IPC = DTS$  la figure 5.47 représente l'évolution du PGPM pour l'indicateur de la DTS. Nous constatons que, lorsque le nombre des patients simulés est 15 ou 30 (taux proche du nombre d'arrivées), le PGPM est négatif pour l'ensemble des instances de patients (de 2 à 10 instances). Ce phénomène montre l'efficacité de notre orchestration dynamique, en particulier lorsque le SUA est peu chargé. Au fur et à mesure que le nombre d'instances du workflow et le nombre des patients augmentent (de 45 à 90), les simulations d'expériences montrent que le  $PGPM(DTS) \geq 0$  de  $PWIA(6)$  à  $PWIA(10)$ . Cette tendance montre que le nombre d'instances de workflow augmente avec le nombre de patients, le service des urgences devient en état de tension et le personnel médical devient surchargé (traitement de longue durée des tâches de soins), ce qui réduit la possibilité pour l'orchestration dynamique d'optimiser l'indicateur de

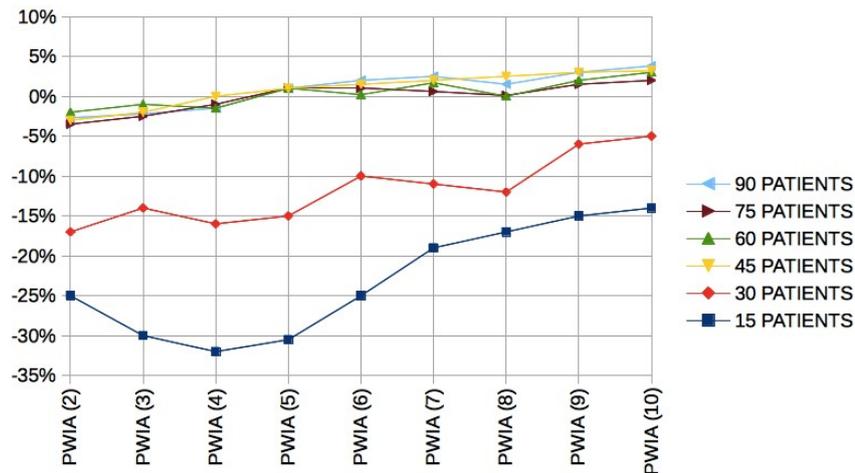


FIGURE 5.47 – Evolution du PGPM (DTS)

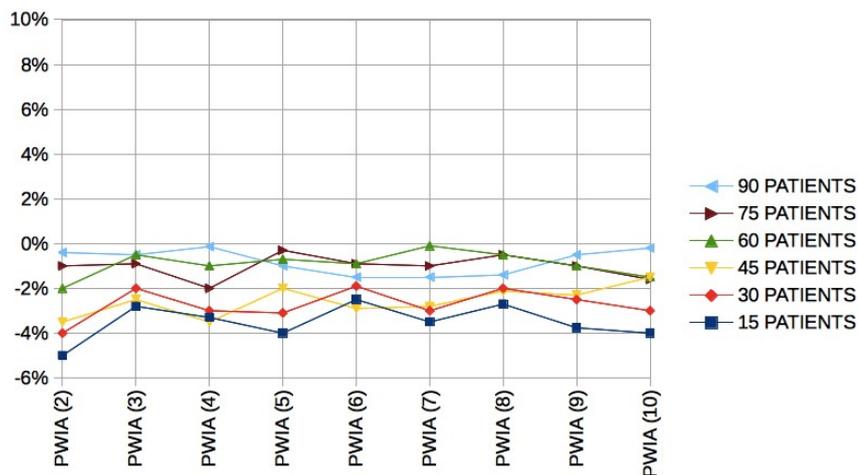


FIGURE 5.48 – Evolution du PGPM (CSR)

la DTS pendant l'exécution du workflow patient.

3.  $IPC = CSR$  sur la figure 5.48, nous remarquons que  $PGPM(CSR)$  est toujours négatif (entre  $-5$  et  $-0.1$ ), cela signifie que l'orchestration dynamique est très efficace pour réduire la charge de soins restante, ce qui confirme que tous les patients ont été vus au moins une fois par le personnel médical. D'autre part, la charge de soins restante (CSR) est un indicateur de performance très important qui doit être optimisé par une orchestration dynamique pour plusieurs raisons : 1) aucun patient n'est oublié, 2) tous les patients doivent être vus par le personnel médical au moins une fois, 3) la recherche du personnel médical adéquatement disponible pour traiter la tâche de soins en cours d'exécution du workflow, et 4) promouvoir l'équilibre de la charge de travail du personnel médical.

## 5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré l'intérêt des approches proposées en utilisant de données réelles du SUA du CHRU de Lille dans deux contextes différents : l'orchestration dynamique (OD) et l'orchestration statique (OS). Les résultats montrent que l'OD est plus résistant aux événements dynamiques tels que : les changements des tâches de soins, les charges de travail du personnel médical, l'évolution de l'état de santé du patient, etc. L'architecture à 3 niveaux proposée est déployée en tant qu'un système innovant d'aide à la décision fonctionnant en temps réel dans notre SUA. Les résultats démontrent l'utilité d'un tel système d'aide à la décision qui est doté d'une résolution informatisée non seulement afin d'optimiser l'utilisation des ressources humaines et matérielles mais aussi pour traiter les patients le plus rapidement possible tout en tenant compte de l'évolution de leur état de santé. Cette optimisation collaborative génère alors de bonnes actions à adopter en temps réel grâce au protocole d'interaction entre les agents qui ont un objectif commun qui est *lutter contre la tension* au SUA.



# Conclusion générale

Le service des urgences est un important service de soins de santé qui représente le goulot d'étranglement de l'hôpital. Les urgences hospitalières sont souvent confrontées à des problèmes de tension dans de nombreux pays à travers le monde. L'une des causes de la tension dans les urgences est l'interférence permanente entre trois types de patients : les patients déjà programmés, les patients non programmés et les patients non programmés urgents. Cette interférence augmentée par des effets stochastiques des durées de consultation et des flux aléatoires d'arrivées des patients, rend la gestion des urgences plus complexe, ce qui empêche toute planification préalable. Les situations de tension aux urgences ne sont pas faciles à contrôler et posent problème aux patients et au personnel médical, ce qui implique la détérioration de plusieurs indicateurs de performance tels que les temps d'attente, la qualité des soins, la durée du traitement, la durée de séjours, etc. Nous avons donc proposé dans ce mémoire une architecture informatique à base d'agents qui intègre deux principaux processus : un processus d'ordonnancement et un processus d'orchestration dynamique. Une méthode efficace d'ordonnancement à horizon glissant a été développée en utilisant un algorithme mémétique avec l'intégration des opérateurs génétiques contrôlés. Un hypercube à 4 axes modélise un chromosome pour tenir compte des 4 dimensions importantes des urgences : le patient, le personnel médical, le temps et l'espace. Nous avons proposé des bonnes solutions d'ordonnements minimisant les temps d'attente et la charge du personnel médical dans chaque horizon. Dans le deuxième processus, nous avons tenu compte de la nature dynamique et incertaine de l'environnement des urgences (l'arrivée de patients non programmés, dégradation de l'état de gravité d'un patient, etc) en actualisant quand c'est nécessaire le calendrier (proposé par le premier processus) par l'application d'une méthode d'orchestration dynamique à base d'agents communicants. Cette orchestration qui pilote en temps réel le workflow du parcours patient, améliore pas à pas les indicateurs de performance durant l'exécution. Ceci est réalisé grâce à un système multi-agents qui assure la coordination entre le personnel médical pour fournir les meilleurs soins aux patients. Grâce aux comportements des agents et aux protocoles de communication, le système proposé a établi un lien direct en temps réel entre les performances requises sur le terrain et les actions afin de diminuer l'impact de la tension. L'évaluation en temps réel des IPC devient un besoin important pour tous les services des urgences. En effet, nous avons proposé une approche qui orchestre et (ré)orchestre dynamiquement les instances du workflow patient, contrôlées par un agent (PWIA) dont l'état évolue dans le temps. Dans ce cadre, nous avons développé un algorithme d'ordonnancement et de (re)-orchestration inclus dans le comportement

de l'agent SOA afin d'optimiser les trois indicateurs de performance (TAC, DTS, CSR) lors de l'exécution de la PWIA. Notre approche a été testée en utilisant des données réelles de SUA de CHRU Lille dans deux contextes : Orchestration dynamique (DO) et orchestration statique (SO). Les résultats montrent que l'OD est plus robuste face aux événements dynamiques tels que : changements dans les tâches de soins de traitement, charges de travail du personnel, urgences vitales, etc. L'architecture à trois niveaux proposée est déployée sous la forme d'un système novateur d'aide à la décision fonctionnant en temps réel au SUA. Les résultats expérimentaux indiquent que l'application du couple ordonnancement et orchestration permet d'améliorer les indicateurs de performance grâce au pilotage du workflow de chaque patient par les agents pendant son exécution.

Cette thèse présente de nombreuses perspectives scientifiques et techniques :

- Intégrer dans l'architecture proposée des algorithmes d'IA pour améliorer d'avantage le parcours patient du début jusqu'à la fin en tenant compte de toute la chaîne logistique inter-intra urgences.
- Développer une bibliothèque d'algorithmes d'optimisation afin que le SOA choisisse (selon un raisonnement rationnel) l'algorithme adéquat en fonction de la complexité du terrain : nombre de ressources, nombre de patients, etc.
- Intégrer des algorithmes d'apprentissage afin que les agents s'auto-organisent et s'auto-adaptent face à des situations de tensions.
- Proposer des protocoles d'évitement des tensions à intégrer dans les comportements des agents.
- Améliorer l'architecture informatique proposée pour tenir compte de la logistique inter-urgences et inter-hôpital qui se trouvent dans la même région.

# Bibliographie

- AALST, W. M. P. van der, B. F. van DONGEN, J. HERBST, L. MARUSTER, G. SCHIMM et A. J. M. M. WEIJTERS (2003). « Workflow mining : A survey of issues and approaches ». In : *Data & Knowledge Engineering*, p. 237–267 (cf. p. 55).
- ABO-HAMAD, W. et A. ARISHA (2013a). « Simulation-based framework to improve patient experience in an emergency department ». In : *European Journal of Operational Research* (cf. p. 41).
- ABO-HAMAD, W. et A. ARISHA (2013b). « Simulation-based framework to improve patient experience in an emergency department ». In : *European Journal of Operational Research* 224.1, p. 154–166 (cf. p. 13, 14, 48, 49).
- ADMIN, S. (2016). *Système de santé, médico-social et social*. fr (cf. p. 7).
- AFOUTNI, Z. (2015). « Un modèle multi-agents pour la représentation de l'action située basé sur l'affordance et la stigmergie ». Thèse de doct. Université de la Réunion (cf. p. 27).
- AGGLETON, P., J. P. MOATTI, A. PRIEUR, T. SANDFORT et Y. SOUTEYRAND (2002). « AIDS in Europe : New Challenges for the Social Sciences ». In : *Routledge* (cf. p. 26).
- AHMED, M. A. et T. M. ALKHAMIS (2009). « Simulation optimization for an emergency department healthcare unit in Kuwait ». In : *European journal of operational research* 198.3, p. 936–942 (cf. p. 43).
- AJMI, F., S. B. OTHMAN, Z. B. HAYFA et H. SLIM (2018). « Scheduling Approach to Control the Execution of the Patient Pathway Workflow in the Emergency Department ». In : *The 3th International FLINS Conference on Data Science and Knowledge Engineering for Sensing Decision Support (FLINS 2018)* (cf. p. 40, 49).
- AJMI, faten, S. BEN-OTHTMAN, H. ZGAYA-BIAU et S. HAMMADI (2018). « Patient pathway workflow model identifying overcrowding indicators in emergency department ». In : *8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications* (cf. p. 37, 66).
- AJMI, f., s. B. OTHMAN, h. ZGAYA, s. HAMMADI et J.-M. RENARD (2017). « An Innovative Approach to Jointly Scheduling and Assigning a Consultation Time to Patients Arriving in the Emergency Department ». In : *16th World Congress of Medical and Health Informatics (MedInfo2017)*, (cf. p. 86).
- AJMI, F., H. ZGAYA, S. B. OTHMAN et S. HAMMADI (2019). « Agent-Based dynamic optimization for managing the workflow of the patient's pathway ». In : *Simulation Modelling Practice and Theory*, p. 101935 (cf. p. 95).
- ALEXANDROU, D. A., I. E. SKITSAS et G. N. MENTZAS (2011). « A holistic environment for the design and execution of self-adaptive clinical pathways ». In : *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, p. 108–118 (cf. p. 51).
- ALLON, G., S. DEO et W. LIN (2013). « The impact of size and occupancy of hospital on the extent of ambulance diversion : Theory and evidence ». In : *Operations research*, p. 544–562 (cf. p. 47).
- AMIR, E. et W. GUY (2016). « An alternative scheduling approach for improving emergency department performance ». In : *International Journal of Production Economics*, p. 65–71 (cf. p. 43).

- ANAND A., W. S. (2013). « Business value of RFID-enabled healthcare transformation projects ». In : *Business Process Management Journal* (cf. p. 20).
- ANN EMERG, M. (2006). « Crowding ». English. In : *Annals of Emergency Medicine* 47.6, p. 585 (cf. p. 15).
- APTTEL O., P. M. et P. H. (2009). « Improving Activities of Logistics Departments in Hospitals : A Comparison of French and U.S. Hospitals ». In : *Journal of Applied Management Accounting Research* (cf. p. 20).
- ARONSSON H., A. M. et S. K. (2011). « Developing lean and agile health care supply chains ». In : *Supply Chain Management : An International Journal* (cf. p. 19, 20).
- AUGUSTO, V. (2008). « Modélisation, analyse et pilotage de flux en milieu hospitalier à l'aide d'UML et des réseaux de Petri ». Thèse de doct. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (cf. p. 24).
- AZADEH, A., M. HOSSEINABADI FARAHANI, S. TORABZADEH et M. BAGHERSAD (2014). « Scheduling prioritized patients in emergency department laboratories ». In : *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, p. 61–70 (cf. p. 44).
- BAIR, A. E., W. T. SONG, Y.-C. CHEN et B. A. MORRIS (2010). « The Impact of Inpatient Boarding on ED Efficiency : A Discrete-Event Simulation Study ». In : *Journal of Medical Systems*, p. 919–929 (cf. p. 14, 36, 49).
- BARICHARD, V. et J.-K. HAO (2002). « Un algorithme hybride pour le problème de sac à dos multi-objectifs ». In : *Huitiemes Journées Nationales sur la Résolution Pratique de Problemes NP-Complets JNPC'2002 Proceedings* (cf. p. 30).
- BARISH, R. A., P. L. MCGAULY et T. C. ARNOLD (2012). « Emergency Room Crowding : A Marker of Hospital Health ». In : *Transactions of the American Clinical and Climatological Association* 123, p. 304–311 (cf. p. 14).
- BARTHE-DELANOË, A.-M. (2013). « Prise en charge de l'agilité de workflows collaboratifs par une approche dirigée par les événements ». Thèse de doct. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux (cf. p. 58).
- BARTO, A. G., S. J. BRADTKE et S. P. SINGH (1995). « Learning to act using real-time dynamic programming ». In : *Artificial intelligence*, p. 81–138 (cf. p. 50).
- BASSEUR, M. (2005). « Conception d'algorithmes coopératifs pour l'optimisation multi-objectif : application aux problèmes d'ordonnancement de type flow-shop ». Thèse de doct. Lille 1 (cf. p. 31).
- BASU, A. et A. KUMAR (2002). « Research commentary : Workflow management issues in e-business ». In : *Information Systems Research*, p. 1–14 (cf. p. 54).
- BATT, R. J. et C. TERWIESCH (2015). « Waiting patiently : An empirical study of queue abandonment in an emergency department ». In : *Management Science*, p. 39–59 (cf. p. 44, 47).
- BELIËN, J. (2007). « Exact and heuristic methodologies for scheduling in hospitals : problems, formulations and algorithms ». In : p. 157–160 (cf. p. 37).
- BELLIFEMINE, F., G. CAIRE, G. VITAGLIONE, G. RIMASSA et D. GREENWOOD (2005). « The JADE platform and experiences with mobile MAS applications ». In : *Software Agent-Based Applications, Platforms and Development Kits*. Springer, p. 1–20 (cf. p. 127).
- BEN OTHMAN, S. (2015). « Système collaboratif d'aide à l'ordonnancement et à l'orchestration des tâches de soins à compétences multiples ». thesis. Clermont-Ferrand 2 (cf. p. 7, 10, 75).
- BEN OTHMAN, S., Z. HAYFA, H. SLIM, Q. ALAIN, A. MARTINOT et J.-M. RENARD (2016). « Agents endowed with uncertainty management behaviors to solve a multiskill healthcare task scheduling ». In : *Journal of biomedical informatics*, p. 25–43 (cf. p. 58).
- BERNSTEIN, S. L., D. ARONSKY, R. DUSEJA, S. EPSTEIN, D. HANDEL, U. HWANG, M. MCCARTHY, K. JOHN MCCONNELL, J. M. PINES, N. RATHLEV, R. SCHAFFERMEYER, F. ZWEMER, M. SCHULL, B. R. ASPLIN et

- SOCIETY FOR ACADEMIC EMERGENCY MEDICINE, EMERGENCY DEPARTMENT CROWDING TASK FORCE (2009). « The effect of emergency department crowding on clinically oriented outcomes ». eng. In : *Academic Emergency Medicine : Official Journal of the Society for Academic Emergency Medicine* 16.1 (cf. p. 14, 36).
- BLASAK, R. E., D. W. STARKS, W. S. ARMEL et M. C. HAYDUK (2003). « Healthcare process analysis : the use of simulation to evaluate hospital operations between the emergency department and a medical telemetry unit ». In : *Proceedings of the 35th conference on Winter simulation : driving innovation*. Winter Simulation Conference, p. 1887–1893 (cf. p. 49).
- BOUKUS, E., A. CASSIL et A. S. O'MALLEY (2009). « A snapshot of U.S. physicians : key findings from the 2008 Health Tracking Physician Survey ». eng. In : *Data Bulletin (Center for Studying Health System Change)* 35, p. 1–11 (cf. p. 11).
- BOULET, F. (2000). « Modernisation du système de distribution : une expérience complexe mais positive (première partie) ». fr. In : *Pharmactuel* 33.4 (cf. p. 7).
- BOUSQUET, F., C. LE PAGE et J.-P. MÜLLER (2002). « Modélisation et simulation multi-agent ». In : *deuxiemes assises du GDRI3* (cf. p. 26).
- BOVE, T., A. PAREKH, P. DATILLO, J. BOVE, J. BOVE et R. BIRKHAHN (2017). « 46 The Impact of a Concierge Model on Door-to-Doctor Time and Patient Flow in an Urban Academic Emergency Department ». In : *Annals of Emergency Medicine*, S19 (cf. p. 43).
- BRICON-SOUF, N., J. M. RENARD et R. BEUSCART (1999). « Dynamic workflow model for complex activity in intensive care unit ». In : *Int. J. Med. Inf. P.* 143–150 (cf. p. 55).
- BURSTRÖM, L., M. NORDBERG, G. ÖRNING, M. CASTRÉN, T. WIKLUND, M.-L. ENGSTRÖM et M. ENLUND (2012). « Physician-led team triage based on lean principles may be superior for efficiency and quality? A comparison of three emergency departments with different triage models ». In : *Scandinavian journal of trauma, resuscitation and emergency medicine*, p. 57 (cf. p. 43, 44).
- BURT, C. W., L. F. MCCAIG et R. H. VALVERDE (2006). « Analysis of ambulance transports and diversions among US emergency departments ». In : *Annals of emergency medicine*, p. 317–326 (cf. p. 47).
- CABRERA, E., T. MANEL, I. M. LUISA, E. FRANCISCO et L. EMILIO (2012). « Simulation Optimization for Healthcare Emergency Departments ». In : *Procedia Computer Science*, p. 1464–1473 (cf. p. 29, 38, 49).
- CALVARESI, D., M. MARINONI, D. A. FRANCO, H. ROGER et S. MICHAEL (2019). « Real-time multi-agent systems for telerehabilitation scenarios ». In : *Artificial Intelligence in Medicine* (cf. p. 29).
- CARMEN, R. et I. VAN NIEUWENHUYSE (2014). *Improving Patient Flow in Emergency Departments with OR Techniques : A Literature Overview*. en. SSRN Scholarly Paper ID 2529010. Rochester, NY : Social Science Research Network (cf. p. 14, 47).
- CHAABANE, S., A. GUINET, N. SMOLSKI, M. GUIRAUD, B. LUQUET, E. MARCON et J. P. VIALE (2003). « [The industrial management and the management of surgical units] ». In : *Annales francaises d'anesthésie et de réanimation*, p. 904–908 (cf. p. 43).
- CHABROL, M., P. FÉNIÈS, M. GOURGAND, N. TCHERNEV et al. (2006). « Un environnement de modélisation pour le système d'information de la Supply Chain. Application au Nouvel Hôpital Estaing. » In : *Ingénierie des Systèmes d'information*, p. 137–162 (cf. p. 17).
- CHANDOUL, W. (2015). « Conception et réalisation d'un système d'aide à la gestion des tensions dans les services d'urgences pédiatriques : vers des nouvelles approches d'évaluation, de quantification et d'anticipation ». thesis. Ecole centrale de Lille (cf. p. 15).
- CHEN, M., J. WAN, S. GONZALEZ, X. LIAO et V. C. M. LEUNG (2014). « A Survey of Recent Developments in Home M2M Networks ». In : *IEEE Communications Surveys Tutorials*, p. 98–114 (cf. p. 23, 55).

- CHENG, A. H. Y. et J. M. SUTHERLAND (2013). « An Evaluation of British Columbia's Emergency Department Pay-for-Performance Program on Emergency Department Length of Stay : A Preliminary Analysis ». In : *Annals of Emergency Medicine*, S57 (cf. p. 43).
- CHETOUANE, F., K. BARKER et A. S. VIACABA OROPEZA (2012). « Sensitivity analysis for simulation-based decision making : Application to a hospital emergency service design ». In : *Simulation Modelling Practice and Theory*, p. 99–111 (cf. p. 38, 49).
- CHINOISI, M. et A. TROMBETTA (2012). « BPMN : An introduction to the standard ». In : *Computer Standards and Interfaces* (cf. p. 55).
- CHIRCU A., S. E. et S. S.P. (2014). « Healthcare RFID In Germany : An Integrated Pharmaceutical Supply Chain Perspective ». In : *Journal of Applied Business Research* (cf. p. 20).
- CHONDE, S., C. PARRA et C.-J. CHANG (2013). « Minimizing flow-time and time-to-first-treatment in an emergency department through simulation ». In : *Proceedings of the 2013 winter simulation conference : simulation : making decisions in a complex world*. IEEE Press, p. 2374–2385 (cf. p. 43).
- COLLETTE, Y. et P. SIARRY (2011). *Optimisation multiobjectif : Algorithmes*. Editions Eyrolles (cf. p. 30).
- COLORNI, A., M. DORIGO et V. MANIEZZO (1992). « An Investigation of some Properties of an "Ant Algorithm". » In : p. 515–526 (cf. p. 36).
- COOKE, M., S. WILSON et S. PEARSON (2002). « The effect of a separate stream for minor injuries on accident and emergency department waiting times ». In : *Emergency Medicine Journal*, p. 28–30 (cf. p. 44).
- CORNUÉJOLS, A. (1996). « Analogie, principe d'économie et complexité algorithmique ». In : *Actes des 11èmes Journées Françaises de l'Apprentissage* (cf. p. 30).
- COSTIN, M. (2010). « Logistique hospitalière, un outil du management ». In : *Humanisme et Entreprise* n° 299 (cf. p. 20, 21).
- CRAWFORD, E. A., P. J. PARIKH, N. KONG et C. V. THAKAR (2014). « Analyzing discharge strategies during acute care : A discrete-event simulation study ». In : *Medical decision making*, p. 231–241 (cf. p. 47).
- CROCKER, T., O. JOHNSON et S. KING (2007). « Towards a formalization of care pathways to embody good practice in healthcare ». In : *Proceedings of eGovernment Workshop, Metropolitan University, Leeds* (cf. p. 51).
- DAKNOU, A. (2011). « Architecture distribuée à base d'agents pour optimiser la prise en charge des patients dans les services d'urgence en milieu hospitalier ». In : (cf. p. 26, 28).
- DEELMAN, E., D. GANNON, M. SHIELDS et I. TAYLOR (2009). « Workflows and e-Science : An Overview of Workflow System Features and Capabilities ». In : *Future Gener Comput Syst*, p. 528–540 (cf. p. 55).
- DEEN, M. J. (2015). « Information and Communications Technologies for Elderly Ubiquitous Healthcare in a Smart Home ». In : *Personal Ubiquitous Comput*. P. 573–599 (cf. p. 23).
- DEMEESTER, P., W. SOUFFRIAU, P. DE CAUSMAECKER et G. V. BERGHE (2010). « A hybrid tabu search algorithm for automatically assigning patients to beds ». In : *Artificial Intelligence in Medicine*, p. 61–70 (cf. p. 49).
- DO, H. et M. SHUNKO (2013). « Pareto improving coordination policies in queueing systems : Application to flow control in emergency medical services ». In : *Available at SSRN 2351965* (cf. p. 47).
- DOAN, X. V. et D. SHAW (2019). « Resource allocation when planning for simultaneous disasters ». In : *European Journal of Operational Research*, p. 687–709 (cf. p. 38).
- DODD, G. (2011). « Key performance indicator (KPI) report. South West London and St George's ». In : *Mental Health NHS Trust Quarterly* (cf. p. 41).

- DORIGO, M., V. MANIEZZO et A. COLORNI (1996). « Ant system : optimization by a colony of cooperating agents ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, p. 29–41 (cf. p. 36).
- DOTOLI, M., S. HAMMADI, K. JERIBI, C. RUSSO et H. ZGAYA (2013). « A multi-agent Decision Support System for optimization of co-modal transportation route planning services ». In : *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, p. 911–916 (cf. p. 28).
- DROGOUL, A. (2000). « Systèmes multi-agents situés ». Thèse de doct. Université Pierre et Marie Curie (cf. p. 27).
- DUGUAY, C. et F. CHETOUANE (2007). « Modeling and improving emergency department systems using discrete event simulation ». In : *Simulation* (cf. p. 38, 41).
- EDIE, L. C. (1954). « Traffic Delays at Toll Booths ». In : *Journal of the Operations Research Society of America*, p. 107–138 (cf. p. 38).
- ELALOUF, A. et G. WACHTEL (2015). « An alternative scheduling approach for improving patient-flow in emergency departments ». In : *Operations Research for Health Care*, p. 94–102 (cf. p. 44).
- ERDEM, E., X. QU et J. SHI (2012). « Rescheduling of elective patients upon the arrival of emergency patients ». In : *Decision Support Systems*, p. 551–563 (cf. p. 40, 49).
- ERDOGAN, S. A., A. GOSE et B. T. DENTON (2015). « Online appointment sequencing and scheduling ». In : *IIE Transactions*, p. 1267–1286 (cf. p. 50).
- ESDAR, M., U. HÜBNER., J.-D. LIEBE, J. HÜSERS et J. THYE (2017). « Understanding latent structures of clinical information logistics : A bottom-up approach for model building and validating the workflow composite score ». In : *International Journal of Medical Informatics* (cf. p. 23, 25, 55).
- FALCIONELLI, N., P. SERNANI, B. ALBERT, M. D. NEWAY, C. DAVIDE, S. MICHAEL, D. A. FRANCO et B. STEFANO (2018). « Indexing the Event Calculus : Towards practical human-readable Personal Health Systems ». In : *Artificial Intelligence in Medicine* (cf. p. 29).
- FDEZ-OLIVARES, J., E. ONAINDIA, C. LUIS, J. JAUME et C. JUAN (2018). « Personalized conciliation of clinical guidelines for comorbid patients through multi-agent planning ». In : *Artificial Intelligence in Medicine* (cf. p. 29).
- FENG, F., Y. PANG, L. GABRIEL et L. WENFENG (2017). « Collaborative framework of an intelligent agent system for efficient logistics transport planning ». In : *Computers & Industrial Engineering*, p. 551–567 (cf. p. 29).
- FERBER, J. (1999). *Multi-agent systems : An introduction to distributed artificial intelligence*. Addison Wesley (cf. p. 26).
- FERRANTE, N., C. CARLOS et M. PABLO (2012). *Handbook of memetic algorithms*. Springer (cf. p. 35).
- FONE, D., H. S., T. M., R. A., L. N., W. A., R. K., C. E., B. G. et P. S (2003). « Systematic review of the use and value of computer simulation modelling in population health and health care delivery ». In : *J. Public Health Med.* P. 325–335 (cf. p. 26).
- FREITAS, A., T. SILVA-COSTA, F. LOPES, I. GARCIA-LEMA, A. TEIXEIRA-PINTO, P. BRAZDIL et A. COSTA-PEREIRA (2012). « Factors influencing hospital high length of stay outliers ». In : *BMC Health Services Research*, p. 265 (cf. p. 42).
- G. CHOW, T. D. H. (1994). « Logistics in the Canadian health care industry ». In : *Canadian Logistics Journal* (cf. p. 19).
- GARCÍA-MAGARIÑO, I., C. GUTIÉRREZ et R. FUENTES-FERNÁNDEZ (2008). « Organizing multi-agent systems for crisis management ». In : (cf. p. 28).
- GAREY, M. et D. JOHNSON (1979). « Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness ». In : *W. H. Freeman & Co.* (Cf. p. 30).
- GARRETT, J. S., B. COLYN, W. HAO, Q. HUANYING et K. J. A. (2018). « The effect of vertical split-flow patient management on emergency department throughput and efficiency ». In : *The American Journal of Emergency Medicine*, p. 1581–1584 (cf. p. 39).

- GATTA, R., M. VALLATI, D. NICOLA, M. CARLOTTA, L. JACOPO, C. DAVIDE, C. CALOGERO, F. ALESSANDRA, D. ANDREA, van SOEST JOHAN, D. ANDRE et V. VINCENZO (2018). « Towards a modular decision support system for radiomics : A case study on rectal cancer ». In : *Artificial Intelligence in Medicine* (cf. p. 29).
- GEIDERMAN, J. M., C. A. MARCO, J. C. MOSKOP, J. ADAMS et A. R. DERSE (2015). « Ethics of ambulance diversion ». In : *The American journal of emergency medicine*, p. 822–827 (cf. p. 47).
- GENDREAU, M. et J. POTVIN (2010). *Handbook of Metaheuristics*. Springer Science & Business Media (cf. p. 34).
- GEORGE, G., C. JELL et B. S. TODD (2006). « Effect of population ageing on emergency department speed and efficiency : a historical perspective from a district general hospital in the UK ». In : *Emergency Medicine Journal : EMJ* 23.5, p. 379–383 (cf. p. 14).
- GHANES, K. (2016). « Operations optimization in emergency departments ». en. Thèse de doct. Université Paris-Saclay (cf. p. 7).
- GOËFFON, A. (2006). « Nouvelles heuristiques de voisinage et mémétiques pour le probleme Maximum de Parcimonie ». Thèse de doct. Université d'Angers (cf. p. 88).
- GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. 1st. Boston, MA, USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. (cf. p. 34).
- GRACHT, H. A. von der (2012). « Consensus measurement in Delphi studies : Review and implications for future quality assurance ». In : *Technological Forecasting and Social Change* (cf. p. 41).
- GÜNAL, M. et M. PIDD (2010). « Discrete event simulation for performance modelling in health care : a review of the literature ». In : *Journal of Simulation*, p. 42–51 (cf. p. 29).
- GUTTMAN, M., J. DONAGHEY, B. W. CAREY, M. GARBER, J. K. GRENIER, G. MUNSON, G. YOUNG, A. B. LUCAS, R. ACH, L. BRUHN, X. YANG, I. AMIT, A. MEISSNER, A. REGEV, J. L. RINN, D. E. ROOT et E. S. LANDER (2011). « lincRNAs act in the circuitry controlling pluripotency and differentiation ». en. In : *Nature* 477.7364, p. 295–300 (cf. p. 16).
- GUTTMANN, A., M. J. SCHULL, M. J. VERMEULEN et T. A. STUKEL (2011). « Association between waiting times and short term mortality and hospital admission after departure from emergency department : population based cohort study from Ontario, Canada ». In : *Bmj*, p. d2983 (cf. p. 43).
- GUTTMANN, A., S. A. SHIPMAN, K. LAM, D. C. GOODMAN et T. A. STUKEL (2010). « Primary care physician supply and children's health care use, access, and outcomes : findings from Canada ». eng. In : *Pediatrics* 125.6, p. 1119–1126 (cf. p. 11).
- HAGTVEDT, R., M. FERGUSON, P. GRIFFIN, G. T. JONES et P. KESKINOCAK (2009). « Cooperative strategies to reduce ambulance diversion ». In : *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, p. 1861–1874 (cf. p. 47).
- HALES, K. et M. LAVERY (1991). « Workflow management software : the business opportunity ». In : *Ovum Ltd.* (Cf. p. 54).
- HAMMADI, S. et M. KSOURI (2013). *Advanced Mobility and Transport Engineering*. John Wiley & Sons (cf. p. 28).
- HAN, Z., Z. YUAN, T. GUANGYU, C. QUANSHI et C. YAOBIN (2004). *Optimal energy management strategy for hybrid electric vehicles*. Rapp. tech. SAE Technical Paper (cf. p. 50).
- HANCOCK, W. M. et P. F. WALTER (1979). « The Use of Computer Simulation to Develop Hospital Systems ». In : *SIGSIM Simul. Dig.* P. 28–32 (cf. p. 29).
- HARRISON, J. P. et E. D. FERGUSON (2011). « The crisis in United States hospital emergency services ». eng. In : *International Journal of Health Care Quality Assurance* 24.6, p. 471–483 (cf. p. 13).

- HASSAN, T. (2006). « Logistique hospitalière : organisation de la chaîne logistique pharmaceutique aval et optimisation des flux de consommables et des matériels à usage unique ». thesis. Lyon 1 (cf. p. 17, 18, 32).
- HELFFERT, M. (2009). « Challenges of business processes management in healthcare : Experience in the Irish healthcare sector ». In : *Business Process Management Journal* (cf. p. 20).
- HOLLAND, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press (cf. p. 34, 35).
- HOOT, N. R., L. J. LEBLANC, I. JONES, L. S. R., Z. CHUAN, G. C. S. et A. DOMINIK (2008). « Forecasting emergency department crowding : a discrete event simulation ». In : *Annals of Emergency Medicine*, p. 116–125 (cf. p. 38, 40, 49).
- HOPP, W. J. et W. S. LOVEJOY (2012). *Hospital Operations : Principles of High Efficiency Health Care* (cf. p. 8, 14).
- HOSSAIN, M. S. (2017). « Cloud-Supported Cyber-Physical Localization Framework for Patients Monitoring ». In : *IEEE Systems Journal*, p. 118–127 (cf. p. 25, 55).
- HOSSEINI, S. M., S. JANNAT et A. A. KHALED (2013). « Integrating Fuzzy expert system with Discrete Event Simulation to determine configuration of resources level for an Emergency Unit ». In : (cf. p. 38, 49).
- HSIA, R. Y., A. L. KELLERMANN et Y.-C. SHEN (2011). « Factors Associated With Closures of Emergency Departments in the United States ». en. In : *JAMA* 305.19, p. 1978–1985 (cf. p. 13).
- HUANG, D., A. BASTANI, W. ANDERSON, J. CRABTREE, S. KLEIMAN et S. JONES (2018). « Communication and bed reservation : Decreasing the length of stay for emergency department trauma patients ». In : *The American journal of emergency medicine* 36.10, p. 1874–1879 (cf. p. 37, 76).
- HUANG, J., B. CARMELI et A. MANDELBAUM (2015). « Control of patient flow in emergency departments, or multiclass queues with deadlines and feedback ». In : *Operations Research*, p. 892–908 (cf. p. 48).
- HWANG, U. et J. CONCATO (2004). « Care in the emergency department : how crowded is overcrowded? » eng. In : *Academic Emergency Medicine : Official Journal of the Society for Academic Emergency Medicine* 11.10 (cf. p. 15, 37, 49).
- HWANG, U., M. L. MCCARTHY, D. ARONSKY, B. ASPLIN, P. W. CRANE, C. K. CRAVEN, S. K. EPSTEIN, C. FEE, D. A. HANDEL, J. M. PINES, N. K. RATHLEV, R. W. SCHAFERMEYER, F. L. ZWEMER et S. L. BERNSTEIN (2011). « Measures of crowding in the emergency department : a systematic review ». In : *Academic Emergency Medicine : Official Journal of the Society for Academic Emergency Medicine* 18 (cf. p. 40).
- IZADY, N. et D. WORTHINGTON (2012). « Setting staffing requirements for time dependent queueing networks : The case of accident and emergency departments ». In : *European Journal of Operational Research*, p. 531–540 (cf. p. 42).
- J., W., Z. C., U. S., L. C. F., Z. M. et W. X (2013). « Cloud-enabled wireless body area networks for pervasive healthcare ». In : *IEEE Network* (cf. p. 55).
- JACOBZONE, S. (1995). « Les apports de l'économie industrielle pour définir la stratégie économique de gestion du secteur hospitalier public ». fre. In : *Sciences Sociales et Santé* 13.1, p. 5–46 (cf. p. 6).
- JAILLET, P. et M. R. WAGNER (2010). « Online Optimization—An Introduction ». In : *Risk and Optimization in an Uncertain World*. INFORMS, p. 142–152 (cf. p. 50).
- JEMAI, Z., K. GHANES, A. DIAKOIANNIS, O. JOUINI, M. WARGON et al. (2015). *A Heuristic for definition of shifts in an emergency department*. Rapp. tech. (cf. p. 48).
- JUN, J. B., S. H. JACOBSON et J. R. SWISHER (1999). « Application of Discrete-Event Simulation in Health Care Clinics : A Survey ». In : *J. Oper. Res. Soc.* P. 109–123 (cf. p. 26).
- KADDOUCI, A., H. ZGAYA, S. HAMMADI et F. BRETAUDEAU (2009). « PAAN : Partial Agreement Negotiation Network based on Intelligent Agents in Crisis Situation ». In : *Int. J. Math. Comput. Simul.* (Cf. p. 28).

- KADDOUCI, A., H. ZGAYA, S. HAMMADI et F. BRETAUDEAU (2010). « An innovative tool based on multi-agent approach for the Crisis management ». In : *The 18th Mediterranean Conference on Control and Automation* (cf. p. 28).
- KADDOUCI, A. (2012). « Optimisation des flux logistiques : vers une gestion avancée de la situation de crise ». Thèse de doct. Ecole Centrale de Lille (cf. p. 27).
- KAMATH, M. U. (1999). « Improving correctness and failure handling in workflow management systems. » In : (cf. p. 54).
- KANNAMPALLIL T.G. Schauer G.F., C. T. et P. V.L. (2011). « Considering complexity in healthcare systems ». In : *Journal of Biomedical* (cf. p. 19).
- KAUSHAL, A., Y. ZHAO, Q. PENG, S. TREVOR, W. ERIN, Z. MICHAEL et C. ALECS (2015). « Evaluation of fast track strategies using agent-based simulation modeling to reduce waiting time in a hospital emergency department ». In : *Socio-Economic Planning Sciences*, p. 18–31 (cf. p. 38, 49).
- KELEN, G. D., J. J. SCHEULEN et P. M. HILL (2001). « Effect of an emergency department (ED) managed acute care unit on ED overcrowding and emergency medical services diversion ». In : *Academic Emergency Medicine*, p. 1095–1100 (cf. p. 48).
- KHALIFA, M. et P. KHALID (2015). « Developing Strategic Health Care Key Performance Indicators : A Case Study on a Tertiary Care Hospital ». In : *Procedia Computer Science* (cf. p. 41, 42).
- KIRKPATRICK, S., C. GELATT et M. VECCHI (1983). « Optimization by Simulated Annealing ». In : *Science*, p. 671–680 (cf. p. 35).
- KOLKER, A. (2008). « Process modeling of emergency department patient flow : effect of patient length of stay on ED diversion ». In : *Journal of Medical Systems*, p. 389–401 (cf. p. 42).
- KOMASHIE, A. et A. MOUSAVI (2005). « Modeling emergency departments using discrete event simulation techniques ». In : *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference* (cf. p. 38, 41, 49, 55).
- KUMAR A. Ozdamar L., N. Z. C. (2008). « Supply chain redesign in the healthcare industry of Singapore ». In : *Supply Chain Management : An International Journal* (cf. p. 20).
- KUO, Y., J. M. Y. LEUNG et C. A. GRAHAM (2012). « Simulation with data scarcity : Developing a simulation model of a hospital emergency department ». In : *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)* (cf. p. 14).
- LACALLE, E. et E. RABIN (2010). « Frequent users of emergency departments : the myths, the data, and the policy implications ». In : *Annals of Emergency Medicine*, p. 42–48 (cf. p. 42).
- LANDRY, S. et M. BEAULIEU (2001). « La logistique hospitalière : un remède aux maux du secteur de la santé? » In : *Gestion* Vol. 26 (cf. p. 20).
- LEE, D., H. SHIN et B. K. CHOI (2010). « Mediator approach to direct workflow simulation ». In : *Simul. Model. Pract. Theory*, p. 650–662 (cf. p. 55).
- Les dépenses de santé en 2017 - Résultats des comptes de la santé - édition 2018 - Ministère des Solidarités et de la Santé* (2018) (cf. p. 8).
- Les établissements de santé - édition 2017 - Ministère des Solidarités et de la Santé* (2018) (cf. p. 6, 10, 11, 13).
- LI, N., D. A. STANFORD, A. B. SHARIF, R. J. CARON et A. PARDHAN (2019). « Optimising key performance indicator adherence with application to emergency department congestion ». In : *European Journal of Operational Research* (cf. p. 41, 43, 44).
- LIAO, H.-C., S.-J. LIAW, P.-m. HU, K.-T. LEE, C.-M. CHEN et F.-L. WANG (2002). « Emergency department patients who leave without being seen by a doctor : the experience of a medical center in northern Taiwan ». eng. In : *Chang Gung Medical Journal* 25.6 (cf. p. 14, 36).
- LIN, D., J. PATRICK et F. LABEAU (2014). « Estimating the waiting time of multi-priority emergency patients with downstream blocking ». In : *Health care management science*, p. 88–99 (cf. p. 44).

- LIU, H., Y. LEMBARET, D. CLIN et J. BOUREY (2011). « Comparison between Collaborative Business Process tools ». In : *2011 FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH CHALLENGES IN INFORMATION SCIENCE*, p. 1–6 (cf. p. 26).
- LUSCOMBE, R. et E. KOZAN (2016). « Dynamic resource allocation to improve emergency department efficiency in real time ». In : *European Journal of Operational Research*, p. 593–603 (cf. p. 36).
- M., A., V. E. C. et B. R. A. (2006). « Modeling Emergency Care in Hospitals : A Paradox - The Patient Should not Drive the Process ». In : p. 439–445 (cf. p. 39).
- MACAL, C. et M. NORTH (2005). « Tutorial on agent-based modeling and simulation ». In : *Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005*. (Cf. p. 26).
- MADSEN, M. M., A. H. EISET, J. MACKENHAUER, A. ODBY, C. F. CHRISTIANSEN, L. KURLAND et H. KIRKEGAARD (2016). « Selection of quality indicators for hospital-based emergency care in Denmark, informed by a modified-Delphi process ». In : *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine* (cf. p. 41).
- MADSEN, M., S. KIURU, M. CASTRÈN et L. KURLAND (2015). « The level of evidence for emergency department performance indicators : systematic review ». In : *European Journal of Emergency Medicine : Official Journal of the European Society for Emergency Medicine* (cf. p. 41).
- MARCON, E., A. GUINET et C. TAHON (2008). *Gestion et Performance des Systèmes Hospitaliers*. Sous la dir. de S. HERMES (cf. p. 37).
- MAYHEW, L. et D. SMITH (2008). « Using queuing theory to analyse the government's 4-H completion time target in accident and emergency departments ». In : *Health Care Management Science*, p. 11–21 (cf. p. 42).
- MCGUIRE, F. (1994). « Using simulation to reduce length of stay in emergency departments ». In : *Proceedings of Winter Simulation Conference*, p. 861–867 (cf. p. 39).
- MELI, C. L., I. KHALIL et Z. TARI (2014). « Load-sensitive dynamic workflow re-orchestration and optimisation for faster patient healthcare ». In : *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, p. 1–14 (cf. p. 55).
- MILLER, M. J., D. M. FERRIN et M. MESSER (2004). « Fixing the emergency department : a transformational journey with EDSIM ». In : *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004. 1988–1993 vol.2* (cf. p. 42).
- MILLER, M. J., D. M. FERRIN et J. M. SZYMANSKI (2003). « Emergency departments II : simulating Six Sigma improvement ideas for a hospital emergency department ». In : *Proceedings of the 35th conference on Winter simulation : driving innovation*. Winter Simulation Conference, p. 1926–1929 (cf. p. 49).
- MIN, D. et Y. YIH (2010). « An elective surgery scheduling problem considering patient priority ». In : *Computers & Operations Research*, p. 1091–1099 (cf. p. 50).
- MORRISON, D., S. H. JACOBSON, J. J. SAUPPE et E. C. SEWELL (2016). « Branch-and-bound algorithms : A survey of recent advances in searching, branching, and pruning ». In : *Discrete Optimization*, p. 79–102 (cf. p. 32).
- MORRISON, D., E. SEWELL et S. JACOBSON (2014). « An application of the branch, bound, and remember algorithm to a new simple assembly line balancing dataset ». In : *European Journal of Operational Research*, p. 403–409 (cf. p. 32).
- MORTIMORE, A. et S. COOPER (2007). « The “4-hour target” : emergency nurses' views ». In : *Emergency Medicine Journal*, p. 402–404 (cf. p. 42).
- MOSKOP, J. C., J. M. GEIDERMAN, M. K. D., M. JOLION, D. A. R., B. KELLY, M. NORINE et I. K. V. (2018). « Another look at the persistent moral problem of emergency department crowding ». In : *Annals of Emergency Medicine* (cf. p. 37, 49).

- MOSSIALOS, E., S. THOMSON, W. H. O. R. O. f. EUROPE et E. O. o. H. S. a. POLICIES (2004). *Voluntary health insurance in the European Union*. en. Rapp. tech. EUR/04/5046933. number-of-pages : 206. Copenhagen : Copenhagen : WHO Regional Office for Europe (cf. p. 10).
- MOZ, M. et M. V. PATO (2007). « A genetic algorithm approach to a nurse rostering problem ». In : *Computers & Operations Research*, p. 667–691 (cf. p. 38).
- NAHHAS, A., A. AWALDI et T. REGGELIN (2017). « Simulation and the Emergency Department Overcrowding Problem ». In : *Procedia Engineering* 178, p. 368–376 (cf. p. 37).
- NEZAMODDINI, N. et M. T. KHASAWNEH (2016). « Modeling and optimization of resources in multi-emergency department settings with patient transfer ». In : *Operations Research for Health Care*, p. 23–34 (cf. p. 37).
- NICOLAU GOZALBO, A. et L. VIVES PIQUERES (2017). « Is there a real consensus among anesthetists and surgeons about the neuromuscular block? Methodological considerations about the ACHILLES study ». In : *Revista Espanola De Anestesiologia Y Reanimacion* (cf. p. 41).
- NIU, C., Y. ZHANG et J. GUO (2018). « Pareto optimal layout of multistatic radar ». In : *Signal Processing* 142, p. 152–156 (cf. p. 31).
- OLSHAKER, J. S. et N. K. RATHLEV (2006). « Emergency department overcrowding and ambulance diversion : the impact and potential solutions of extended boarding of admitted patients in the emergency department ». In : *The Journal of emergency medicine*, p. 351–356 (cf. p. 48).
- ONGGO, B. S. S., N. PROUDLOVE, S. D'AMBROGIO, A. CALABRESE, S. BISOGNO et N. LEVIALDI GHIRON (2018). « A BPMN extension to support discrete-event simulation for healthcare applications : an explicit representation of queues, attributes and data-driven decision points ». In : *Journal of the Operational Research Society*, p. 788–802 (cf. p. 58).
- ONGGO, B., N. PROUDLOVE, A. D'AMBROGIO, C. A, B. STEFANIA et L. G. N (2017). « A BPMN extension to support discrete-event simulation for healthcare applications : an explicit representation of queues, attributes and data-driven decision points ». In : *Journal of the Operational Research Society* (cf. p. 37).
- OR, Z., C. CHANTAL, L. MELANIE, V. KARSTEN, W. ULRIKA et B. GWYN (2010). « Are health problems systemic? Politics of access and choice under Beveridge and Bismarck systems ». In : *Health Economics, Policy and Law*, p. 269–293 (cf. p. 39).
- OREDSSON, S., H. JONSSON, J. ROGNES, L. LIND, K. E. GÖRANSSON, A. EHRENBORG, K. ASPLUND, M. CASTRÉN et N. FARROHKHIA (2011). « A systematic review of triage-related interventions to improve patient flow in emergency departments ». In : *Scandinavian journal of trauma, resuscitation and emergency medicine* 19.1, p. 43 (cf. p. 43).
- ORR, J. (2008). « The good, the bad, and the four hour target ». In : *British Medical Journal (BMJ)*, a195 (cf. p. 42).
- OTHMAN, B. S., F. AJMI, H. ZGAYA et S. HAMMADI (2018). « A Cubic Chromosome Representation for Patient Scheduling in the Emergency Department ». In : *RAIRO-Operations Research* (cf. p. 87).
- OTHMAN, S. B., S. HAMMADI et A. QUILLIOT (2015). « Multi-objective evolutionary for multi-skill health care tasks scheduling ». In : *IFAC-PapersOnLine* 48.3, p. 704–709 (cf. p. 31).
- OTHMAN, S. B., H. ZGAYA, D. MARIAGRAZIA et H. SLIM (2017). « An agent-based Decision Support System for resources' scheduling in Emergency Supply Chains ». In : *Control Engineering Practice*, p. 27–43 (cf. p. 29).
- PAPADIMITRIOU, C. et K. STEIGLITZ (1998). *Combinatorial Optimization : Algorithms and Complexity*. Courier Corporation (cf. p. 31).
- PARDALOS, M. et M. RESENDE (2002). *Handbook of Applied Optimization*. OUP USA (cf. p. 31).
- PATERON, D. (2013). « Une organisation des flux au sein des urgences ». fr. In : *Annales françaises de médecine d'urgence* 3.2, p. 69–70 (cf. p. 14).

- PATRICK, J., M. L. PUTERMAN et M. QUEYRANNE (2008). « Dynamic multipriority patient scheduling for a diagnostic resource ». In : *Operations Research*, p. 1507–1525 (cf. p. 37).
- PAUL, S. A., M. C. REDDY et C. J. DEFITCH (2010). « A systematic review of simulation studies investigating emergency department overcrowding ». In : *SIMULATION*, p. 559–571 (cf. p. 14, 36, 38, 49).
- PHAM, C., N. H. TRAN, S. REN, C. S. HONG, K. K. NGUYEN et M. CHERIET (2018). « A distributed approach to emergency demand response in geo-distributed mixed-use buildings ». In : *Journal of Building Engineering*, p. 506–518 (cf. p. 76).
- PHAM, D.-N. et A. KLINKERT (2008). « Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem ». In : *European Journal of Operational Research*, p. 1011–1025 (cf. p. 40, 49).
- PIERRE-MICHEL, R. (2001). « Programmation orientée multi-agents : développement et déploiement de systèmes multi-agents voyelles ». thesis. Grenoble INPG (cf. p. 28).
- PINES, J. M., R. J. BATT, J. A. HILTON et C. TERWIESCH (2011). « The financial consequences of lost demand and reducing boarding in hospital emergency departments ». In : *Annals of emergency medicine*, p. 331–340 (cf. p. 47).
- PINES, J. M., S. L. DECKER et T. HU (2012). « Exogenous predictors of national performance measures for emergency department crowding ». In : *Annals of Emergency Medicine*, p. 293–298 (cf. p. 42).
- PINES, J. M., S. IYER, M. DISBOT, J. E. HOLLANDER, F. S. SHOFRER et E. M. DATNER (2008). « The effect of emergency department crowding on patient satisfaction for admitted patients ». eng. In : *Academic Emergency Medicine : Official Journal of the Society for Academic Emergency Medicine* 15.9 (cf. p. 14).
- PINES, J. M., C. V. POLLACK, D. B. DIERCKS, A. M. CHANG, F. S. SHOFRER et J. E. HOLLANDER (2009). « The Association Between Emergency Department Crowding and Adverse Cardiovascular Outcomes in Patients with Chest Pain ». en. In : *Academic Emergency Medicine* 16.7 (cf. p. 14).
- PODGORELEC, V. et P. KOKOL (2001). « Towards more optimal medical diagnosing with evolutionary algorithms ». In : *Journal of Medical Systems*, p. 195–219 (cf. p. 49).
- POWELL, W. B., A. GEORGE, B. BOUZAIENE-AYARI et H. P. SIMAO (2005). « Approximate dynamic programming for high dimensional resource allocation problems ». In : *Proceedings. 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 2005*. IEEE, p. 2989–2994 (cf. p. 50).
- PUCHINGER, J. et G. R. RAIDL (2005). « Combining Metaheuristics and Exact Algorithms in Combinatorial Optimization : A Survey and Classification ». In : Springer Berlin Heidelberg, p. 41–53 (cf. p. 32).
- PUTERMAN, M. L. (2014). *Markov decision processes : discrete stochastic dynamic programming*. John Wiley & Sons (cf. p. 50).
- RADNOR, Z. J., M. HOLWEG et J. WARING (2012). « Lean in healthcare : the unfilled promise? » In : *Social science & medicine*, p. 364–371 (cf. p. 39).
- RALSTON P.M., G. S. et D. P.J. (2013). « Logistics salience impact on logistics capabilities and performance ». In : *The International Journal of Logistics Management* (cf. p. 20).
- RAO, A. et P. MICHAEL (2000). « BDI agents : From theory to practice ». In : *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems*, p. 312–319 (cf. p. 27).
- AL-REFAIE, A., R. H. FOUAD, M.-H. LI et M. SHURRAB (2014). « Applying simulation and DEA to improve performance of emergency department in a Jordanian hospital ». In : *Simulation Modelling Practice and Theory*, p. 59–72 (cf. p. 43).
- RIBEIRO, R., E. BAUNGRATZ, G. VACCARO, P. SCHMITZ, A. FERNANDES, V. COLPANI et M. FALAVIGNA (2016). « Factors Influencing Door-To-Doctor Time In An Emergency Department : Discrete Event Simulation Model ». In : *Value in Health*, A624 (cf. p. 44).

- RICHARDSON, L. D. et U. HWANG (2001). « America's Health Care Safety Net Intact Or Unraveling? » In : *Academic Emergency Medicine : Official Journal of the Society for Academic Emergency Medicine*, p. 1056–1063 (cf. p. 36, 37).
- RIET, C. V. et E. DEMEULEMEESTER (2015). « Trade-offs in operating room planning for electives and emergencies : A review ». In : *Operations Research for Health Care*, p. 52–69 (cf. p. 40).
- ROBINSON, D. J. (2013). « An integrative review : triage protocols and the effect on ED length of stay ». In : *Journal of Emergency Nursing* 39.4, p. 398–408 (cf. p. 43).
- ROMERO A., L. E. (2015). « Combining barcodes and RFID in a hybrid solution to improve hospital pharmacy logistics processes ». In : *International Journal of Information Technology and Management* (cf. p. 20).
- ROUDENKO, O. (2004). « Application des algorithmes évolutionnaires aux problèmes d'optimisation multi-objectif avec contraintes. » Thèse de doct. Ecole Polytechnique X (cf. p. 31).
- RUSSELL, S. et P. NORVIG (2016). « Artificial intelligence : a modern approach ». In : *Pearson Education* (cf. p. 28).
- SAGHAFIAN, S., G. AUSTIN et S. J. TRAUB (2015). « Operations research/management contributions to emergency department patient flow optimization : Review and research prospects ». In : *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, p. 101–123 (cf. p. 48).
- SAGHAFIAN, S., W. J. HOPP, M. P. VAN OYEN, J. S. DESMOND et S. L. KRONICK (2012). « Patient streaming as a mechanism for improving responsiveness in emergency departments ». In : *Operations Research*, p. 1080–1097 (cf. p. 48).
- SALMON, A., S. RACHUBA, S. BRISCOE et M. PITT (2018). « A structured literature review of simulation modelling applied to Emergency Departments : Current patterns and emerging trends ». In : *Operations Research for Health Care* (cf. p. 25, 55).
- SALWAY, R., R. VALENZUELA, J. SHOENBERGER, W. MALLON et A. VICCELLIO (2017). « Emergency department (ED) overcrowding : evidence-based answers to frequently asked questions ». In : *Revista Médica Clínica Las Condes* (cf. p. 14–17, 25, 36, 37, 49, 55).
- SAMPIERI, N. et I. BONGIOVANNI-DELAROZÈRE (2000). « ENJEUX ET PERSPECTIVES DES PRATIQUES LOGISTIQUES : POUR UNE AMELIORATION GLOBALE DE LA PERFORMANCE – LE CAS DE L'HOPITAL PUBLIC FRANÇAIS ». In : *Rencontres internationales de recherche en logistique* (cf. p. 20).
- SAMUDRA, M., C. VAN RIET, E. DEMEULEMEESTER, B. CARDOEN, N. VANSTEENKISTE et F. E. RADEMAKERS (2016). « Scheduling operating rooms : achievements, challenges and pitfalls ». In : *Journal of Scheduling*, p. 493–525 (cf. p. 40).
- SAURE, A., J. PATRICK, S. TYLDESLEY et M. L. PUTERMAN (2012). « Dynamic multi-appointment patient scheduling for radiation therapy ». In : *European Journal of Operational Research*, p. 573–584 (cf. p. 50).
- SAVAGE, P. (2017). « Economic and logistic challenges of modern oncology healthcare ». In : *Clinical Oncology*, p. 547–549 (cf. p. 17).
- SCHELTES, A., C. de ALMEIDA et H. GONÇALO (2017). « Exploring the use of automated vehicles as last mile connection of train trips through an agent-based simulation model : An application to Delft, Netherlands ». In : *International Journal of Transportation Science and Technology*, p. 28–41 (cf. p. 28).
- SCHOENHARL, T. W. (2006). « WIPER : A Multi-Agent System for Emergency Response ». In : (cf. p. 28).
- SCHRIJVER, A. (1986). *Theory of Linear and Integer Programming*. John Wiley & Sons (cf. p. 32).
- SCHULL, M. J., K. LAZIER, M. VERMEULEN, S. MAWHINNEY et L. J. MORRISON (2003). « Emergency department contributors to ambulance diversion : a quantitative analysis ». In : *Annals of emergency medicine*, p. 467–476 (cf. p. 47).

- SFMU (2013). *rfe\_triage2013.pdf* (cf. p. 44).
- SOLBERG, L. I., B. R. ASPLIN, R. M. WEINICK et D. J. MAGID (2003). « Emergency department crowding : consensus development of potential measures ». eng. In : *Annals of Emergency Medicine* 42.6 (cf. p. 14).
- SONG, H., A. L. TUCKER et K. L. MURRELL (2013). « The Impact of Pooling on Throughput Time in Discretionary Work Settings : An Empirical Investigation of Emergency Department Length of Stay ». In : *Harvard Business School working paper # 13-079* (cf. p. 43).
- SONI, P. (2014). *Evaluation of rule-based patient transfer protocols in a multi-hospital setting using discrete-event simulation*. State University of New York at Binghamton (cf. p. 38).
- SORENSEN, C. (2009). *The role of HTA in coverage and pricing decisions : A cross-country comparison*. en (cf. p. 11).
- SORUP C. M., J. P. et F. J. L. (2013). « Evaluation of emergency department performance - a systematic review on recommended performance and quality-in-care measures ». In : *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine* (cf. p. 41).
- SPANOUKAKIS, G. et Z. A. (2001). « Inconsistency management in software engineering : Survey and open research issues ». In : *Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering*, p. 329–380 (cf. p. 24).
- SPRIVULIS, P. C., J.-A. DA SILVA, I. G. JACOBS, A. R. L. FRAZER et G. A. JELINEK (2006). « The association between hospital overcrowding and mortality among patients admitted via Western Australian emergency departments ». eng. In : *The Medical Journal of Australia* 184.5 (cf. p. 14, 36).
- STACCINI, P., M. JOUBERT, J. M. QUARANTA, D. FIESCHI et M. FIESCHI (2001). « Modeling health care processes for eliciting user requirements a way to link quality paradigm and clinical information system design ». In : *International Journal of Medical Informatics*, p. 129–142 (cf. p. 24).
- STAINSBY, H., M. TABOADA et E. LUQUE (2009). « Towards an Agent-Based Simulation of Hospital Emergency Departments ». In : p. 536–539 (cf. p. 29).
- STORMER, H. (2003). « Ein flexibles und sicheres agentenbasiertes Workflow-Management-System ». Thèse de doct. Verlag nicht ermittelbar (cf. p. 54).
- STUART, K. et E. KOZAN (2012). « Reactive scheduling model for the operating theatre ». In : *Flexible Services and Manufacturing Journal*, p. 400–421 (cf. p. 40).
- SUBASH, F., F. DUNN, B. MCNICHOLL et J. MARLOW (2004). « Team triage improves emergency department efficiency ». In : *Emergency Medicine Journal*, p. 542–544 (cf. p. 44).
- SVIRSKO, A. C., B. A. NORMAN, D. RAUSCH et J. WOODRING (2019). « Using Mathematical Modeling to Improve the Emergency Department Nurse-Scheduling Process ». In : *Journal of Emergency Nursing* (cf. p. 37).
- T. RUOHONEN, P. N. et J. TEITTINEN (2006). « Simulation model for improving the operation of the emergency department of special health care ». In : *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference* (cf. p. 41).
- TAYLOR, I., D. E., G. D.B. et S. M. (2007). « Workflows for e-Science- Scientific Workflows for Grids ». In : *Springer* (cf. p. 55).
- TEAHAN, W. (2010). *Artificial Intelligence–Agent Behaviour*. BookBoon (cf. p. 27).
- TRILLING, L. (2006). « Aide à la décision pour le dimensionnement et le pilotage de ressources humaines mutualisées en milieu hospitalier ». Thèse de doct. INSA de Lyon (cf. p. 38).
- TRZECIAK, S. et E. P. RIVERS (2003). « Emergency department overcrowding in the United States : an emerging threat to patient safety and public health ». eng. In : *Emergency medicine journal : EMJ* 20.5 (cf. p. 14).
- VANBRABANT, L., K. BRAEKERS, K. RAMAEEKERS et I. VAN NIEUWENHUYSE (2019). « Simulation of emergency department operations : a comprehensive review of KPIs and operational improvements ». In : *Computers & Industrial Engineering* (cf. p. 44, 47).

- VASILAKIS, C. et L. KURAMOTO (2005). « Comparing two methods of scheduling outpatient clinic appointments using simulation experiments ». In : *Clinical and Investigative Medicine*, p. 368–370 (cf. p. 24).
- VIEIRA, G. E., J. W. HERRMANN et E. LIN (2003). « Rescheduling manufacturing systems : a framework of strategies, policies, and methods ». In : *Journal of scheduling*, p. 39–62 (cf. p. 40).
- WALLEY, P. (2003). « Designing the accident and emergency system : lessons from manufacturing ». In : *Emergency Medicine Journal : EMJ*, p. 126–130 (cf. p. 39).
- WANG, H., R. D. ROBINSON, C. D. COWDEN, G. V. A., C. C. D., G. E. K., S. C. D., J. R. D. et Z. N. R. (2015). « Use of the SONET score to evaluate Urgent Care Center overcrowding : a prospective pilot study ». In : *BMJ open* (cf. p. 37, 40).
- WAUTELET, Y., M. KOLP, S. HENG et S. POELMANS (2018). « Developing a multi-agent platform supporting patient hospital stays following a socio-technical approach : Management and governance benefits ». In : *Telematics and Informatics*, p. 854–882 (cf. p. 105).
- WEISS, S. J., A. A. ERNST, R. DERLET, R. KING, A. BAIR et T. G. NICK (2005). « Relationship between the National ED Overcrowding Scale and the number of patients who leave without being seen in an academic ED ». In : *The American journal of emergency medicine*, p. 288–294 (cf. p. 48).
- WEISS, S. J., A. A. ERNST et T. G. NICK (2006). « Comparison of the national emergency department overcrowding scale and the emergency department work index for quantifying emergency department crowding ». In : *Academic Emergency Medicine*, p. 513–518 (cf. p. 48).
- WELCH S. Augustine J., C. C. A. et R. C. (2006). « Emergency department performance measures and benchmarking summit ». In : *Academic Emergency Medicine : Official Journal of the Society for Academic Emergency Medicine* (cf. p. 41).
- WELCH, S. J., B. R. ASPLIN, S. STONE-GRIFFITH, S. J. DAVIDSON, J. AUGUSTINE et J. SCHUUR (2011). « Emergency Department Operational Metrics, Measures and Definitions : Results of the Second Performance Measures and Benchmarking Summit ». In : *Annals of Emergency Medicine* (cf. p. 41).
- WELCH, S. J., J. J. AUGUSTINE, L. DONG, L. A. SAVITZ, G. SNOW et B. C. JAMES (2012). « Volume-related differences in emergency department performance ». In : *Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety*, p. 395–402 (cf. p. 42).
- WENG, S.-J., B.-C. CHENG, S. T. KWONG, L.-M. WANG et C.-Y. CHANG (2011). « Simulation optimization for emergency department resources allocation ». In : *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. Winter Simulation Conference, p. 1231–1238 (cf. p. 48).
- WHITE, C. (2007). « Health Care Spending Growth : How Different Is The United States From The Rest Of The OECD? » In : *Health Affairs* 26.1, p. 154–161 (cf. p. 6).
- WIERNIK, H., G. KATZ, H. COULONJOU, A. SALAGNAC, F. KLETZ et J. THARIAT (2018). « Place des missions d'intérêt général (MIG) relatives à la recherche et à l'innovation dans le financement des établissements de santé en cancérologie ». In : *Bulletin du Cancer* 105.6, p. 581–595 (cf. p. 8).
- WILER, J. L., G. CHRISTOPHER, H. J. M., H. ALAN, M. ABHI, M. M. G. et F. DIANA (2010). « Optimizing emergency department front-end operations ». In : *Annals of Emergency Medicine*, 142–160.e1 (cf. p. 39).
- WILER, J. L., C. GENTLE, J. M. HALFPENNY, A. HEINS, A. MEHROTRA, M. G. MIKHAIL et D. FITE (2010). « Optimizing emergency department front-end operations ». In : *Annals of emergency medicine*, p. 142–160 (cf. p. 43).
- WIMMER, H., V. Y. YOON et V. SUGUMARAN (2016). « A multi-agent system to support evidence based medicine and clinical decision making via data sharing and data privacy ». In : *Decision Support Systems*, p. 51–66 (cf. p. 105).
- WOMACK, J. P. et D. T. JONES (1996). « Beyond Toyota : how to root out waste and pursue perfection ». In : *Harvard business review*, p. 140–158 (cf. p. 39).

- WOOLDRIDGE, M. et R. J. NICHOLAS (1995). « Intelligent agents : theory and practice ». In : *The Knowledge Engineering Review*, p. 115–152 (cf. p. 26).
- YEH, J.-Y. et W.-S. LIN (2007). « Using simulation technique and genetic algorithm to improve the quality care of a hospital emergency department ». In : *Expert Systems with Applications*, p. 1073–1083 (cf. p. 38, 49).
- ZÉPHYR, L., P. LANG, B. F. LAMOND et P. CÔTÉ (2017). « Approximate stochastic dynamic programming for hydroelectric production planning ». In : *European Journal of Operational Research*, p. 586–601 (cf. p. 50).
- ZGAYA, H. (2007). « Conception et optimisation distribuée d'un système d'information d'aide à la mobilité urbaine : Une approche multi-agent pour la recherche et la composition des services liés au transport ». Thèse de doct. Ecole Centrale de Lille (cf. p. 27).
- ZGAYA, H. et S. HAMMADI (2016). *Logistics Engineering and Health*. Elsevier (cf. p. 28).
- ZHENG, K., H. M. HAFTEL, R. B. HIRSCHL, M. O'REILLY et D. A. HANAUER (2010). « Quantifying the impact of health IT implementations on clinical workflow : a new methodological perspective ». In : *Journal of the American Medical Informatics Association*, p. 454–461 (cf. p. 54).
- ZHU, Y.-H., T. A. TOFFOLO, W. VANCROONENBURG et G. V. BERGHE (2019). « Compatibility of short and long term objectives for dynamic patient admission scheduling ». In : *Computers & Operations Research* 104, p. 98–112 (cf. p. 76).
- ZIDANI, H. (2013). « Représentation de solution en optimisation continue, multi-objectif et applications ». Thèse de doct. INSA de Rouen (cf. p. 31).
- ZINK, B. J. (2006). *Anyone, Anything, Anytime : A History of Emergency Medicine*. en. Google-Books-ID : bUImH2GeULAC. Elsevier Health Sciences (cf. p. 12).
- ZINK, B. J. M. (2005). *Anyone, Anything, Anytime : A History of Emergency Medicine*. Elsevier Health Sciences (cf. p. 37).





## MÉTHODES D'ORDONNANCEMENT ET D'ORCHESTRATION DYNAMIQUE DES TÂCHES DE SOINS POUR OPTIMISER LA PRISE EN CHARGE DES PATIENTS DANS LES URGENCES HOSPITALIÈRES

### Résumé

Le service des urgences est un important service de soins qui représente le goulot d'étranglement de l'hôpital. Les urgences sont souvent confrontées à des problèmes de tension dans de nombreux pays à travers le monde. L'une des causes de la tension dans les urgences est l'interférence permanente entre trois types de patients : les patients déjà programmés, les patients non programmés et les patients non programmés urgents. Le but de cette thèse est de contribuer à l'étude et au développement d'un système d'aide à la décision pour améliorer la prise en charge des patients aussi bien en mode de fonctionnement normal qu'en mode tension. Deux principaux processus ont été développés. Un processus d'ordonnancement à horizon glissant en utilisant un algorithme mimétique avec l'intégration des opérateurs génétiques contrôlés pour déterminer un calendrier optimal de passage des patients. Le deuxième processus d'orchestration dynamique, à base d'agents communicants, tient compte de la nature dynamique et incertaine de l'environnement des urgences en actualisant continuellement ce calendrier. Cette orchestration pilote en temps réel le workflow du parcours patient, améliore pas à pas les indicateurs de performance durant l'exécution. Grâce aux comportements des agents et aux protocoles de communication, le système proposé a établi un lien direct en temps réel entre les performances requises sur le terrain et les actions afin de diminuer l'impact de la tension. Les résultats expérimentaux, mis en œuvre au CHRU de Lille, indiquent que l'application de nos approches permet d'améliorer les indicateurs de performance grâce au pilotage par les agents du workflow en cours d'exécution.

**Mots clés :** système de soins, gestion des tensions, ordonnancement à horizon glissant, orchestration, workflow collaboratif, système multi-agent, tâche à compétences multiples, logistique hospitalière.

---

### Abstract

**TITLE :** SCHEDULING AND DYNAMIC ORCHESTRATION METHODS OF CARE TASKS TO OPTIMIZE THE MANAGEMENT OF PATIENTS IN HOSPITAL EMERGENCY DEPARTMENT

The emergency department is an important care service that represents the hospital's bottleneck. Emergencies often face overcrowding problems in many countries worldwide. One of the causes of the emergency department overcrowding is the permanent interference between three types of arriving patients: already programmed patients, non-programmed patients and urgent non-programmed patients. The aim of this thesis is to contribute to the study and development a decision support system to improve patient management in both normal and overcrowding situation. Two main processes have been developed. A rolling-horizon scheduling process using a memetic algorithm with the integration of controlled genetic operators to determine an optimal schedule for patient. The second dynamic orchestration process, based on communicating agents, takes into account the dynamic and uncertain nature of the emergency environment by continually updating this schedule for patient. This orchestration monitoring in real time the workflow of the patient pathway improves step by step the performance indicators during the execution. Through agent behaviors and communication protocols, the proposed system has established a direct real-time link between the required performances and the effective actions in order to decrease the overcrowding impact. The experimental results in this thesis, implemented at the Regional University Hospital Center (RUHC) of Lille, justify the interest of the application of our approaches to improve the performance indicators thanks to the agents driven patient pathway workflows during their execution.

**Keywords:** health care system, overcrowding management, rolling horizon scheduling, orchestration, collaborative workflow, multi-agent systems, multi-skill tasks, hospital logistics.

