

**Thèse de doctorat**  
**Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de**  
**VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS**

**Spécialité Automatique et Génie Informatique**

**Présentée et soutenue par Farid KADRI**

**Le 27 novembre 2014, à Valenciennes**

**Ecole doctorale :**

Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

**Equipe de recherche, Laboratoire :**

Laboratoire : Thermique Ecoulement Mécanique Matériaux Mise en Forme Production (TEMPO)

Equipe : Production, Services, Information (PSI)

**Contribution à la conception d'un système d'aide à la décision pour la gestion de situations de tension au sein des systèmes hospitaliers. Application à un service d'urgence.**

**JURY**

**Président du jury**

DI MASCOLO, Maria

Directrice de recherche CNRS, Université de Grenoble

**Rapporteurs**

WIESER, Philippe

Professeur, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

MARCON, Eric

Professeur, Université de Jean Monnet, Saint-Etienne

**Examineurs**

MARTINOT, Alain

Professeur, Université de Lille 2

DI MASCOLO, Maria

Directrice de recherche CNRS, Université de Grenoble

**Directeur de thèse**

TAHON, Christian

Professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis

**Co-encadrante**

CHAABANE, Sondès

Maitre de conférences, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis

**Invité**

RENARD, Jean-Marie

Maitre de conférences, Université de Lille 2



*A la mémoire de ma grand-mère,  
A ma mère et mon père,  
A mes sœurs et mes frères,  
A mes nièces et mes neveux,  
A tous mes amis.*

## RESUME

La prise en charge des flux des patients, en particulier les flux récurrents et consécutifs à des crises sanitaires (grippes, canicules, situations exceptionnelles) est l'un des problèmes les plus importants auquel les services des urgences (SU) doivent faire face. Pour gérer cet afflux de patients, les services des urgences nécessitent des ressources humaines et matérielles importantes, ainsi qu'un degré élevé de coordination entre ces ressources. Dans ces conditions, le personnel médical se voit confronté très fréquemment à des situations de tension qui compliquent très fortement sa tâche. L'objet de cette thèse est de contribuer à l'amélioration de la gestion des situations de tension se produisant dans un service d'urgence en proposant un système d'aide à la décision, SAGEST (Système d'Aide à la décision pour la GEstion des Situations de Tensions), permettant i) le pilotage proactif du SU : prévision à court et/ou moyen terme de l'apparition de situations de tension et l'évolution du flux patients et la proposition d'actions de correction afin d'éviter l'occurrence de ces situations et ii) le pilotage réactif dans le cas où l'occurrence de la situation de tension n'a pas été détectée. Une architecture fonctionnelle du système SAGEST, s'appuyant sur le processus décisionnel du responsable du service d'urgence, est proposée. Les méthodologies et les modèles utilisés dans la construction des principales fonctions et de la base de connaissances sont décrits. Enfin, les résultats d'application des différents modèles du système SAGEST pour le service d'urgence pédiatrique (SUP) du centre hospitalier régional universitaire du Lille sont présentés et discutés.

**Mots-clés :**  *système d'aide à la décision, pilotage proactif et réactif, modélisation et simulation des situations de tension, méthodes de surveillance, de prévision et de détection d'anomalies, analyse des données, évaluation de la résilience, gestion de crises.*

## ABSTRACT

The management of patient flow, especially the flow resulting from health (flu, heat waves and exceptional circumstances) is one of the most important problems to manage in the emergency department (ED). To handle the influx of patients, emergency departments require significant human and material resources, and a high degree of coordination between these resources. Under these conditions, the medical and the paramedical staffs are often confronted with strain situations which greatly complicate their task. The main purpose of this thesis is to contribute to improving the management of situations of tension occurring in the emergency department by providing a decision support system, SAGEST. This DSS allows i) a proactive control of the ED: predicting at short and/or medium-term the occurrence of potential strain situations and proposing corrective actions to prevent the occurrence of these situations, ii) a reactive control in the case of no-detection of the strain situation occurrence. A functional architecture of the SAGEST system, based on the manager's decision making process is proposed. Used methodologies and models embedded in the main functions and the knowledge base of the SAGEST system are described. Finally, experiments and results of different models of SAGEST system applied to the paediatric emergency department (PED) of the Regional University Hospital of Lille are presented and discussed.

**Keywords:**  *Decision support system, proactive and reactive control, modeling and simulation of strain situations, forecasting and monitoring methods, data analysis, resilience of emergency department, crisis management.*

# Remerciements

Je tiens à remercier au travers de cette page tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail de thèse.

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur Christian TAHON, mon directeur de thèse et Madame Sondès CHAABANE, ma co-encadrante, pour leurs disponibilités, leur aide et les encouragements qu'ils m'ont toujours prodigués ainsi que pour m'avoir fait bénéficier amplement de leur rigueur scientifique, de leurs critiques objectives et de leurs conseils avisés.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à Monsieur Philippe WIESER, Professeur à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse) et à Monsieur Eric MARCON, Professeur à l'université de Jean Monnet de Saint-Etienne, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'accepter de rapporter mes travaux de thèse et d'y avoir porté tant d'intérêt.

Mes remerciements s'adressent également à Madame Maria DI MASCOLO, Directrice de recherche CNRS à l'université de Grenoble, à Monsieur Alain MARTINOT, Professeur à l'université de Lille 2 et à Monsieur Jean-Marie RENARD, Maître de conférences à l'université de Lille 2 et coordinateur de projet ANR-HOST, pour le crédit qu'ils ont bien voulu accorder à mes travaux en participant au jury de cette thèse.

Je n'oublie pas dans mes remerciements tous ceux et celles qui ont contribué à la réussite de ces travaux, en particulier, Madame Valérie HUE, praticienne hospitalière au service des urgences pédiatriques au CHRU de Lille.

Je remercie également l'ensemble des membres de l'équipe TEMPO-PSI qui m'ont accueilli pendant cette thèse et qui m'ont permis de travailler dans une ambiance exceptionnelle. Je remercie en particulier mes collègues de laboratoire, pour l'ambiance conviviale qu'ils ont contribué à entretenir, les bons moments passés en leur compagnie ainsi que pour leur sympathie.

Enfin, je ne saurais oublier de remercier chaleureusement mes parents, mes sœurs et mes frères pour leur soutien tout au long de ce parcours.



# Table des Matières

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Résiliences des systèmes sociotechniques. Cas des services d'urgence.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Systèmes sociotechniques .....</b>	<b>3</b>
2.1. Les systèmes sociotechniques : définition, caractéristiques.....	3
2.2. Les perturbations dans les systèmes sociotechniques .....	4
2.3. Modèle d'une perturbation dans un système sociotechnique.....	5
<b>3. Résilience des systèmes sociotechniques .....</b>	<b>8</b>
3.1. Principaux domaines de la résilience .....	8
3.2. Résilience : définitions et notions associées .....	9
3.3. La résilience organisationnelle.....	11
3.4. Méthodes d'évaluation de la résilience d'un système sociotechnique .....	13
<b>4. Le service d'urgence : système sociotechnique .....</b>	<b>16</b>
4.1. Le service d'urgence : caractéristiques .....	17
4.2. Recours aux services d'urgence.....	19
4.3. Services d'urgence: les problématiques.....	20
4.4. Actions d'amélioration pour faire face aux situations de tension dans les services d'urgence.	23
<b>5. Résilience d'un service d'urgence .....</b>	<b>26</b>
<b>6. Conclusion .....</b>	<b>27</b>
<b>Chapitre II : Situations de tension d'un service d'urgence .....</b>	<b>28</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>28</b>
<b>2. Situations de tension : définition .....</b>	<b>28</b>
2.1. Les dimensions de la tension.....	28
2.2. Proposition de définition d'une situation de tension dans un SU .....	29
<b>3. Définition et caractérisation de la situation de tension dans un SU.....</b>	<b>31</b>
3.1. Proposition de définition d'une situation de tension dans un SU .....	33
3.2. Etats et modes de gestion d'un service d'urgence .....	35
3.3. Indicateurs de tension.....	36
<b>4. Actions de correction.....</b>	<b>40</b>
4.1. Actions internes .....	40
4.2. Actions externes.....	41
<b>5. Résilience d'un service d'urgence - Proposition d'une définition.....</b>	<b>41</b>
<b>6. Evaluation de la résilience d'un service d'urgence .....</b>	<b>42</b>

6.1.	Notion de performance d'un service d'urgence (SU).....	43
6.2.	Proposition d'une procédure d'évaluation de la résilience d'un SU.....	49
<b>7.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>51</b>
<b>Chapitre III : Proposition d'un système d'aide à la décision pour la gestion des situations de tension d'un service d'urgence .....</b>		<b>52</b>
<b>1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>52</b>
<b>2.</b>	<b>Aide à la décision et systèmes d'aide à la décision.....</b>	<b>52</b>
2.1.	Définition et classification des décisions .....	52
2.2.	Aide à la décision.....	54
<b>3.</b>	<b>Les systèmes d'aide à la décision (SAD) .....</b>	<b>55</b>
3.1.	Caractéristiques d'un SAD.....	55
3.2.	Typologie des systèmes d'aide à la décision.....	56
3.3.	Les systèmes d'aide à la décision hospitaliers .....	57
<b>4.</b>	<b>Spécification d'un SAD pour un service d'urgence .....</b>	<b>60</b>
4.1.	Le contexte.....	60
4.2.	Les objectifs du SAD .....	61
4.3.	Les exigences fonctionnelles d'un SAD pour un SU .....	61
4.4.	La décision organisationnelle dans un SU .....	61
4.5.	Le processus décisionnel dans un service d'urgence .....	63
4.6.	Modèle de processus décisionnel .....	64
4.7.	Les bonnes pratiques et recommandations d'usage pour la conception d'un SIAD.....	66
<b>5.</b>	<b>Architecture fonctionnelle du SIAD SAGEST.....</b>	<b>66</b>
5.1.	Identification de l'état du SU .....	67
5.2.	Recherche d'actions de correction .....	72
5.3.	Evaluation .....	74
5.4.	Interface utilisateur .....	75
<b>6.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>76</b>
<b>Chapitre IV : Les modèles du système SAGEST.....</b>		<b>77</b>
<b>1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>77</b>
<b>2.</b>	<b>Modèles de prévision .....</b>	<b>77</b>
2.1.	Modèles de séries chronologiques .....	77
2.2.	Utilisation des séries chronologiques dans le domaine hospitalier .....	80
<b>3.</b>	<b>Méthodes de détection d'anomalies pour la détection des situations de tension aux urgences hospitalières .....</b>	<b>81</b>
3.1.	Maitrise statistique des processus (MSP).....	81
3.2.	Contrôle statistique des processus univariés : cartes de contrôle univariées.....	82
3.3.	Contrôle statistique multivarié des processus : cartes de contrôle multivariées.....	82
<b>4.</b>	<b>Détection d'occurrence de situations de tension dans le fonctionnement d'un SU.....</b>	<b>83</b>



4.1.	Méthode de détection des situations de tension à base de modèles (SC-MSP).....	83
4.2.	Méthode de détection des situations de tension à base de données (ACP-MSPM).....	86
<b>5.</b>	<b>Les modèles de parcours patients pour la simulation .....</b>	<b>89</b>
5.1.	Processus général de prise en charge .....	89
5.2.	Typologie des patients admis au service d'urgence.....	90
<b>6.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>93</b>
<b>Chapitre V : Service d'urgence pédiatrique du CHRU de Lille.....</b>		<b>94</b>
<b>1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>94</b>
<b>2.</b>	<b>Le service d'urgence pédiatrique du CHRU de Lille .....</b>	<b>94</b>
2.1.	Présentation du site d'expérimentation – SUP du CHRU de Lille.....	94
2.2.	Modèle fonctionnel général du SUP .....	96
2.3.	Modèle dynamique du SUP .....	100
<b>3.</b>	<b>Données du SUP.....</b>	<b>101</b>
3.1.	Données patient au SUP.....	101
3.2.	Données chronologiques .....	102
<b>4.</b>	<b>Modèles développés pour le SUP.....</b>	<b>105</b>
4.1.	Modèles de prévision du nombre d'arrivées journalières au SUP.....	105
4.2.	Modèle de prévision du nombre d'arrivée par heure au SUP .....	110
4.3.	Modèle ACP.....	112
4.4.	Modèle de parcours de prise en charge des patients .....	116
4.5.	Indicateurs de tension et actions de corrections possibles au niveau du SUP .....	119
<b>5.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>121</b>
<b>Chapitre VI : Expérimentations et résultats.....</b>		<b>122</b>
<b>1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>122</b>
<b>2.</b>	<b>Prévision du nombre d'arrivées journalières de patients au SUP .....</b>	<b>122</b>
2.1.	Résultats obtenus .....	122
2.2.	Discussion.....	125
<b>3.</b>	<b>Détection d'occurrence des situations de tension au SUP.....</b>	<b>125</b>
3.1.	Détection univariée des arrivées anormales de patients au SUP.....	125
3.2.	Détection multivariée des demandes de soins au SUP.....	131
<b>4.</b>	<b>Pilotage proactif du SUP .....</b>	<b>135</b>
4.1.	Cas d'une augmentation du nombre d'arrivées de patients .....	135
4.2.	Comportement du SUP sans actions de correction .....	136
4.3.	Comportement du SUP avec actions de correction.....	137
4.4.	Performances du SUP en fonction des actions de correction .....	140
4.5.	Modèle CAST .....	142
<b>5.</b>	<b>Pilotage réactif du SUP .....</b>	<b>142</b>

5.1.	Observation des indicateurs de tension .....	143
5.2.	Définition des actions de correction.....	143
5.3.	Résultats.....	146
5.4.	Discussion.....	151
<b>6.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>152</b>
	<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>153</b>
	<b>Liste des acronymes .....</b>	<b>156</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>158</b>
	<b>ANNEXES .....</b>	<b>174</b>

## Table des Figures

Figure I-1 : Système sociotechnique.....	4
Figure I-2 : Les perturbations dans les systèmes sociotechniques.....	5
Figure I-3 : Modèle d'une perturbation dans un système sociotechnique.....	6
Figure I-4 : Notions associées à la résilience dans les principaux domaines.....	11
Figure I-5 : Organisation d'un système résilient.....	12
Figure I-7 : Approche R <sup>4</sup> (Robustesse, Réactivité, Redondance, Rapidité).....	15
Figure I-6 : Approche PR <sup>2</sup> (Préparation, Réponse et Récupération).....	15
Figure I-8 : Processus général de prise en charge des patients.....	18
Figure I-9 : Problématiques dans les services d'urgence.....	21
Figure II-1 : Démarche suivie pour l'identification et la modélisation des situations de tension dans un service d'urgence.....	32
Figure II-2 : Causes principales d'une situation de tension dans un service d'urgence.....	34
Figure II-3 : Les principales causes d'occurrence d'une situation de tension d'un SU.....	34
Figure II-4 : Situations, modes de gestion et de transitions entre états.....	35
Figure II-5 : Exemple d'indicateur de tension : taux de remplissage de la salle.....	40
Figure II-6 : Les actions de correction possibles dans un service d'urgence.....	41
Figure II-7 : Exigence de la résilience d'un service d'urgence (SU).....	42
Figure II-8 : Performance d'un service d'urgence.....	44
Figure II-9 : Etats du SU - Représentation simplifiée.....	45
Figure II-10 : Modèle de perturbation au sein d'un SU après occurrence d'une perturbation.....	46
Figure II-11 : Procédure générale d'évaluation de la résilience d'un SU.....	49
Figure III-1 : Processus de prise de décision pour le pilotage proactif/réactif d'un service d'urgence (SU).....	65
Figure III-2 : Architecture fonctionnelle du SAD SAGEST (les repères chiffrés correspondent à ceux de la figure III-1).....	67
Figure III-3 : Classification des méthodes de détection.....	70
Figure III-4 : Recherche d'actions de correction.....	72
Figure III-5 : Modèle CAST.....	73
Figure III-6 : Simulation du comportement du SU.....	74
Figure IV-1 : Méthodologie de détection des situations de tension à base de modèle.....	86
Figure IV-2 : Méthodologie de détection des situations de tension à base de données.....	88
Figure IV-3 - Principales activités du processus de prise en charge des patients dans un SU.....	90
Figure IV-4 : Les étapes de prise en charge selon le type de patient admis au.....	91
Figure V-1 : Plan du SUP de CHRU de Lille.....	95
Figure V-2 : Processus de prise en charge des patients au niveau de SUP.....	96
Figure V-3 : Enregistrer le patient.....	98
Figure V-4 : Accueillir et orienter les patients.....	98

Figure V-5 : Soigner le patient salle d'accueil des urgences vitales (SAUV). .....	99
Figure V-6 : Assurer les consultations infirmières et médicales.....	99
Figure V-7 : Hospitaliser le patient en UHCD.....	100
Figure V-8 : Etapes principales du processus de prise en charge au SUP. ....	100
Figure V-9 : (a) Nombre d'arrivées par jour au SUP et (b) Les fonctions d'auto-corrélation des séries chronologiques (Total, G2 et G4). ....	103
Figure V-10 : Nombre d'arrivées de patients par heure de la journée relevé pendant la période épidémique (Novembre 2011 à Mars à 2012).....	104
Figure V-11 : (a) Nombre de patients admis au SUP par heure sur une période.....	104
Figure V-12 : Boite à moustache des huit variables utilisées. ....	105
Figure V-13 : Données des séries brutes (G2, G4 et Total) et les données ajustées par les trois modèles. ....	107
Figure V-14 : Diagrammes de dispersion des données prédites par rapport aux données observées	107
Figure V-15 : Test de distribution gaussienne a) la droite de Henry b) histogramme, G2. ....	109
Figure V-16 : Test de distribution gaussienne a) la droite de Henry b) histogramme, G4. ....	109
Figure V-17 : Test de distribution gaussienne a) la droite de Henry, b) histogramme .....	110
Figure V-18 : Fonction d'auto-corrélation des erreurs résiduelles a) G2 b) G4 c) Total.....	110
Figure V-19 : Test de distribution gaussienne a) la droite de Henry b) histogramme. ....	112
Figure V-20 : ACF des erreurs résiduelles du modèle SARMA.....	112
Figure V-21 : Variance capturée par chaque composante principale (CP).....	113
Figure V-22 : Diagramme de dispersion des valeurs observées versus .....	114
Figure V-23 : Histogramme des résidus. ....	115
Figure V-24 : ACF des erreurs résiduelles.....	115
Figure V-25 : Parcours du patient type 1. ....	116
Figure V-26 : Parcours du patient type 2. ....	117
Figure V-27 : Parcours du patient type 3. ....	117
Figure V-28 : Parcours du patient type 4. ....	118
Figure V-29 : Parcours du patient type 5. ....	118
Figure VI-1 : Prévion sur un horizon $H = 7$ jours, série G2.....	123
Figure VI-2 : Prévion sur un horizon $H = 7$ jours, série G4.....	123
Figure VI-3 : Prévion à un horizon $H = 7$ jours, série Total. ....	123
Figure VI-4 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une .....	127
Figure VI-5 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte CUSUM en présence d'une situation anormale (cas $A_1$ ).....	127
Figure VI-6 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte de Shewhart type I-chart en présence d'une situation anormale (cas $A_1$ ).....	128
Figure VI-7 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une situation anormale (cas $A_2$ ).....	128
Figure VI-8 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte CUSUM en présence d'une situation anormale (cas $A_2$ ).....	129
Figure VI-9 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte I-chart en présence d'une situation anormale (cas $A_2$ ).....	129

---

Figure VI-10 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une situation anormale progressive (cas B).....	130
Figure VI-11 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte CUSUM en présence d'une situation anormale progressive (cas B).....	130
Figure VI-12 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte I-chart en présence d'une situation anormale progressive. ....	131
Figure VI-13 : L'évolution temporelle de la statistique $Q$ en présence d'anomalies .....	132
VI-14 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte $T^2$ en présence d'anomalies sur plusieurs jours (cas A).....	132
Figure VI-15 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte MCUSUM .....	133
Figure VI-16 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte $Q$ en présence .....	133
Figure VI-17 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte $T^2$ en présence.....	134
Figure VI-18 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte MCUSUM .....	134
Figure VI-19 : Nombre d'arrivées de patients par heure en fonction du jour de .....	135
Figure VI-20 : Evolution de l'indicateur PW.....	136
Figure VI-21 : Evolution de l'indicateur $T_2$ .....	137
Figure VI-22 : Evolution de l'indicateur PW dans le cas de l'alternative A. ....	138
Figure VI-23 : Evolution de l'indicateur PW dans le cas de l'alternative B.....	140
Figure VI-24 : Evolution de la performance $Q_{PW}$ (%) pour les deux meilleurs .....	141
Figure VI-25 : Tableau de bord pour l'observation des indicateurs de tension. ....	144
Figure VI-26 : Evolution de l'indicateur PW. ....	145
Figure VI-27 : Impact de l'ajout d'une infirmière. ....	146
Figure VI-28 : Impact de l'ajout d'un médecin. ....	147
Figure VI-29 : Impact de l'ajout d'un box.....	148
Figure VI-30 : Impact des règles de priorité.....	149
Figure VI-31 : Combinaison de plusieurs actions de correction.....	150

## Table des Tableaux

Table I-1 : Résilience et domaines d'application.....	10
Table II-1 : Indicateurs de tension d'un service d'urgence .....	37
Table II-2 : Les 21 indicateurs candidats .....	38
Table II-3 : Les cinq indicateurs de tension au SUP- CHRU Lille.....	39
Table II-4 : Notations.....	47
Table III-1 : Critères de classification des décisions. ....	53
Table III-2 : Nature des décisions organisationnelles dans un SU.....	62
Table III-3 : Nature de décision dans le cadre d'un SU / objectif de résilience.....	63
Table V-1 : Nombre de personnel soignant au SUP. ....	97
Table V-2 : Nombre de personnel médical au SUP. ....	97
Table V-3 : Nombre de ressources équivalent. ....	97
Table V-4 : Durées et temps d'attentes au SUP.....	101
Table V-5 : Variables utilisées.....	105
Table V-6 : Paramètres des trois modèles proposés.....	106
Table V-7 : Mesures de validation statistiques appliquées aux données des trois modèles sélectionnés pour les séries G2, G4 et Total. ....	108
Table V-8 : Paramètres du modèle SARMA .....	111
Table V-9 : Mesures de validation statistique appliquées du modèle SARMA.....	111
Table V-10 : Test de normalité multivariée .....	114
Table V-11 : Valeurs seuils des indicateurs sélectionnés .....	119
Table V-12 : Exemple de modèle CAST (voir figure III-5 du chapitre III).....	121
Table VI-1 : Comparaison réel/estimé du nombre d'arrivées journalières.....	124
Table VI-2 : Statistiques des deux séries G2 et G4.....	124
Table VI-3 : Les écarts-types d'erreurs de prévisions (de 22 au 28 décembre, 2012) .....	125
Table VI-4 : Les deux types d'anomalies simulées .....	126
Table VI-5 : Arrivées anormales brusques des patients.....	126
Table VI-6 : Meilleurs scénarios dans le cas de l'alternative A.....	138
Table VI-7 : Actions de correction dans le cas de l'alternative B .....	139
Table VI-8 : Modèle CAST pour les scénarios A <sub>1</sub> et B <sub>3</sub> .....	142
Table VI-9 : Définition des scénarios et alternatives composant les actions de corrections.....	145
Table VI-10 : Modèle CAST pour les scénarios A <sub>31</sub> , B <sub>31</sub> et C <sub>31</sub> .....	151

## **Projet ANR - HOST "Hôpital : Optimisation, Simulation et évitement des Tension"**

Le projet ANR - HOST "*Hôpital : Optimisation, Simulation et évitement des Tension*" porte sur la conception et la mise en œuvre d'un système d'aide à la décision pour l'anticipation et la limitation des tensions dans les systèmes hospitaliers en particulier les services des urgences et d'établir des propositions d'évitement de ces tensions. Il s'inscrit dans la thématique : "E-Santé et Information Médicale" et concerne l'axe 2.2 de l'appel à projet 2011 : "L'ingénierie et la modélisation des connaissances et des données de santé". Il a démarré en janvier 2012 pour une durée de 36 mois qui a été prolongée jusqu'au juin 2015.

Les travaux portent en particulier sur la collecte, l'organisation, la structuration et le partage des informations médicales en fonction des usages en intégrant des aspects d'interopérabilité.

Ce projet s'inscrit dans les contextes économiques, humains, sanitaires, sociaux et réglementaires. Il permet de proposer une modélisation prédictive de la tension pouvant s'installer dans un établissement de santé dans le but de l'éviter au mieux, à l'aide de procédés scientifiques et technologiques s'intégrant dans un système d'aide à la décision destiné aux cadres de soins. Le projet HOST s'appuie sur le Centre Hospitalier Régional Universitaire (CHRU) de Lille comme site expérimental. Toutefois, la démarche proposée doit conserver un caractère générique pour pouvoir être appliquée à d'autres établissements hospitaliers, ou encore à des situations liées à une/des catastrophes naturelles et/ou technologiques.

Les différents thèmes scientifiques abordés lors de ce projet sont :

- 1) Caractérisation et modélisation d'une situation de tension. Il s'agit ici de définir les indicateurs de tension pertinents et d'élaborer un système d'aide à la décision capable de détecter l'apparition de situations de tension
- 2) Evaluation du système d'aide à l'anticipation des tensions de l'hôpital. Un référentiel d'évaluation sera proposé, permettant de diagnostiquer le modèle élaboré et d'en proposer des améliorations.
- 3) Proposition de stratégies d'évitement des tensions. Il s'agit d'identifier et de modéliser des actions correctives, afin d'éviter au mieux les tensions anticipées.

Le consortium est composé de 7 partenaires connus pour leurs travaux dans le domaine de la santé :

- Laboratoire de Santé publique EA2694 - Lille 2 (Coordonnateur).
- Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal, "LAGIS" (Ecole centrale de Lille et USTL). A partir de janvier 2015, il deviendra le Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille, "CRISTAL".
- Laboratoire d'informatique, de modélisation et d'optimisation des systèmes, "LIMOS" UMR-CNRS 6158, (Clermont-Ferrand).
- Centre Ingénierie et Santé, "CIS" (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne).
- Laboratoire Thermique Ecoulement Mécanique Matériaux Mise en Forme Production, "TEMPO" - Carnot ARTS (équipe PSI), UVHC (Valenciennes). A partir de janvier 2015, il deviendra le Laboratoire d'Automatique, Mécanique, Informatique Humaines, "LAMIH" UMR-CNRS 8201.
- Société ALICANTE (Conception des systèmes d'information), Lille.
- Centre Hospitalier Régional Universitaire, "CHRU" de Lille.

## **Introduction générale**

Le travail présenté dans cette thèse porte sur la conception d'un système d'aide à la décision pour la gestion des situations de tension dans les services d'urgence hospitaliers (que nous désignerons par services d'urgence ou SU). Il s'inscrit dans le cadre du projet HOST "Hôpital, Optimisation, Simulation et évitement des Tensions" financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Le service d'urgence pédiatrique (SUP) du Centre Hospitalier Régional Universitaire (CHRU) de Lille a constitué le site d'expérimentation de ce projet.

Les services d'urgence sont des composantes clés des systèmes hospitaliers. Leur mission est de fournir des soins (médicaux et/ou chirurgicaux) immédiats aux patients. Toutefois, ces services rencontrent de plus en plus de difficultés à assurer leurs missions. La prise en charge des flux de patients dans les services d'urgence est ainsi l'un des problèmes les plus importants et difficiles à gérer par les directions hospitalières.

Les principales problématiques auxquelles les services d'urgence doivent faire face sont essentiellement :

- l'augmentation du volume des admissions aux urgences hospitalières (engorgement des urgences, pics d'activités),
- la limitation des ressources (humaines et matérielles),
- les contraintes structurelles, financières et organisationnelles,
- le manque de formation du personnel médical pour résoudre les problèmes liés à la gestion du flux de patients.

La conjonction de ces problématiques est la cause de l'apparition de situations de tension au sein d'un service d'urgence. Elles induisent des dysfonctionnements importants et un accroissement sensible de la charge de travail du personnel du service. Il est donc primordial, pour les responsables d'un service d'urgence, de disposer d'un système d'aide à la décision pour l'anticipation et la gestion de ces situations de tension et l'élaboration d'actions de correction permettant de les éviter ou d'en limiter les effets. Notre objectif de travail de thèse est la conception de ce système impliquant d'aborder les aspects suivants :

- définition et modélisation d'une situation de tension,
- définition et modélisation d'indicateurs de tension pertinents et d'actions de correction des situations de tension,
- élaboration de méthodologies et d'outils d'aide à la décision.

Le présent mémoire est composé de six chapitres organisés selon le plan suivant.

Le premier chapitre aborde, dans une première partie, la problématique de la résilience des systèmes sociotechniques. La notion de résilience et les notions qui lui sont associées dans plusieurs domaines sont tout d'abord présentées. La seconde partie introduit les concepts de résilience d'un service d'urgence prenant en compte les différents types de perturbations rencontrées au sein d'un SU.



Dans le deuxième chapitre, nous définissons et caractérisons dans la première partie, les situations de tension qui peuvent se produire dans les services d'urgence, les états et les modes de gestion de ces situations. Les indicateurs de tension permettant de détecter l'apparition d'une situation de tension et les actions de corrections associées sont ensuite présentés. Dans la deuxième partie, nous proposons une définition de la résilience d'un service d'urgence et les concepts clés qui en découlent. Enfin, dans la dernière partie du chapitre, nous exposons une procédure d'évaluation de la résilience d'un service d'urgence.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de notre proposition d'un système d'aide à la décision (SAD) pour le pilotage proactif et réactif d'un service d'urgence. Les principaux concepts liés à l'aide à la décision (typologies des décisions et différents types de systèmes d'aide à la décision) sont brièvement rappelés. Puis, nous présentons les spécifications d'un système d'aide à la décision pour les services d'urgence et caractérisons les décisions au sein d'un SU. Dans la dernière partie, nous proposons une architecture fonctionnelle de notre système SAGEST (Système d'Aide à la décision pour la GEstion des Situations de Tension) pour un service d'urgence.

Nous détaillons, dans le quatrième chapitre, les principales fonctions du système SAGEST. La fonction de prévision est construite principalement à partir des modèles de séries chronologiques, la fonction de détection s'appuie sur des modèles de détection d'anomalies combinant les techniques de la maîtrise statistique de processus et les séries chronologiques. Les différents modèles de parcours patients au sein d'un service d'urgence, utilisés pour la simulation, sont ensuite décrits.

Nous présentons, dans le cinquième chapitre, le service d'urgence pédiatrique (SUP) du centre hospitalier régional universitaire (CHRU) de Lille. Nous décrivons ensuite les différentes données caractérisant le SUP, le processus de prise en charge des patients au sein du SUP et le modèle fonctionnel associé. Dans la dernière partie, nous proposons les modèles de prévision, de détection et de simulation développés et validés pour le SUP du CHRU de Lille.

Les différents résultats de l'application des modèles de SAGEST développés dans le chapitre précédent pour le SUP de CHRU de Lille sont présentés et analysés dans le sixième chapitre. Ils concernent en particulier la prévision du nombre d'arrivées journalières de patients au SUP, la détection d'occurrences de situations de tension en utilisant les deux méthodologies de détection proposées. Enfin, les résultats de la simulation pour le pilotage proactif et réactif du SUP sont présentés et analysés.

Les conclusions sur le travail de thèse et plusieurs perspectives de recherche complètent le mémoire.

# Chapitre I : Résiliences des systèmes sociotechniques.

## Cas des services d'urgence

### 1. Introduction

On peut distinguer les différents systèmes existant selon quatre grandes classes : systèmes matériels (naturels : systèmes physiques ou artificiels : systèmes techniques), systèmes vivants (naturels : systèmes biologiques ou artificiels : systèmes sociaux). Les facteurs de la complexité des systèmes sociotechniques sont liés à leur double nature - technique et sociale- et aux interactions et interdépendances entre les deux systèmes correspondants.

Nous rappelons tout d'abord, dans la première partie, quelques définitions et caractéristiques d'un système sociotechnique. Les systèmes sociotechniques, systèmes dynamiques, sont par nature, sujets à de multiples perturbations. Nous en donnons une description et un modèle dans la deuxième partie. Le comportement d'un système sociotechnique et sa résistance aux perturbations sont souvent qualifiés par sa résilience. La troisième partie en décrit le concept et les principales caractéristiques. Les services d'urgence constituent une classe de systèmes sociotechniques dont nous décrivons les aspects spécifiques et les problématiques dans la dernière partie du chapitre.

### 2. Systèmes sociotechniques

#### 2.1. Les systèmes sociotechniques : définition, caractéristiques

Plusieurs définitions d'un système sociotechnique ont été proposées :

Selon Meinadier, (1998), un système sociotechnique complexe (SSC) est défini comme un ensemble composite de personnels, de matériels et de logiciels organisés pour que leur interfonctionnement permette, dans un environnement donné, de remplir les missions pour lesquelles il a été conçu.

D'après Adger, (2000), un système sociotechnique est l'association d'hommes et de moyens (outils, machines, processus, procédés, procédures, finances) pour réaliser une ou plusieurs tâche(s) et/ou projets. Son évolution doit intégrer deux caractéristiques : d'une part, il est le résultat de l'activité humaine telle que la conception, l'ingénierie, la gestion et la communication ; d'autre part, il est présent dans des domaines tels que l'environnement.

Une définition plus récente des systèmes sociotechniques a été proposée par Fischer and Herrmann, (2011). Les auteurs ont défini les systèmes sociotechniques comme l'intégration de deux types de systèmes (figure I-1) :

- *les systèmes techniques* : ils se composent d'ordinateurs, de réseaux et logiciels, etc. Ils sont considérés comme des outils, pouvant de manière fiable et à plusieurs reprises être utilisés pour répondre aux besoins humains et renforcer les capacités humaines.

- *les systèmes sociaux* : ils se composent de personnes, de procédures, de politiques, de lois et de nombreux autres aspects. Ils sont en changement et évolution continue, ce qui rend leur comportement difficile à anticiper.

Le comportement et les attributs des éléments constitutifs de ces deux sous-systèmes ne sont pas indicatifs ou prédictifs du comportement de l'ensemble du système et, d'autre part, les développements technologiques rapides au sein de ces systèmes sont deux facteurs qui concourent à leur complexité et conduisent potentiellement à des événements indésirables.

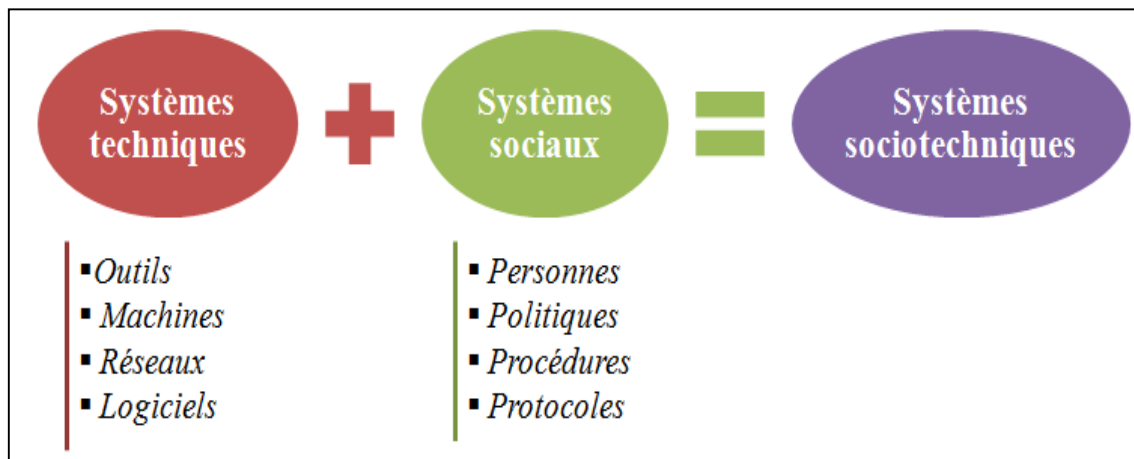


Figure I-1 : Système sociotechnique.

Malgré sa vulnérabilité, la partie sociale (l'activité humaine) est également un facteur de fiabilité dans la gestion des systèmes sociotechniques complexes fonctionnant dans un environnement critique (Vanderhaegen, 2003). Par conséquent, l'adaptabilité de la partie sociale est nécessaire pour faire face aux menaces ou aux phénomènes techniques imprévus. Le fonctionnement sûr et efficace d'un système sociotechnique est le résultat d'un apprentissage continu du travail et de l'interaction entre la partie sociale et la partie technique du système dans le même environnement (Oedewald and Reiman, 2006; Reiman and tutkimuskeskus, 2007).

## 2.2. Les perturbations dans les systèmes sociotechniques

Les systèmes sociotechniques sont confrontés à des perturbations de différentes natures et intensités, réparties selon les trois catégories suivantes (figure I-2) :

- *Les perturbations naturelles* : ce sont des menaces découlant des phénomènes et/ou risques naturels majeurs (géologiques ou atmosphériques) aléatoires telles que les inondations, les séismes, les mouvements de terrain, les tempêtes, les cyclones, les feux de forêt, etc. Quand ces perturbations se produisent, elles provoquent des dommages importants sur les communautés et l'environnement qui les entourent. Ces perturbations sont des risques naturels majeurs.
- *Les perturbations humaines* : elles peuvent être dues aux erreurs humaines (incompétence, fatigue, etc.) ou à des actes de malveillance (sabotage, attaque terroriste, etc.).

- *Les perturbations technologiques* : elles sont engendrées par l'activité humaine (risques technologiques majeurs); elles résultent de la manipulation, de la production, du stockage, du conditionnement ou du transport d'un produit dangereux, tels que les risques industriels nucléaires, de la radioactivité, de la rupture de barrages, de pannes des réseaux électriques, de pannes des systèmes informatiques, etc.

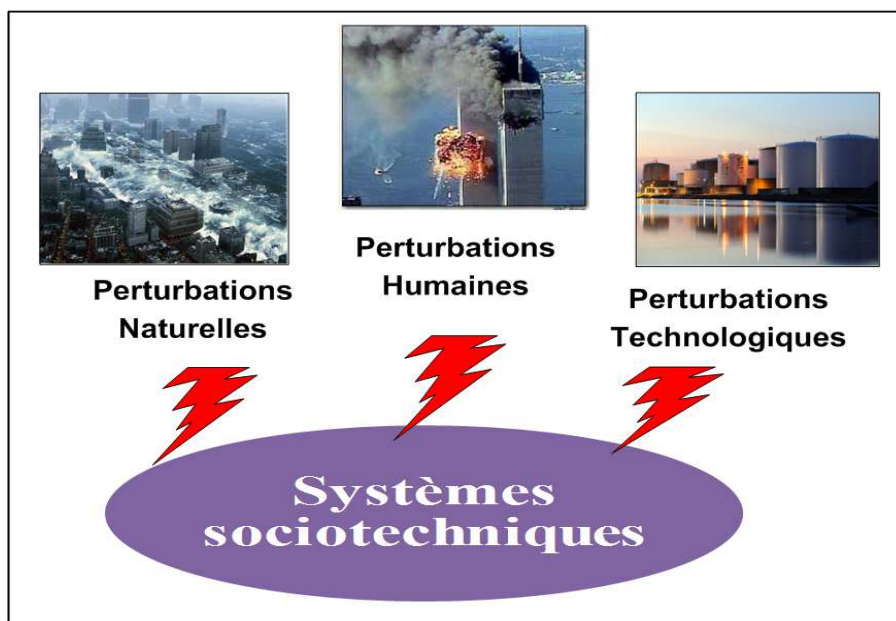


Figure I-2 : Les perturbations dans les systèmes sociotechniques.

### 2.3. Modèle d'une perturbation dans un système sociotechnique

Aini and Fakhurul-Razi, (2010) proposent un modèle de perturbation dans un système sociotechnique comportant trois périodes : pré-perturbation, perturbation et post-perturbation, comportant elles-mêmes plusieurs phases (figure I-3) :

1. **Période de pré-perturbation** : c'est la période avant l'occurrence d'une perturbation. Elle se compose des quatre phases suivantes :
  - Phase d'exploitation (fonctionnement) : point de départ initial où le système sociotechnique commence son fonctionnement.
  - Phase d'incubation : moment qui suit la phase d'exploitation et durant laquelle les déviations, les écarts et les fautes professionnelles commencent à se produire et s'incubent dans le système jusqu'au moment de l'événement déclencheur de dysfonctionnement,

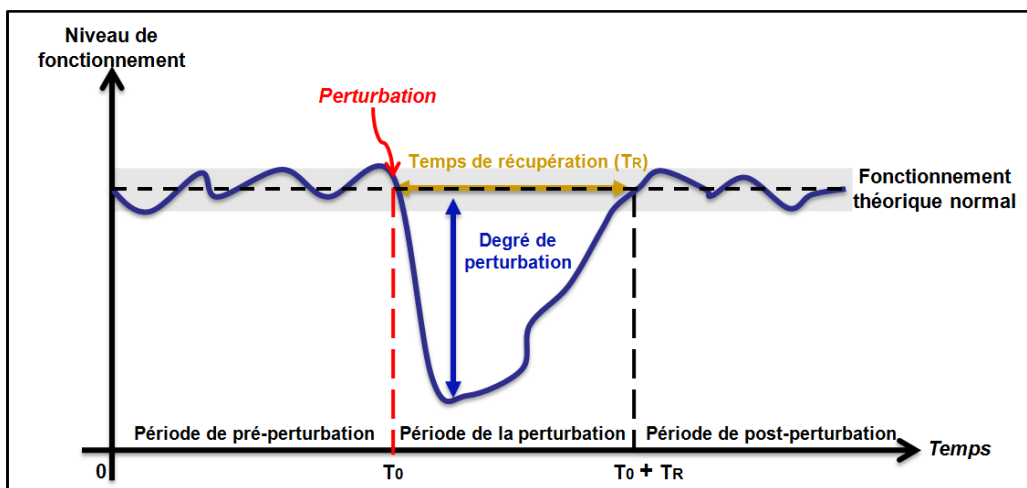


Figure I-3 : Modèle d'une perturbation dans un système sociotechnique.

- Phase d'avertissement préalable : un ou plusieurs signes précurseurs apparaissent durant la période d'incubation pour signaler les anomalies, mais sont généralement ignorés ou mal interprétés.
  - Phase d'activations : occurrence de la perturbation déclenchant un ou plusieurs dysfonctionnements et souvent assignée à des individus ou des événements spécifiques.
2. **Période de la perturbation** : c'est la période au cours de laquelle le (ou les) dysfonctionnement est présent. Elle se compose des phases suivantes :
- Phase d'apparition : début du dysfonctionnement après son activation par un événement déclencheur.
  - Phase de réponse et de récupération : comprend l'intervention d'urgence qui comporte la détection immédiate et la caractérisation de la perturbation, puis la prise de mesures pour l'atténuation ou l'élimination des impacts de la perturbation.
3. **Période de post-perturbation** : c'est le temps après lequel les opérations et les actions d'atténuation de l'intervention d'urgence sont terminées. Cette période comporte les quatre phases suivantes :
- phase d'enquêtes et rapports : enquêtes sur les dysfonctionnements et pannes ayant entraîné les dysfonctionnements, des dommages et des pertes (humaines et matérielles),
  - retour d'information : mise en œuvre des recommandations de l'enquête par l'organisation concernée exposée à une perturbation similaire,
  - définition des responsabilités et action(s) judiciaire(s) : les conclusions et les rapports d'enquêtes qui sont établis sont utilisés pour aider les différents organismes concernés (gouvernement, direction d'entreprise, services de sécurité...) ou les représentants des victimes à renforcer les

mesures, en vertu des lois et des règlements en vigueur, contre ceux qui sont désignés comme responsables par le comité d'enquête,

- réforme sociale et législation : établissement de l'entité sociale et préparation de nouvelles législations ou modification des lois et règlements en vigueur, après un dysfonctionnement dans le système social.

Les conséquences des perturbations au sein d'un système sociotechnique peuvent varier de la simple situation d'urgence aux catastrophes à grande échelle en passant par des situations de crise (Boin et al., 2008; Fagel, 2013; Rosenthal et al., 2001) :

- **Les situations d'urgences** : elles sont imprévues, les événements déclencheurs sont limités dans le temps et dans l'espace (Lindell et al., 2006). On peut citer comme exemple les embouteillages bloquant toutes les voies d'accès, y compris pour les véhicules de secours lors de l'inondation de Gênes (Italie) en octobre 1970, d'Alger (Algérie) en novembre 2001, lors de l'explosion de l'usine Azote à Toulouse (France) en Septembre 2001.
- **Les crises** : elles sont de différentes magnitudes et conséquences, les crises représentent des menaces pour le fonctionnement des systèmes sociotechniques, qui doivent être traitées en toute urgence sous ces conditions en raison des grandes incertitudes, telle que : i) la panne d'électricité qui a frappé les régions centrale et nord-est des Etats-Unis, ainsi qu'une partie de l'Ontario, au Canada en 2003 (Goldman, 2003; GTEUC, 2004), les crises sanitaires, et les situations de tension au niveau des services d'urgence (DHOS, 2006; Fee et al., 2011; Hoot and Aronsky, 2008; Kadri et al., 2014). On distingue cinq grandes familles de crises: i) les crises technologiques comme une explosion ou une contamination, ii) les crises économiques comme les grèves ou les fermetures d'usines, iii) les crises psychologiques et culturelles comme le terrorisme ou des sabotages internes ou externes, iv) les crises environnementales comme les accidents industriels et les déversements de produits pétroliers (Kadri et al., 2011, 2013a), v) les crises informationnelles comme l'espionnage industriel.
- **Les catastrophes** : ce sont des événements qui ont une très faible probabilité de se produire. Cependant, lorsqu'ils se produisent, les conséquences engendrées sur les systèmes sociotechniques sont extrêmement graves (Kadri et al., 2014e). Les catastrophes sont divisées en trois classes : les catastrophes naturelles, catastrophes d'origine humaine (les catastrophes technologiques) et catastrophes hybrides (Shaluf, 2007), telles que, i) l'accident technologique : AZF, Toulouse, France, 2001 (Cassadou et al., 2003), ii) l'événement météorologique : la canicule européenne en 2003 (Tressol, 2008), et iii) la double catastrophe (naturelle-technologique) au Japon en Mars 2011 (Yamashita and Shigemura, 2013).

La complexité croissante, des contraintes et des perturbations nouvelles et diverses, de plus en plus intenses et fréquentes des systèmes rendent ces systèmes très vulnérables. Pour faire face à cette évolution, le système sociotechnique doit intégrer dans son fonctionnement la

capacité à anticiper et à mobiliser des moyens pour sa reconstruction. L'ensemble de ces capacités caractérisent le concept de *résilience* que nous présentons dans la partie suivante.

### 3. Résilience des systèmes sociotechniques

Le terme résilience a été utilisé initialement par Charpy (1901) pour caractériser la résistance aux chocs des matériaux. La résilience désigne alors la capacité d'un métal à résister à la rupture et à reprendre sa forme initiale à la suite d'un choc ou d'une pression continue. Actuellement, la résilience se caractérise comme un processus qui permet aux systèmes de retrouver leurs conditions de fonctionnement initial ou de les maintenir dans un environnement dynamique et changeant.

La résilience est définie de différentes façons, selon le champ de l'étude où elle est considérée et il n'en existe pas de définition unique : chaque auteur a sa propre définition, elle recouvre des représentations et idées différentes, la définition qui en est donnée varie selon ce que l'on veut démontrer.

#### 3.1. Principaux domaines de la résilience

La notion de résilience est utilisée dans différents contextes scientifiques, recouvrant différentes perspectives comme la faculté à anticiper à faire face, à surmonter une situation, à rester en dessous de seuils dont le franchissement provoquerait des changements structurels irréversibles au sein des systèmes, à adopter des comportements originaux au regard de situations exceptionnelles, etc., (Rigaud, 2011). Tierney and Bruneau, (2007) ont défini l'application de la résilience dans quatre principaux domaines :

- **Le domaine technique** : la définition de la résilience dans ce domaine fait principalement référence aux propriétés physiques des systèmes et à leurs capacités à résister à des perturbations engendrant des dommages et des pertes de fonctionnalité (élément redondant inclus).
- **Le domaine organisationnel** : la résilience organisationnelle concerne les organisations et les institutions et englobe la mesure de la capacité organisationnelle, la planification, la formation, l'expérience et la gestion de l'information, qui permettent d'améliorer la réactivité face aux catastrophes liées aux performances organisationnelles et la résolution des problèmes.
- **Le domaine social** : ce domaine inclut les caractéristiques de la population et de sa communauté qui rendent les groupes sociaux, soit plus vulnérables ou plus adaptatifs aux risques et aux catastrophes. Les indicateurs de la vulnérabilité sociale comportent, notamment, la pauvreté, le faible niveau d'instruction, l'isolement linguistique et le manque d'accès aux ressources pour les actions de protection, telle que l'évacuation.
- **Le domaine économique** : les économies locales et régionales et les entreprises présentent différents niveaux de résilience. La résilience économique a été analysée à la fois en terme de propriétés intrinsèques des économies locales, telle

que la capacité des entreprises à faire des ajustements et des adaptations durant les périodes de non-catastrophe et en terme de leur capacité d'improvisation, d'innovation et de substitution de ressources après la catastrophe.

D'autres domaines ont également introduit la notion de résilience dans leurs réflexions : le domaine médical psychiatrie (Goussé, 2008), la biologie (Martin, 2005), la gestion de catastrophes et crises (Bourcart, 2011; Trachsler, 2009), l'automatique (Numanoglu et al., 2006; Zieba, 2009), la socio-écologie (Walker et al., 2002).

### **3.2. Résilience : définitions et notions associées**

Les définitions de la résilience dans différentes communautés sont présentées dans la table I-1 (Ouedraogo, 2013).

Différentes notions (figure I-4) sont associées à la résilience dans les différents domaines (Lhomme et al., 2010). Par exemple, la science des matériaux associe la résilience à des notions comme l'absorption (de chocs) et la résistance (aux chocs). L'absorption est relative à l'aptitude du matériau à dissiper l'énergie du choc, tandis que la résistance est l'aptitude du matériau à s'opposer au passage (circulation) de cette énergie.

L'écologie définit la résilience grâce aux notions d'absorption (de perturbations), de persistance et de récupération (après une perturbation). En psychologie, la résilience est associée aux notions de résistance (au traumatisme) et de reconstruction (pour s'en sortir). La résilience en économie est associée aux notions de persistance et de durabilité (développement économique durable). En informatique, la résilience est liée aux notions de persistance ou de résistance (tolérance aux pannes).

Plusieurs auteurs cherchent à préciser ce qui relève ou non de la résilience. Pour certains, la notion de résilience doit être restreinte à la prise en charge des événements majeurs, imprévus et inhabituels, qui sortent du domaine prévu (Lundberg and Johansson, 2007; Woods, 2006).

Pour d'autres auteurs, le concept de résilience est plus vaste (gestion des événements prévus et imprévus), il s'intéresse aux variations plus ou moins importantes du domaine de performance du système. Ces auteurs associent la résilience au fonctionnement du système dans des conditions prévues et imprévues (Hollnagel, 2011; Westrum, 2006).



Table I-1 : Résilience et domaines d'application.

Domaine	Définition de la résilience	Références
Sciences des matériaux	Résistance aux chocs des matériaux. Qualité des matériaux qui tient à la fois de l'élasticité et de la fragilité et qui se manifeste par leur capacité à retrouver leur état initial à la suite d'un choc ou d'une pression continue.	(Charpy, 1901), (Tanguy, 2005, 2001)
Psychologie	La capacité d'un individu à surmonter un traumatisme (invulnérabilité). L'aptitude des individus à faire face à un traumatisme sans en être affecté ultérieurement, ou à trouver un moyen de se reconstruire et rétablir leur équilibre émotionnel dans des situations de stress ou d'abus importants.	(Luthans et al., 2006), (Békaert et al., 2011)
Informatique	En informatique, la résilience se définit comme la tolérance aux pannes, aux bogues, aux failles. Un système informatique résilient sera donc par exemple un système capable de fonctionner malgré des bogues. Les défaillances du système sont perçues comme inévitables et donc sont acceptées selon des critères.	(Luo and Yang, 2002), (Chen et al., 2007), (Nakayama et al., 2007)
Ecologie	Amplitude maximale des perturbations qu'un système écologique peut supporter sans que son fonctionnement ne soit affecté. La capacité de récupération ou de régénération d'un organisme ou d'une population, et d'autre part, l'aptitude d'un écosystème à se remettre plus ou moins vite d'une perturbation	(Holling, 1996) (Carpenter et al., 2001) ( Walker et al., 2002)
Economie	Capacité à surmonter les turbulences économiques critiques (chocs pétroliers, crises financières)	(Fiksel, 2003) (Cox et al., 2011)
Système sociotechnique (Organisation)	Capacité d'un système à maintenir, ou retrouver rapidement un état stable, lui permettant de continuer à fonctionner pendant et après une perturbation majeure. La résilience est ainsi définie comme la capacité à anticiper une perturbation, d'y résister en s'adaptant, et à se rétablir en retrouvant le plus rapidement possible l'état d'avant la perturbation.	(Hollnagel et al., 2007) (Cimellaro et al., 2010) (Ouedraogo, 2013)

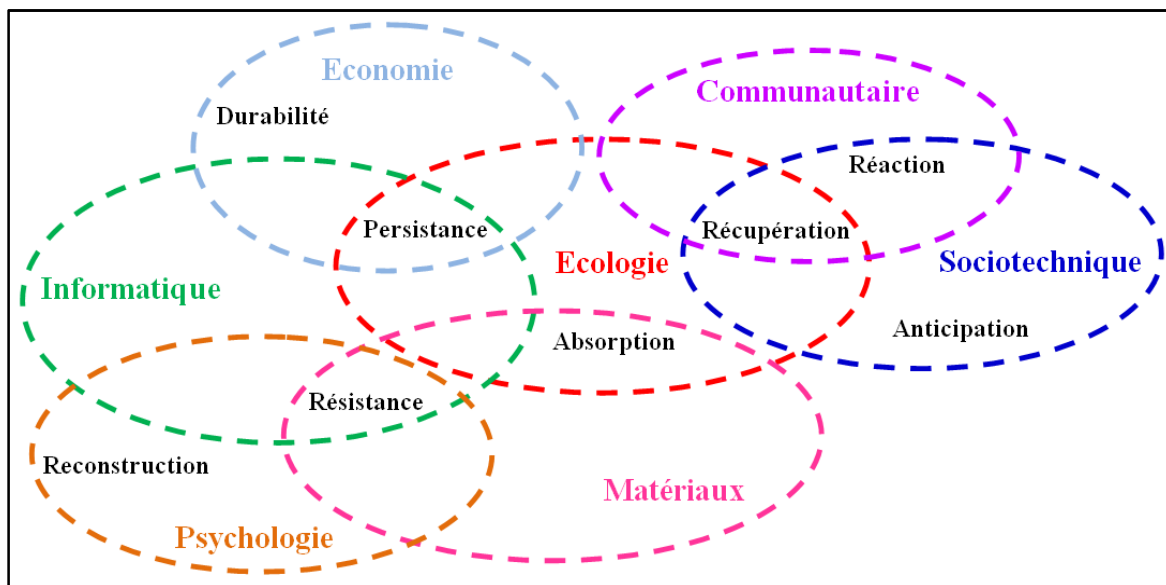


Figure I-4 : Notions associées à la résilience dans les principaux domaines d'application (Lhomme et al., 2010).

Les systèmes d'urgence constituent une organisation complexe et, compte tenu de leur nature, nous nous intéressons plus particulièrement à la résilience organisationnelle.

### 3.3. La résilience organisationnelle

Parmi les nombreuses définitions de la résistance organisationnelle existantes, nous retenons les définitions suivantes.

Horne, (1997) définit la résilience organisationnelle comme étant la résistance de l'organisation face à une perturbation et sa capacité à se rétablir. Selon Madni, (2007), la résilience organisationnelle est la capacité d'anticiper une perturbation, d'y résister en s'adaptant, et de se rétablir en retrouvant le plus possible l'état d'avant la perturbation.

Un autre aspect important, également abordé dans la littérature, est le déploiement des ressources. Vogus and Sutcliffe, (2007) précisent que la capacité d'une organisation à être résiliente face à une perturbation est intimement liée à sa capacité à :

- planifier les ressources nécessaires pour faire face à la perturbation (planification en termes d'échéancier, de marge de manœuvre et de budget),
- anticiper le déploiement des ressources pour être proactif face à une perturbation,
- déployer rapidement les ressources nécessaires en bon nombre et au moment adéquat.

Pour Madni and Jackson, (2009), la résilience organisationnelle se définit comme la capacité à maintenir des barrières effectives qui peuvent résister à l'impact d'agents nuisibles et à l'érosion qui est le résultat d'un état latent.

La résilience organisationnelle s'articule selon quatre axes :

1. *l'anticipation* (ou la capacité à éviter les perturbations) : traduit le besoin d'anticipation des aléas de manière à être proactif,
2. *la résistance* : exprime le besoin de robustesse du système pour absorber les chocs sans modifier son équilibre,
3. *l'adaptation* : traduit le besoin de flexibilité du système pour se reconfigurer en fonction des perturbations subies,
4. *le rétablissement*: traduit la capacité du système à retrouver un état d'équilibre, aussi proche possible que celui existant avant la perturbation.

Hollnagel et al., (2010) définissent la résilience organisationnelle comme une capacité que l'organisation déploie avant la perturbation (dans la phase de prévention et préparation), mais également pendant la perturbation (dans la phase d'intervention) et enfin après la perturbation (dans la phase de rétablissement). Un système résilient doit combiner des caractéristiques d'anticipation, de réaction et de récupération face à une perturbation (Hollnagel et al., 2010). La figure I-5 présente les propriétés d'une organisation résiliente, ces propriétés de résilience prennent en compte les interactions dans un système complexe et le comportement du système face à une perturbation (événements) :

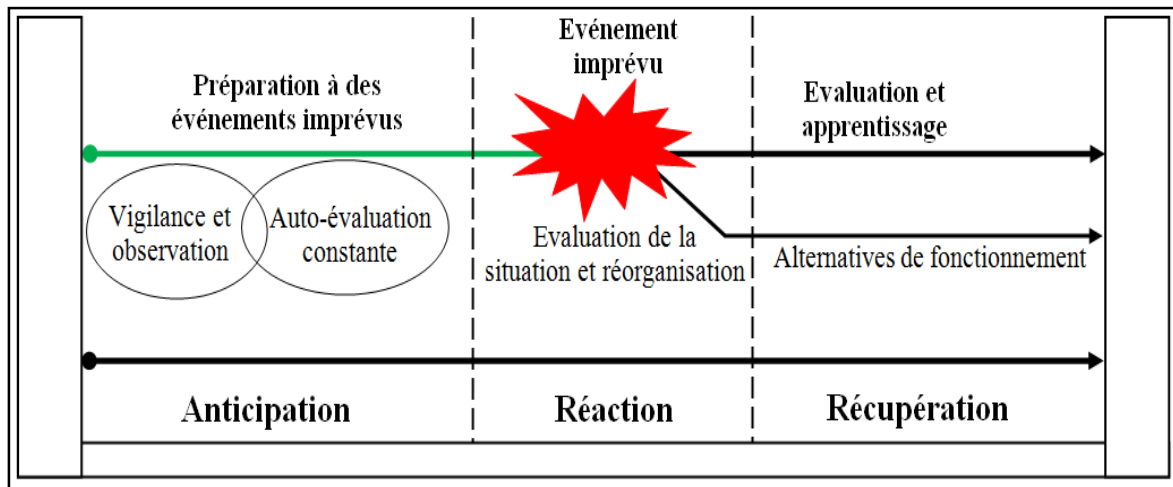


Figure I-5 : Organisation d'un système résilient.

- **Anticipation** : reposant sur la proactivité de système caractérisé par l'analyse constante de son état afin de se situer par rapport à un domaine de fonctionnement et de déterminer s'il est capable de réagir à une perturbation. Le système doit donc identifier et interpréter correctement les signaux précurseurs notamment les signaux faibles (symptômes, tendances suspectes, etc.) (Rigaud, 2011). La proactivité contribue alors à l'anticipation, voire à l'évitement, d'une perturbation ou d'un événement imprévu.

- **Réaction** : lors de l'occurrence d'un événement imprévu, le système et/ou l'organisation doit être capable de diagnostiquer et d'évaluer la situation courante, et de se réorganiser, ce qui traduit la réactivité du système.
- **Récupération** : certains événements imprévus ne peuvent cependant être évités et nécessitent alors une interaction entre les agents de l'organisation afin d'élaborer des alternatives de fonctionnement permettant de récupérer une situation de fonctionnement acceptable.

Les nombreux concepts qui ressortent des définitions de résilience organisationnelle sont la connaissance de l'environnement (interne et externe à l'organisation), le niveau de préparation, l'anticipation des perturbations, la capacité de déploiement des ressources, le degré et/ou la capacité d'adaptation et de rétablissement. On constate ainsi une forte similarité entre ces définitions.

#### 3.4. Méthodes d'évaluation de la résilience d'un système sociotechnique

Actuellement très peu de méthodes d'évaluation et d'amélioration de la résilience existent, sans doute en raison de la difficulté à mettre en œuvre cette mesure. En pratique, l'évaluation de la résilience des systèmes sociotechniques est toujours difficile en raison de sa composante sociétale. Ces méthodes se basent essentiellement sur des approches par scénarios intégrant des probabilités d'occurrence des événements. Les méthodes présentes dans la littérature à ce sujet ressemblent donc beaucoup aux méthodes traditionnelles de gestion des risques. Par exemple, pour Madni and Jackson, (2009), les méthodes à privilégier pour évaluer et améliorer la résilience d'une organisation sont :

- l'évaluation traditionnelle des risques à partir de matrices du type probabilité d'occurrence/impact,
- l'analyse des coûts/bénéfices pour la prise de décision,
- la gestion proactive des risques à partir de systèmes d'alertes précoces.

Cimellaro et al., (2006) ont proposé une procédure en se basant sur les travaux de (Bruneau et al., 2003) et la notion de triangle de la résilience, les auteurs ont appliqué leur procédure sur un hôpital en Californie, en tenant compte des pertes directes et indirectes du système physique et de la population desservie par le système, en cas de séisme (Cimellaro et al., 2008). Dans ce travail, il est stipulé que le chemin de la récupération, après un événement extrême, dépend des ressources disponibles et peut prendre différentes formes pouvant être estimées par des fonctions de récupération adéquates et que la résilience doit se référer à la fois aux pertes directes et indirectes.

Plus récemment, Cimellaro et al., (2010) ont présenté un modèle global pour la quantification de la résilience des systèmes face aux catastrophes. La résilience est définie, dans ce cas, comme la capacité de maintenir la fonctionnalité et de récupérer des pertes générées par des événements extrêmes. Le modèle proposé combine l'estimation des pertes et les processus de récupération. Il peut être appliqué aux infrastructures critiques (hôpitaux,

bâtiments militaires, systèmes d'énergie électrique, réseaux de transport, etc.) qui sont essentielles pour les processus de réponse, de prise de décision et de politique de récupération. Le cadre de résilience proposé dans ces travaux peut être utilisé comme un outil d'aide à la décision pour augmenter la résilience des systèmes, tels que les établissements de soins et de santé, et réduire leur vulnérabilité aux catastrophes et leurs conséquences.

Zobel, (2011) a proposé une nouvelle approche en se basant sur le triangle de la résilience (Bruneau et al., 2003), qui est un outil simple mais efficace pour illustrer la relation entre l'impact initial d'une catastrophe et le temps mis pour la récupération. Cet outil peut également être étendu pour fournir une mesure analytique du niveau de résilience d'un système donné, en présence d'une perturbation donnée. Cette approche consiste à analyser et comparer différentes combinaisons des mesures prévues de pertes initiales et du temps de récupération, par rapport à la résilience globale prédite qu'ils représentent.

Plusieurs approches de quantification de la résilience sont définies par des paramètres caractérisant la résilience des systèmes en situation de crises (Devanandham and Ramired-Marquez, 2012). Nous en présentons deux exemples :

- **Approche PR<sup>2</sup>** : cette approche, comme l'illustre la figure I-6, comporte trois composantes :
  - **Préparation (Preparedness)** avant la perturbation : cette composante comprend toutes les stratégies et les opérations visant à améliorer l'efficacité des interventions d'urgence en cas de perturbation majeure, avant qu'elle ne survienne ;
  - **Réponse (Response)** durant la perturbation : cette composante combine les stratégies, les mesures et les ressources mises en œuvre pour contrer les effets immédiats de la perturbation ;
  - **Récupération (Recovery)** après la perturbation : cette dernière composante intervient après la perturbation. Elle se compose de toutes les activités mises en œuvre pendant le processus de reconstruction. Ces processus concernent la restauration et la réhabilitation de la communauté et ses secteurs vitaux, après une perturbation majeure.

Plusieurs études dans le domaine de la résilience se sont concentrées sur ces trois composantes. Plusieurs auteurs ont proposé un modèle économique de la résilience en se basant sur ces composantes (Harrald, 2007; Jongejan et al., 2011; Mallak, 2007).

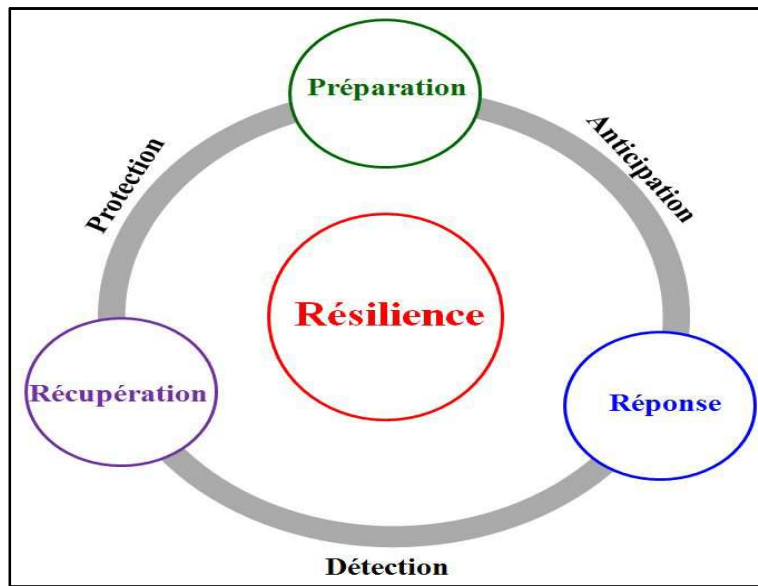


Figure I-6 : Approche PR<sup>2</sup> (Préparation, Réponse et Récupération).

- **Approche R<sup>4</sup>** : cette approche a été introduite par Bruneau et al., (2003) afin de renforcer la résilience des systèmes. Elle consiste à réduire les probabilités de perturbation et leurs conséquences ainsi que le temps de récupération du système. Tierney and Bruneau, (2007) ont traité des composantes de cette approche représentées figure I-7.

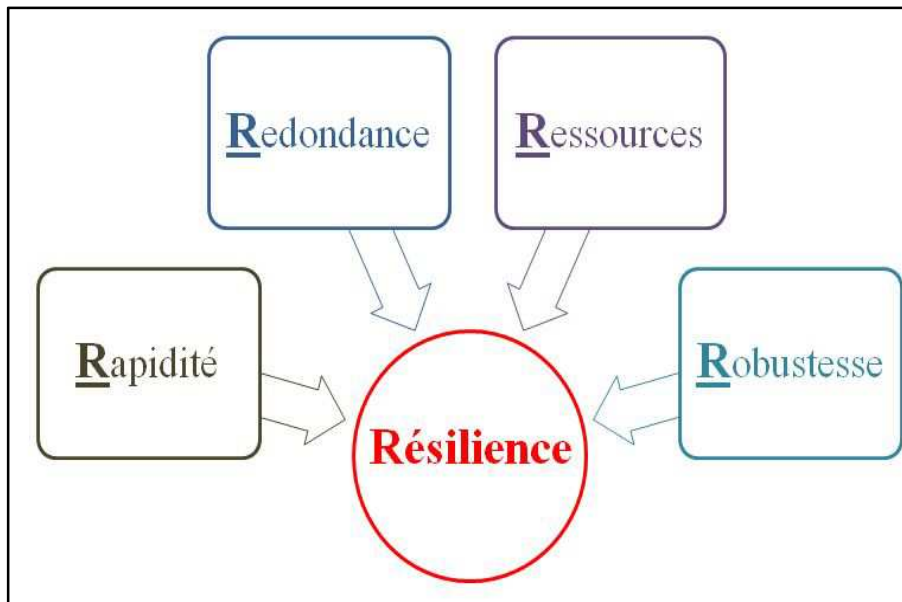


Figure I-7 : Approche R<sup>4</sup> (Robustesse, Réactivité, Redondance, Rapidité).

Les composantes de l'approche R<sup>4</sup> sont définies comme suit :

1. *Robustesse* : cette composante a été largement traitée dans la littérature (Pavard et al., 2006). Elle est définie comme la capacité intrinsèque du système, des composants du système et d'autres unités d'analyse à résister aux perturbations, dans le but de minimiser significativement la perte de fonctionnalité du système,
2. *Réactivité* : c'est la capacité d'analyser et de comprendre les perturbations et la gravité de leurs conséquences, afin de remédier à la situation en utilisant des ressources matérielles et humaines, des fonds, des informations et la technologie. D'après Cimellaro et al., (2006), la réactivité peut être mesurée en termes de ressources disponibles, dans le système au cours de la phase de récupération,
3. *Redondance* : elle consiste en la mesure dans laquelle la substitution d'un système ou des composants du système, permettra la continuité de la fonctionnalité après une perturbation majeure,
4. *Rapidité* : elle est définie comme la capacité du système à retrouver son état initial, après une perturbation majeure, en un délai et à des coûts acceptables.

Nous avons présenté dans cette première partie la notion de la résilience, ses interprétations dans différents domaines (écologie, psychologie, économie, sciences de la matière, systèmes sociotechniques, ...) et les méthodes d'évaluation de la résilience.

Le service d'urgence est une composante importante du système hospitalier et constitue un type spécifique de système sociotechnique. Nous décrivons ci-dessous ses caractéristiques essentielles.

#### 4. Le service d'urgence : système sociotechnique

D'un point de vue systémique, un service d'urgence peut être qualifié comme un système sociotechnique dont la mission principale est de prodiguer les meilleurs soins aux patients. Il se distingue par deux aspects fondamentaux :

- 1) la complexité des processus de soins qui réside dans la diversité des gammes de soins, la difficulté de les formaliser et de les standardiser, dans la variabilité de la durée des activités de soins et dans la singularité du patient et son imprévisibilité face aux soins,
- 2) la complexité du processus de prise en charge caractérisé par différentes activités impliquant la dimension humaine (Boumane, 2007; Jebali, 2004).

Comme tous les systèmes sociotechniques, le service d'urgence est composé de deux sous-systèmes distincts :

- 1) Le sous-système technique correspondant aux moyens matériels assurant :
  - les examens médicaux, chirurgicaux et les examens complémentaires (tables télécommandées, salles, appareils de scopie, scanner,...),

- le transport des patients (chariots fauteuils, ...), le recueil, le stockage des données patients et la surveillance des étapes de prise en charge des patients (ordinateurs pour la saisie administrative et outils logiciels). La disponibilité et la fiabilité de ce sous-système assurent le bon fonctionnement du SU.
- 2) Le sous-système social représenté par le personnel, les procédures et les protocoles de soins :
- le personnel non médical (les conducteurs des moyens de transport des patients, les agents d'entretien et administratifs,...).
  - le personnel soignant (hôtesses d'accueil, aides-soignantes, infirmières, médecins urgentistes, chirurgiens, anesthésistes,...).
  - les procédures et protocoles de soins qui formalisent les activités des personnels, leurs modes d'intervention et les relations, entre eux et avec les patients.

#### **4.1. Le service d'urgence : caractéristiques**

La prise en charge des urgences constitue une discipline à part entière, répondant à une réalité médicale et à un besoin spécifique de Santé Publique. Le service d'urgence représente la mission principale des établissements actuels de santé et la prise en charge des malades est considérée comme l'une des grandes priorités de l'organisation du système de soins<sup>1</sup>. Selon Coriat et al., (2008), le service d'urgence est la principale porte d'entrée de l'hôpital et constitue donc un passage quasi-obligatoire pour les patients avant leur admission dans la plupart des services hospitaliers.

En France l'accès aux soins d'urgence est libre. Les services d'urgence français doivent prendre en charge médicalement tout patient se présentant, même s'il ne relève pas de l'urgence. Cette situation peut être expliquée par le fait que dans les services d'urgence on peut être soigné 24h/24h sans rendez-vous, ni de frais d'avance dans un endroit proche des plateaux techniques. Les patients arrivent soit de leur propre initiative, soit par un moyen de secours, soit par une prescription du médecin traitant. En France l'urgence médicale constitue une mission essentiellement publique qui effectue l'accueil et le traitement des patients tout en garantissant l'égalité du traitement, l'accessibilité, la permanence et la continuité des soins. Selon la SFMU<sup>2,3</sup>, l'urgence est une toute circonstance qui, par sa survenue ou sa découverte,

---

<sup>1</sup> Rapport : L'hospitalisation et l'organisation des soins en France - Enjeux et perspectives - Données statistiques. Direction de l'hospitalisation et de l'organisation des soins (DHOS). 2006.

<sup>2</sup>SFMU : Société Francophone de Médecine d'Urgence : Critères d'évaluation des services d'urgence, Mars, 2001.

<sup>3</sup>SFMU : Société française de médecine d'urgence : Les français et l'accès aux soins urgents non programmés. 2<sup>ème</sup> Congrès de la SFMU, Paris, 2008.



introduit ou laisse supposer un risque fonctionnel ou vital si une action médicale n'est pas entreprise immédiatement. La définition de l'urgence est compliquée, il existe parfois une ambiguïté dans la définition d'un SU et un écart significatif entre la définition médicale de l'urgence par un personnel urgentiste et la perception de l'urgence par le malade. On trouve dans la littérature plusieurs suggestions concernant la définition de l'urgence médicale (Gayraud, 2005; Reix, 2002).

Les flux entrants et les flux sortants du service d'urgence permettent de décrire le système de prise en charge des urgences comme un système complexe, au sein duquel les sous-systèmes le composant sont en interaction permanente. En outre, l'activité au sein d'un service d'urgence se caractérise par l'irrégularité de la quantité et de la nature du travail à effectuer (Kadri et al., 2014b, 2014c). Cette complexité est accentuée dans un contexte où les passages aux urgences ne cessent d'augmenter, entraînant des conséquences sur la gestion des flux des patients à l'intérieur du service d'urgence.

Nous présentons dans la figure I-8 le processus général de prise en charge des patients dans un service d'urgence.

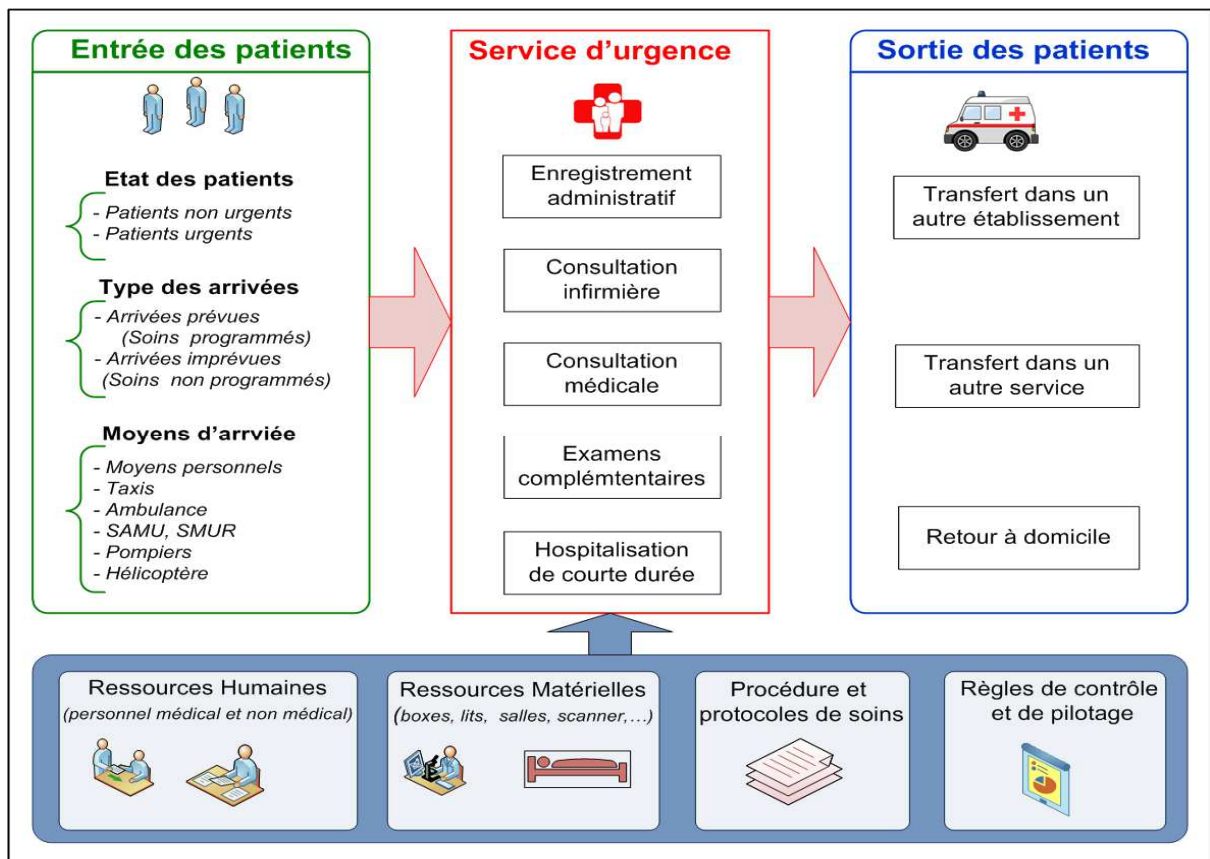


Figure I-8 : Processus général de prise en charge des patients dans un service d'urgence.

Ce processus est caractérisé par :

1. les éléments d'entrée qui vont déclencher le processus de prise en charge : patients admis au service d'urgence,
2. les éléments en sortie du processus de prise en charge : patients sortant ou redirigés vers d'autres services de l'hôpital ou dans d'autres établissements,
3. les ressources : ce sont les moyens humains et matériels nécessaires au processus pour fonctionner et assurer sa mission principale, L'incertitude générée par le caractère humain dans les services d'urgence a des effets sur la complexité du processus de soins, sur leur durée et leur qualité,
4. les procédures et les protocoles de soins ainsi que les règles de contrôle et de pilotage qui encadrent le fonctionnement du processus de prise en charge des patients.

#### **4.2. Recours aux services d'urgence**

Au cours des dernières décennies, en raison de la demande croissante en soins médicaux d'urgence, la gestion des services d'urgence est devenue de plus en plus importante et complexe (Wieser, 2005). Aux Etats-Unis, entre 1993 et 2003, les visites aux services d'urgence ont été augmentées de 26% tandis que le nombre des services d'urgence a été réduit de 9% (GAO, 2003; IMNA, 2006; Kellermann, 2006). En France, la population recourt de plus en plus fréquemment aux services d'urgence. A partir de la fin des années 1980, le nombre de passages dans les services d'urgence a augmenté très rapidement, leur croissance annuelle était de 5,8% en moyenne entre 1996 et 1999, et de 4,5% entre 1999 et 2002. Ainsi, selon la Direction de la Recherche, des Etudes, de l'Evaluation et des Statistiques, DREES<sup>4</sup>, une augmentation de 43% des passages entre 1990 et 1998 (Baubeau et al., 2000). Dans la même année (1998) on a enregistré 11 273 000 passages dont 10 331 000 dans le secteur public (Dautel et al., 2002). Entre 1999 et 2002 le nombre de passage a augmenté de 4,5%. Le nombre de passages dans ces services a doublé entre 1990 et 2004, et il est passé de 7 à 14 millions<sup>5</sup> (Cours des comptes, 2007).

Sur la période 2001- 2011, le nombre de passages annuels aux urgences est passé de 13,6 millions à 18,5 millions<sup>6</sup>, soit une augmentation de 36 %.

---

<sup>4</sup>DREES. Les passages aux urgences de 1990 à 1998 : une demande croissante de soins non programmés. Etudes et Résultats N°72, juillet 2000.

<sup>5</sup>Cours des comptes, Les urgences médicales : constats et évolution récente, Février 2007, pp 314-347.

<sup>6</sup>Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques (DREES) : Les urgences hospitalières, qu'en sait-on ?, Le panorama des établissements de santé - édition 2013.

Les études de la DREES disponibles sur les comportements des patients et les motifs de leur recours aux services d'urgence montrent que ces services sont désormais considérés par les deux tiers des Français comme un lieu où ils peuvent se faire soigner 24h/24 par des professionnels qualifiés, en toute sécurité, et bénéficier rapidement de tous les moyens modernes d'investigation. Ainsi, la DREES souligne que les motivations les plus courantes exprimées par les patients tiennent à la proximité de l'établissement (47%), à un besoin d'examen ou d'avis spécialisé (44%), à une exigence de rapidité (38%), à une perspective d'hospitalisation (32%) et à l'assurance de pouvoir disposer d'un plateau technique spécialisé<sup>7</sup>.

Selon Cash et al., (2013) une partie de la population ayant recours aux services d'urgence auraient pu consulter un médecin généraliste ou un pédiatre en cabinet libéral en ville, s'ils avaient pu obtenir un rendez-vous rapidement (dans la journée ou le lendemain).

La nature même des services d'urgence et leur complexité ont des conséquences sur la gestion des flux des patients au sein du service d'urgence entraînant l'occurrence de perturbations que nous présentons dans le paragraphe suivant.

#### 4.3. Services d'urgence: les problématiques

De nombreux rapports et études dressent un tableau de l'état des hôpitaux et du système hospitalier et de santé en crise morale, démographique et financière, notamment (Molinie, 2005, Marcon et al., 2008; Lin, 2009). Cette situation résulte de l'accumulation de nouvelles contraintes, conjuguées à une forte rigidité des structures. Ainsi, les systèmes hospitaliers et les filières d'urgences rencontrent de plus en plus de difficultés pour assurer leurs missions. L'amélioration de la qualité des soins prodigués aux patients est conditionnée par des impératifs de maîtrise des dépenses de santé, de gestion des risques et de la qualité. Cela s'est traduit, depuis plusieurs années, par différentes actions à caractère stratégique et opérationnel dans le secteur des soins de santé. Un levier important de réussite de cette évolution concerne l'optimisation de l'organisation.

Cependant, malgré les efforts conjugués depuis la mise en place du Plan Hôpital 2007<sup>8</sup>, le nombre de passages aux urgences a continué d'augmenter, les structures d'urgences souffrent de plusieurs contraintes structurelles, humaines, matérielles, financières et organisationnelles (l'organisation interne des urgences, amont et aval des urgences).

Les problèmes auxquels les services d'urgence doivent faire face à l'heure actuelle sont très divers (figure I-9) :

1. *Les pics d'activité* : l'activité médicale d'urgence est très difficile à planifier du fait même de sa nature. Une des caractéristiques de l'activité au service d'urgence réside dans le fait qu'elle présente très souvent des pics d'activité de deux types :

---

<sup>7</sup> Les usagers des urgences : Premiers résultats d'une enquête nationale, Etudes et Résultats N° 212, 2014

<sup>8</sup> Circulaire DHOS/O1/2007/65 du 13 février 2007 relative à la prise en charge des urgences

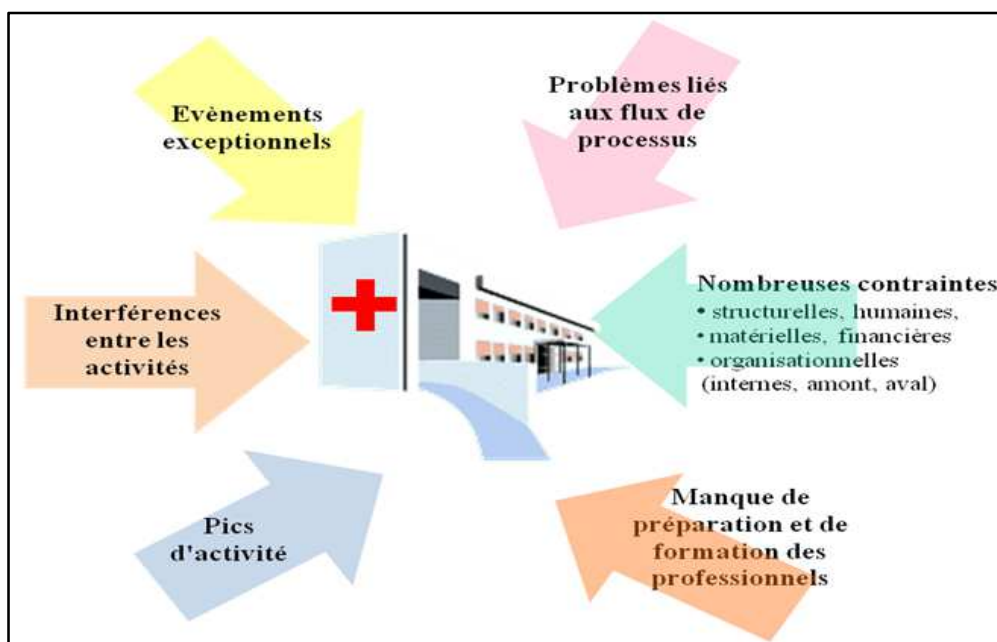


Figure I-9 : Problématiques dans les services d'urgence.

- *Les pics d'activité intrinsèques au service* : ils dépendent des modifications de l'état clinique des patients. L'instabilité de l'état physiologique de ces derniers impose souvent une adaptation dynamique de l'organisation des soins. Au fur et à mesure du déroulement de la journée, certaines tâches prévues deviennent inutiles, d'autres extrêmement urgentes, d'autres enfin s'ajoutent à celles déjà prévues. L'instabilité de l'état physiologique des patients qui caractérise précisément les services d'urgence et de réanimation explique une partie de l'imprévisibilité de l'activité,
  - *Les pics d'activité extrinsèques* correspondent à l'admission de nouveaux patients dans ces services. Par définition, les admissions dans les services d'urgence ne sont pas programmées et par conséquent, le flux des malades est irrégulier. Cette irrégularité rend la planification a priori difficile et pose des problèmes d'organisation aux responsables de ces unités.
2. *Les interférences entre les activités hospitalières* : l'une des problématiques majeures à laquelle sont confrontées les urgences hospitalières de manière chronique et pour laquelle aucune réponse satisfaisante n'existe à l'heure actuelle, résulte des interférences permanentes entre l'activité programmée et l'activité non programmée. En particulier l'activité non programmée urgente, communément désignée sous le vocable d'urgence. Le terme d'urgence, recouvre deux phénomènes distincts :
- des flux récurrents, pouvant présenter des variations saisonnières mais dont on connaît les tendances moyennes à court (heure, journée), moyen (semaine, mois)

ou long terme (trimestre, année). La mise en place d'une structure, d'une organisation et d'un pilotage à court terme est un enjeu majeur d'efficacité du système de production de soins, même dans le cas où les flux sont connus,

- des flux consécutifs à des crises sanitaires, imprévus en volume et en nature.
3. *Les événements exceptionnels* : menaces sanitaires liées à des épidémies, canicules, vagues de froid, ... pour lesquels les services d'urgence doivent être en mesure de recevoir des flux parfois très importants de patients pour des traitements médicaux et/ou chirurgicaux.
  4. *Les problèmes liés aux flux des processus* : dans la gestion des services d'urgence, la maîtrise des flux (i.e., patients, informations, produits, équipements) sont des enjeux majeurs. La prise de conscience de cet enjeu est de plus en plus forte. Ainsi, les problèmes observés à l'heure actuelle dans les SU sont dus en grande partie à la difficulté à gérer ces flux.

La prise en charge des flux des patients, dans un service d'urgence est l'un des problèmes les plus importants à gérer. Elle comporte deux tâches permanentes, parallèles et interdépendantes :

- la gestion des processus de prise en charge de chaque patient,
- la gestion du flux de patients à l'échelle du service d'urgence (entrées / sorties).

Pour gérer et faire face à cet afflux de patients, les services d'urgence nécessitent des ressources humaines et matérielles importantes, ainsi qu'un degré élevé de coordination entre ces ressources (humaines et matérielles) (Wieser, 2005). Mais ces ressources sont souvent insuffisantes ou mal allouées pour permettre une gestion sereine de cet afflux de patients (Kadri et al., 2014c; Yeh and Lin, 2007). Dans ces conditions, le personnel médical se voit très fréquemment confronté à des situations de tension.

Ces situations de tension affectent :

- a. *les patients* : problèmes de l'engorgement des salles d'urgence (Boyle et al., 2012), très longues périodes d'attente (les patients quittent le service d'urgence sans être examinés par un médecin), la violence des patients contre le personnel médical, la réduction de l'accès aux services d'urgence médicale et l'augmentation de la mortalité des patients (Sprivulis et al., 2006),
- b. *la qualité du traitement et le pronostic du personnel médical* : ceux-ci sont souvent surchargés ce qui conduit à une diminution de la satisfaction des médecins (Rondeau and Francescutti, 2005).

Par conséquent, les gestionnaires des services d'urgence doivent anticiper et contrôler les problèmes liés à ces situations de tension en les détectant le plutôt possible et de les gérer efficacement en proposant des actions de correction adaptées à chaque perturbation.

- c. *La présence de nombreuses contraintes* : les services d'urgence souffrent de plusieurs contraintes et en particulier les contraintes organisationnelles qui se traduisent par des problèmes d'organisation interne, amont et aval des services

d'urgence pour accueillir et gérer le flux des patients. Face à ces difficultés, la structure d'urgence n'est pas en mesure de garantir l'efficacité de la prise en charge des patients et/ou des victimes en particulièrement dans des situations de crises.

- d. *Le manque de préparation et de formation* : le personnel médical n'est ni formé ni préparé pour résoudre les problèmes liés à l'organisation et à la gestion des flux de patients et d'informations. D'autre part, il est démuné en méthodologies et outils d'aide à la décision et de pilotage adaptés pour anticiper et gérer les situations de tension.

#### 4.4. **Actions d'amélioration pour faire face aux situations de tension dans les services d'urgence**

La plupart des études dont les services d'urgence ont fait l'objet abordent plusieurs aspects (Kadri et al., 2014b) :

- a. *Améliorer la qualité et la performance des soins dans les services d'urgence*

Yeh and Lin, (2007) ont proposé une méthodologie qui combine la simulation et un algorithme génétique pour améliorer la qualité des soins. Le modèle de simulation est utilisé pour représenter le flux de patients aux urgences et l'algorithme génétique est ensuite appliqué pour trouver un ordonnancement optimal des ressources médicales pour minimiser les temps d'attente des patients. Zeng et al., (2012) ont présenté une méthode de simulation pour améliorer la qualité des soins au service d'urgence de l'hôpital de Lexington, Kentucky. Le modèle de simulation permet d'évaluer la qualité des soins d'urgences en termes de durée de séjour, de temps d'attente et de nombre de fugues des patients. D'autre part, efficacité et efficacité sont souvent utilisées comme indicateurs de la qualité d'un service d'urgence Doyle et al., (2012).

Litvak et al., (2008) ont étudié l'effet de la variation de la capacité des soins intensifs sur la qualité de soins aux patients afin d'améliorer l'utilisation des capacités dans les unités de soins intensifs. Les auteurs ont proposé une méthode mathématique pour calculer le nombre de lits pour un taux de patients admis en soins intensifs. Gonzalez et al., (1997) ont examiné comment améliorer la qualité du service dans les urgences hospitalières en appliquant les concepts de la qualité totale (Total Quality Management, TQM).

Al-Refaie et al., (2014) ont présenté une étude basée sur la simulation et l'analyse d'enveloppement des données qui vise à améliorer les performances du service d'urgence en Jordanie; l'objectif est de réduire le temps d'attente moyen des patients et l'amélioration de l'utilisation des infirmières. Les résultats ont montré que le meilleur scénario dépend du partage de la charge de travail, qui se traduit par la réduction des temps d'attente moyen des patients. Les auteurs ont constaté que la flexibilité des infirmières dans les urgences hospitalières peut fournir une grande aide pour les gestionnaires lors de l'amélioration des performances des services d'urgence.

Aboueljinane et al., (2014) ont proposé un modèle de simulation à événements discrets pour améliorer la performance du service d'aide médicale urgente (SAMU) des urgences hospitalières du département du Val-de-Marne (France). Le modèle proposé teste les stratégies relatives aux ressources utilisées ainsi qu'à la position des équipes de secours. Les auteurs ont utilisé deux mesures de performance : i) la couverture, définie comme le pourcentage d'appels pour lesquels le temps de réponse (délai entre la notification des incidents et l'arrivée d'une équipe de secours sur les lieux de l'accident est acceptable et ii) le taux d'utilisation des ressources humaines. Les auteurs ont recommandé de mettre l'accent sur la répartition optimale et la délocalisation des équipes du SAMU, ce qui améliorerait considérablement la couverture pour une augmentation minimale des coûts et l'augmentation des ressources pour faire face à une demande accrue.

Beaulieu et al., (2000) ont utilisé une approche basée sur la programmation mathématique pour planifier les tâches du personnel médical. Oddoye et al., (2009) ont présenté une méthode basée sur la simulation et l'analyse multi-objectif afin d'améliorer la planification des soins de santé dans un service d'urgence. Les résultats indiquent que la simulation est un outil efficace dans la recherche de solutions concernant les niveaux de ressources permettant de diminuer le temps de passage.

*b. Réduire le temps d'attente et le temps de séjour des patients aux urgences hospitalières*

Samaha et al., (2003) ont proposé un modèle pour décrire et gérer les opérations d'un service d'urgence, et évaluer toutes les alternatives possibles pour réduire la durée de séjour. Ruohonen et al., (2006) ont proposé un modèle de simulation qui décrit les opérations de soins de santé aux urgences de l'hôpital Central de Jyväskylä (Finlande). L'objectif de ce modèle est de tester l'impact d'une nouvelle approche de triage sur les temps d'attente des patients et en particulier des temps de passage des patients. Duguay and Chetouane, (2007) ont présenté le modèle de service d'urgence de Moncton (Canada) basé sur simulation à événements discrets. L'objectif de l'étude est de réduire les temps d'attente des patients et d'améliorer les prestations et le rendement du service d'urgence. Avec un même objectif, Laskowski et al., (2009) ont présenté deux méthodes de modélisation (modèle multi-agent et modèle basé sur la théorie des files d'attente) appliquées à l'étude de flux de patients dans les services d'urgence.

Huang et al., (2014) ont présenté une approche de prévision du temps de séjour des patients aux urgences hospitalières en utilisant la méthode de mesure de similarité temporelle. L'approche proposée a été utilisée comme un outil d'analyse de processus de prise en charge des patients à l'hôpital de Zhejiang Huzhou (Chine) afin d'analyser l'impact du temps de séjour des patients sur le processus de traitement concernant les taux d'infection, les taux de mortalité, l'utilisation d'antibiotiques, les coûts. Khare et al., (2009) ont proposé un modèle de simulation qui permet d'évaluer les compromis entre les différentes alternatives telles que l'ajout de lits ou la modification des taux d'admission. Les auteurs ont considéré le temps de séjour des patients comme un des indicateurs de performance les plus crédibles.

*c. Etude de la gestion des ressources dans les services d'urgence*

Dowland, (1998) a appliqué la méthode de recherche Tabou et la stratégie d'oscillation pour résoudre le problème des emplois du temps des infirmières aux urgences. L'objectif est de s'assurer que suffisamment d'infirmières sont en service en permanence en tenant compte des préférences et des demandes individuelles pour les jours de congé. Rossetti et al., (1999) ont développé un modèle de simulation pour les urgences du Centre médical de Virginie (États-Unis). L'objectif de ce modèle de simulation est de tester l'impact du planning du personnel sur le nombre et le temps de passage. Thorwarth et al., (2009) ont utilisé la simulation à événements discrets pour étudier l'impact de la planification du personnel médical sur l'épuisement et l'utilisation globale des ressources liés à la sur-occupation des patients et l'utilisation des ressources.

Komashie and Mousavi, (2005) ont construit un modèle de simulation à événements discrets pour modéliser les opérations dans un service d'urgence de Londres (Royaume-Uni) afin de déterminer l'impact des ressources sur les performances du service d'urgence. Brenner et al., (2010) ont utilisé la simulation pour mener une étude pour analyser les effets de la configuration et de l'utilisation des ressources d'un service d'urgence de l'hôpital Kentucky Chandler (USA). Les auteurs ont évalué les relations entre la configuration des niveaux de dotation en personnel et les ressources nécessaires, ainsi que les avantages potentiels des politiques opérationnelles.

Marcon et al., (2008) ont présenté une méthode d'affectation des infirmiers/infirmières diplômés d'Etat d'un service d'urgence permettant d'adapter les ressources prévisionnelles du SU aux variations des flux patients en tenant compte des différentes contraintes régissant le fonctionnement de cette structure. Le but est de garantir une prise en charge optimale du patient.

*d. Aide à la décision pour les gestionnaires dans la gestion des activités hospitalières et la prise de décision.*

Amaral and Costa, (2014) ont appliqué la version II de la méthode PROMETHEE développée par Brans et Vincke, (1985) pour appuyer la prise de décisions et la gestion des ressources dans les services d'urgence. Selon les auteurs, la méthode PROMETHEE II est adaptée pour la gestion de l'allocation des ressources ainsi que pour l'ajustement de la capacité de production de l'hôpital afin de répondre à la demande. Cabrera et al., (2011) ont proposé un modèle d'optimisation/simulation pour proposer des stratégies de gestion des services d'urgence. Cabrera et al., (2012) ont proposé un outil pour aider les gestionnaires des urgences hospitalières à mettre en place des stratégies et lignes directrices de gestion pour optimiser et améliorer le fonctionnement des services d'urgence. Ahmed and Alkhamis, (2009) ont proposé un système d'aide à la décision basé sur la simulation et l'optimisation pour la gestion intégrée d'un service d'urgence à l'hôpital gouvernemental du Koweït.

On constate, à la lecture de ces différents travaux concernant les services d'urgence en cas de situation de tension, des lacunes concernant notamment :



- la définition et la modélisation des situations de tension,
- les stratégies d'évitement et de gestion des tensions,
- la prise en compte de la notion de résilience en cas de situations de tension et de situations d'exceptions.

Pour faire face à ces situations, les services d'urgence doivent présenter un niveau de résilience compatible avec leurs missions de prise en charge des patients. Nous présentons ci-dessous les études menées sur ce thème.

## **5. Résilience d'un service d'urgence**

Mallak, (1998) a introduit des facteurs visant à identifier les dimensions des organisations résilientes et les comportements des individus résilients. Il définit la résilience comme un comportement adaptatif positif et rapide pour supporter un minimum de stress.

Anders et al., (2006) ont analysé un service d'urgence selon les concepts de la résilience afin de tester et affiner les propriétés de la résilience, la résilience a été explorée en utilisant des questionnaires et des observations sur le terrain.

Nemeth et al., (2008) ont analysé la résilience de deux systèmes de soins. Dans le premier cas, ils montrent comment le personnel médical peut créer la résilience à travers les stratégies qu'il emploie en réponse aux changements dans la demande de soins. Dans le second, ils décrivent un concept d'une interface d'un dispositif de perfusion et démontrent comment la conception des équipements peut améliorer la résilience.

Perry et al., (2008) ont présenté un cas d'étude sur la capacité d'adaptation du personnel médical à minimiser les effets de surpeuplement/surcharge dans les services d'urgence. La résilience dans ce cadre dépend de la capacité du personnel à s'adapter et à évoluer en fonction du flux de charge.

Cimellaro et al., (2008) ont tenté de proposer un modèle organisationnel décrivant la réponse des établissements hospitaliers à un événement sismique en se basant sur les principaux paramètres de la résilience sismique

Hunte, (2010) définit la résilience comme une stratégie visant à promouvoir la sécurité des patients dans les soins d'urgence en mettant l'accent sur la capacité d'adaptation et de prévoyance du personnel médical. Il a décrit comment les fournisseurs de soins de santé créent la résilience et la sécurité tout en faisant face à la complexité dans la pratique quotidienne de la médecine d'urgence.

On peut cependant constater que dans l'ensemble des travaux cités précédemment, peu d'études concrètes ont été menées pour définir et quantifier la résilience d'un service d'urgence.

## **6. Conclusion**

Nous avons tout d'abord présenté les systèmes sociotechniques et leurs caractéristiques. Nous avons ensuite précisé la notion de perturbations puis précisé les différentes facettes liées à la résilience des systèmes sociotechniques. Nous avons ensuite décrit les caractéristiques des services d'urgence et les problématiques auxquelles les personnels d'un service d'urgence doivent faire face.

Une revue de littérature a également montré que les situations de tension et la résilience des services d'urgence ont très peu fait l'objet d'études spécifiques en termes de définition et de modélisation.

Le chapitre 2 a pour objectif de proposer une définition d'une situation de tension, des indicateurs de tension associés et de proposer une définition et une démarche d'évaluation de la résilience d'un service d'urgence.

## Chapitre II : Situations de tension d'un service d'urgence

### 1. Introduction

Les services d'urgence sont des systèmes sociotechniques dynamiques qui, par nature, sont soumis à des perturbations qui entraînent l'apparition de situations de tension. Pour les maîtriser et assurer le fonctionnement satisfaisant du service, il est nécessaire de détecter l'occurrence de ces situations et de pouvoir réagir le plus en amont possible.

Ce chapitre a pour objectif de proposer, dans une première partie, une définition d'une situation de tension et ses caractéristiques essentielles. Dans une deuxième partie, nous donnons un ensemble d'indicateurs de tension destinés à permettre le pilotage proactif et réactif du SU en précisant la nature et les types d'actions correctives qui peuvent être appliquées pour prévenir ou réduire l'impact dû à une situation de tension. Dans la dernière partie, nous proposons une définition de la résilience d'un SU en considérant la notion de performance du service d'urgence, puis nous proposons une méthodologie de mesure de cette résilience s'appuyant sur la simulation.

### 2. Situations de tension : définition

#### 2.1. Les dimensions de la tension

La notion de tension peut être considérée selon plusieurs points de vue dépendant de notre rôle dans le processus de prise en charge (client (patient) ou personnel de soins ou manager) : la médecine, la psychologie et la gestion de crise.

##### 2.1.1. Domaine médical

Dans le domaine médical, l'approche de la notion de tension est plutôt opérationnelle. Elle est définie à travers l'existence d'indicateurs de tension résultant des travaux menés par le ORU PACA<sup>9</sup> (Observatoire Régional des Urgences - Région PACA) dans le cadre du dispositif "Hôpitaux en tension". Des travaux similaires dans d'autres régions (e.g. ARS des Pays de la Loire ; CHU de Nantes ; CHU Grenoble) ont également été menés. Cependant, il n'existe aucun consensus national sur la pertinence des indicateurs retenus, ni sur les seuils de déclenchement.

---

<sup>9</sup> <http://www.orupaca.fr/donnees-urgences/statistiques-urgences-119.html>

### 2.1.2. Psychologie ergonomique

Elle exprime la notion de débordement à l'échelle de l'opérateur. Elle traduit l'impossibilité pour un opérateur d'élaborer une solution satisfaisante pour faire face aux événements. Quelle que soit la manière de s'y prendre, il est pris en défaut. Alors il tranche en faveur du défaut qui lui paraît le plus acceptable et le moins pénalisant (Benchekroun et al., 2002)

### 2.1.3. Gestion de crise

Les catastrophes et les crises créent des situations de tension présentant des degrés de gravité divers. Pour faire face à ces tensions, on tient de plus en plus compte dans les domaines de la protection contre les catastrophes et de la gestion des crises du concept de résilience (Kadri et al., 2014e; Trachsler, 2009).

## 2.2. Proposition de définition d'une situation de tension dans un SU

Le thème le plus documenté dans la littérature en lien avec une situation de tension est l'encombrement ou le surpeuplement des services de soins (traitements médicaux et chirurgicaux) ("*crowding*" ou "*overcrowding*", (Fee et al., 2011; Hoot and Aronsky, 2008). La signification du surpeuplement dans les systèmes hospitaliers varie non seulement d'un établissement à un autre (en fonction du contexte local et des informations disponibles) mais aussi d'un pays à un autre.

La majorité des études sur l'encombrement des services d'urgence proviennent des Etats-Unis. Depuis plusieurs décennies, il y a eu une augmentation importante des visites aux urgences tandis que les services d'urgence ont été réduits, ce qui conduit à des temps de séjour plus longs. (Kellermann, 2006). Pines et al., (2011) ont mené une étude approfondie sur le surpeuplement des urgences hospitalières dans 16 pays à travers le monde. Selon une enquête nationale menée par des directeurs de services d'urgence, le surpeuplement aux urgences est associé à des attentes excessives et longues des patients avant la consultation médicale (Lambe et al., 2003). Pour le collège américain des médecins urgentistes (ACEP, 2006), le surpeuplement se produit lorsque le besoin identifié pour les services d'urgence excède les ressources disponibles pour les soins aux patients.

Le problème du surpeuplement est aussi largement reconnu en Australie depuis 1998 (Magnus, 2008). La terminologie utilisée, en association avec le surpeuplement, est "l'accès bloqué" défini comme la proportion des patients au service d'urgence nécessitant une admission dont la durée totale au sein du service d'urgence est supérieure à 8 heures (Fatovich et al., 2005; Richardson and McMahon, 2009).

Au Canada, le surpeuplement est associé à l'accès aux soins d'urgence, le service d'urgence est prévu pour fournir un accès à une évaluation et un traitement appropriés dans

des délais spécifiés par l'échelle canadienne de triage et de gravité (CIHI, 2005). L'association canadienne des médecins urgentistes, CAEP<sup>10</sup> a défini la surpopulation comme une situation dans laquelle la demande de services de soins excède la capacité de soins dans un délai raisonnable, plaçant des médecins et des infirmières dans l'incapacité de fournir des soins de qualité. Selon l'Association Médicale de l'Ontario (AMO), Canada, la surpopulation existe lorsque le volume de patients recherchant des soins dépasse la capacité du service d'urgence à fournir des soins dans un laps de temps idéal (Drummond, 2002).

Bien que le surpeuplement des urgences soit bien documenté dans la littérature, on peut constater (Hoot and Aronsky, 2008; Hwang et al., 2011) :

- qu'il n'existe pas de définition standard et quantifiable du surpeuplement en raison de la nature multifactorielle du phénomène de surpeuplement,
- qu'il est difficile d'arriver à un accord entre les cliniciens sur la façon de quantifier ce phénomène en raison des ambiguïtés de certains termes,
- qu'au-delà de cette ambiguïté, les définitions proposées ne fournissent pas de signification ni d'évaluation quantitative du dépassement de la capacité de soins et/ou du délai raisonnable pour fournir des soins de qualité.

Pour tenter de répondre au besoin de quantification de l'encombrement des urgences hospitalières, quatre indicateurs ont été proposés (Bernstein et al., 2003; Hoot et al., 2007; Weiss et al., 2004) :

- l'indice de travail du service d'urgence, ITSU (Emergency Department Work Index : EDWIN). Cet indicateur est utilisé pour l'analyse de la charge du travail en temps réel dans les services d'urgence.
- L'indice de l'échelle nationale de l'encombrement des services d'urgence, IENESU (National Emergency Department Overcrowding Scale, NEDOCS). Cet indicateur est destiné à fournir une mesure objective du niveau de l'encombrement au service d'urgence.
- l'analyse de l'urgence en temps réel des indicateurs de demande, AUTRID (Demand Value of the Real-time Emergency Analysis of Demand Indicators, READI), utilisé pour l'évaluation en temps réel de l'encombrement dans un service d'urgence.
- le score du travail au service d'urgence, STSU (Work Score). Cet indicateur a pour objectif d'analyser en temps réel la charge de travail aux urgences.

Plusieurs études comparatives ont été menées afin d'évaluer l'utilité de ces indicateurs dans la modélisation et l'évaluation de l'encombrement dans les services d'urgence (Anneveld et al., 2013; Hoot et al., 2007; Weiss et al., 2006). Les résultats

---

<sup>10</sup>Canadian Association Emergency Physicians and National Emergency Nurses Association, "Joint Position Statement on emergency department overcrowding," Apr. 2001

indiquent que les formulations mathématiques (coefficients et indices) de ces indicateurs ne sont pas généralisables et ne peuvent pas être appliqués de la même manière pour tous les hôpitaux et/ou services d'urgence. Ces indicateurs sont largement insuffisants en termes de calibrage, d'évolutivité et ne sont que rarement utilisés dans les services d'urgence où la perception du phénomène de l'encombrement n'est pas la norme. Par conséquent, on trouve dans la littérature des indicateurs beaucoup plus simples qui peuvent renseigner sur l'évolution du comportement et de l'état d'un service d'urgence. Ces indicateurs, peuvent être associés et/ou combinés avec des modèles mathématiques et statistiques (séries chronologique, méthodes de détection et anticipation.) généralisables afin de prédire et/ou d'évaluer le comportement d'un SU en temps réel.

En France, le terme "tension" dans les services hospitaliers se traduit par *l'établissement de santé ou l'hôpital en tension*<sup>11,12,13</sup>. C'est un dispositif dont l'objectif est d'anticiper et de faire face à une situation d'urgence ou à un état critique de régulation des urgences hospitalières (Brémond et al., 2013; DHOS, 2006). Le cadre de l'Hôpital en Tension précise que chaque établissement de santé doit mettre en place une cellule de veille, qui analyse la situation dans le territoire de santé, les indicateurs de tension dans l'établissement et croise les informations avec les indicateurs d'activités disponibles sur les serveurs régionaux de veille et d'alerte. Si aucune définition de la situation de tension n'a réellement été posée concernant l'Hôpital en Tension, cette situation caractérise cependant le niveau intermédiaire avant recours au plan blanc dans les établissements de santé. Il s'agit en effet, d'une situation où, tout en faisant face à un état critique de régulation des urgences hospitalières, l'établissement ne déclenche pas le plan blanc, car ce dernier est normalement réservé à un événement exceptionnel conduisant à des conséquences sanitaires graves et dépassant les capacités immédiates de réponses adaptées.

Par conséquent à ce jour il n'existe pas de définition universelle de la tension dans les systèmes hospitaliers en particulier les services d'urgence. D'où la nécessité de proposer une définition de la situation de tension et les indicateurs associés.

### 3. Définition et caractérisation de la situation de tension dans un SU

Afin de cerner et de mieux comprendre la notion de situation de tension, les indicateurs de tension ainsi que les informations concernant le fonctionnement interne du service d'urgence, nous avons mis en œuvre une démarche représentée figure II-1 (Kadri et al., 2014).

---

<sup>11</sup> DHOS : L'établissement de santé en tension, éléments opérationnels de veille de l'activité quotidienne dans les établissements de santé et les seuils de déclenchement du Plan blanc.  
[http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/planblanc/hopital\\_tension.pdf](http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/planblanc/hopital_tension.pdf)

<sup>12</sup> Organisation d'un établissement en tension. Recommandation régionale du Réseau des Urgences Champagne Ardenne (Décembre 2013). [http://www.orupaca.fr/uploads/media/NEWSLETTER\\_N-8.pdf](http://www.orupaca.fr/uploads/media/NEWSLETTER_N-8.pdf)

<sup>13</sup> Hôpital en tension : dispositif de la région PACA. Proposition de l'Instance Collégiale Régionale du Réseau des Urgences.  
[http://www.orupaca.fr/documents/Documents/Hopital\\_en\\_tension-HD-Planche.pdf](http://www.orupaca.fr/documents/Documents/Hopital_en_tension-HD-Planche.pdf)

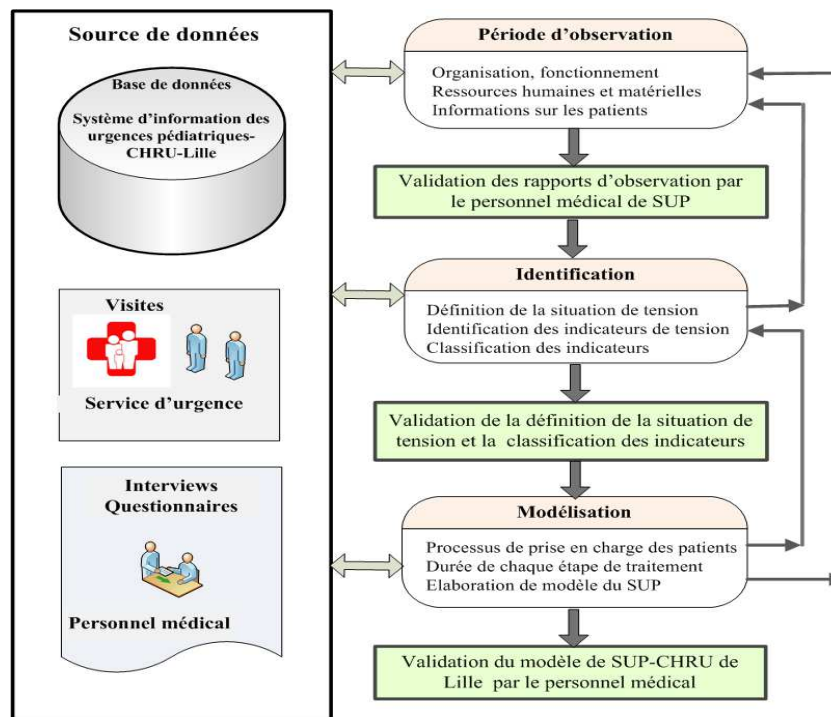


Figure II-1 : Démarche suivie pour l'identification et la modélisation des situations de tension dans un service d'urgence.

La démarche comporte trois phases :

- **Phase d'observation**

Des visites au service d'urgence pédiatrique (SUP du CHRU de Lille) ont été organisées pour rencontrer les professionnels de santé et acquérir les connaissances indispensables concernant le fonctionnement, les moyens et l'organisation interne du service d'urgence.

Trois questionnaires ont été soumis au personnel médical du service et des entretiens complémentaires ont eu lieu auprès du personnel médical (MU, IDE, IAO, AS...). L'objectif de ces questionnaires était de recueillir toutes les informations nécessaires sur les situations de tension (causes et conséquences), les indicateurs de ces tensions ainsi que le parcours des patients au sein du service d'urgence pédiatrique du CHRU de Lille (voir l'annexe F).

- **Phase d'identification**

La période d'observation a permis, de définir, dans la deuxième phase, la situation de tension, identifier et valider les indicateurs de tension avec le personnel médical et les ergonomes. Durant cette étape, le personnel médical et paramédical a été interrogé sur les caractéristiques des situations de tension (causes et conséquences) et sur les indicateurs permettant de quantifier ces situations. Deux types de questionnaires ont été utilisés :

- le premier questionnaire porte sur les situations de tension rencontrées par le personnel médical au cours de l'activité hospitalière, les mesures à prendre pour éviter et /ou limiter ces situations (actions en fonction du type de situation).

- le deuxième questionnaire concerne les indicateurs de tension. Nous avons proposé une série d'indicateurs de tension au personnel médical et paramédical afin de les classer en fonction de leur degré de pertinence.

- **Phase de modélisation de service d'urgence**

Lors de la troisième phase, le personnel médical a été sollicité (interviews et questionnaires) pour identifier les caractéristiques du processus de traitement dans le SU, tels que le type et la durée de chaque traitement, des examens complémentaires, le parcours du patient, l'orientation et la destination après la prise en charge au SU.

En utilisant les résultats de ces interviews et questionnaires ainsi que les données issues de la base de données du SU, la première version du modèle du SU a été établie et validée par le personnel médical.

### 3.1. Proposition de définition d'une situation de tension dans un SU

En analysant les résultats des questionnaires et des entretiens auprès de professionnels de la santé du SUP, on constate que les situations de tension dans les services d'urgence peuvent être décrites selon différents points de vue (point de vue patients, personnel médical, etc.) et caractérisées par différents facteurs (Kadri et al., 2014).

Une situation de tension dans un service d'urgence peut ainsi être définie comme un déséquilibre entre (Kadri et al., 2014c) :

- le flux de charge en soins : le nombre de patients entrant, le nombre de patients sortant, le nombre de fugues et le nombre de patients abandonnant les urgences sans être traités,
- la capacité de soins (moyens humains et matériels) : le nombre de médecins, d'infirmier(e)s, d'auxiliaires de soins, le nombre de box, de lits et le matériel médical.

Les principaux facteurs identifiés qui peuvent influencer cet équilibre sont :

- *les facteurs influençant le nombre d'entrées* : les épidémies saisonnières (en hiver : grippe, rhume, gastro-entérite, la bronchiolite, etc., en été : un traumatisme), les crises, les causes cumulatives comme le vieillissement de la population et de la disponibilité des médecins en amont et en aval (jours, nuit, journées fériées).
- *les facteurs influençant la rapidité de prise en charge* (et donc la capacité de production de soins) : par exemple, les compétences du personnel soignant, la performance du guichet administratif, la capacité de transfert interne et externe (disponibilités dans les services de soins en aval).

L'utilisation de la méthode d'Ishikawa permet de représenter de manière synthétique les différentes causes possibles d'un phénomène/problème (Ishikawa, 2007). Nous l'avons utilisée pour élaborer, d'une manière structurée, une représentation graphique des principales causes qui peuvent générer une situation de tension dans un service d'urgence ou l'une de ses



unités de prise en charge. La figure II-2 présente les causes principales d'une situation de tension qui peuvent avoir lieu dans un service d'urgence (Kadri et al., 2013a).

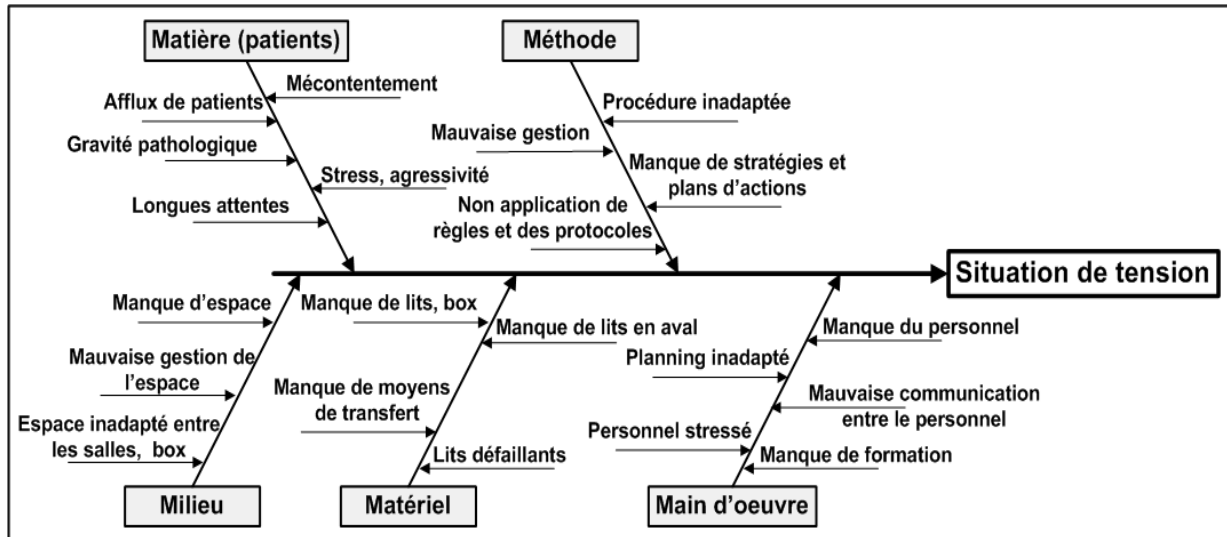


Figure II-2 : Causes principales d'une situation de tension dans un service d'urgence.

Une seconde approche possible consiste à identifier l'ensemble des combinaisons d'événements et des situations qui peuvent conduire à l'apparition d'une situation de tension en utilisant la méthode de l'arbre de défaillances représenté figure II-3.

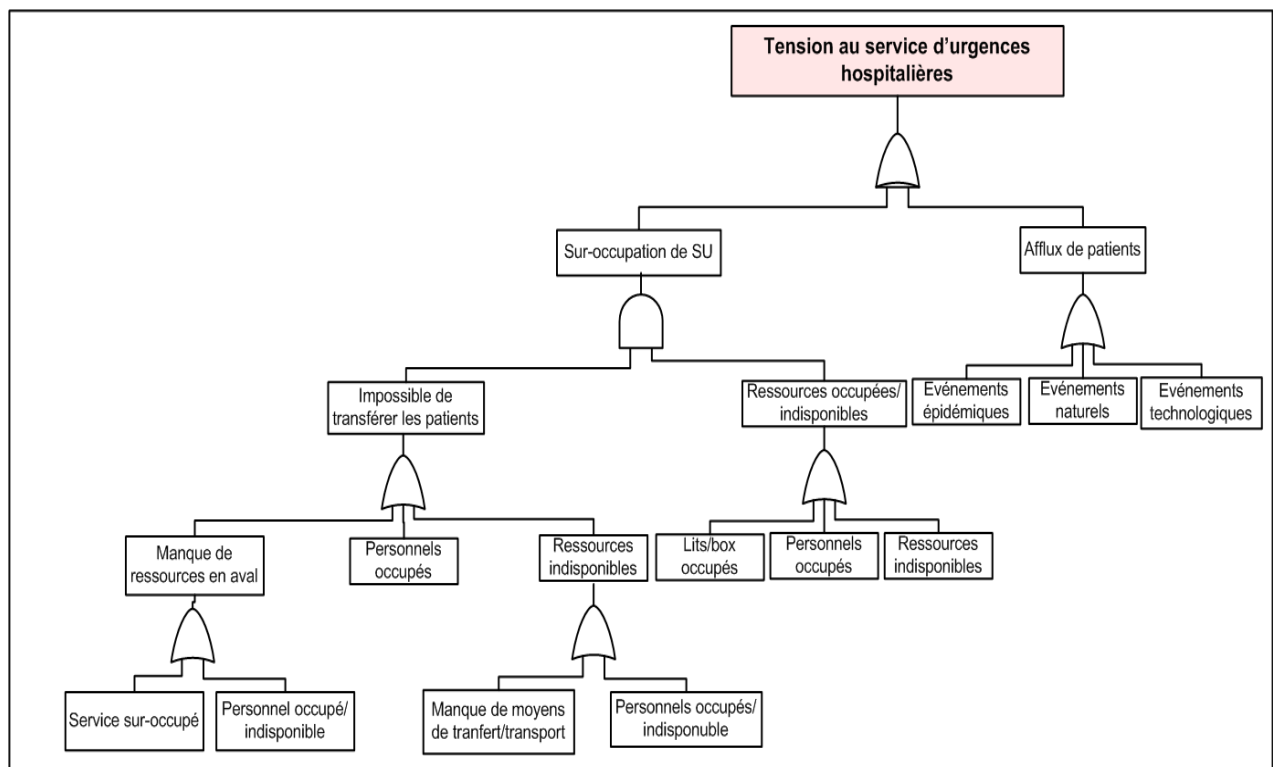


Figure II-3 : Les principales causes d'occurrence d'une situation de tension d'un SU.

### 3.2. États et modes de gestion d'un service d'urgence

La définition de la situation de tension proposée précédemment conduit à modéliser le mode de fonctionnement d'un service d'urgence (SU) en distinguant deux situations (normale, tension), et cinq états principaux (normal, dégradé mineur, dégradé modéré, dégradé sévère, critique) comme le montre la figure II-4 ci-dessous (Kadri et al., 2014).

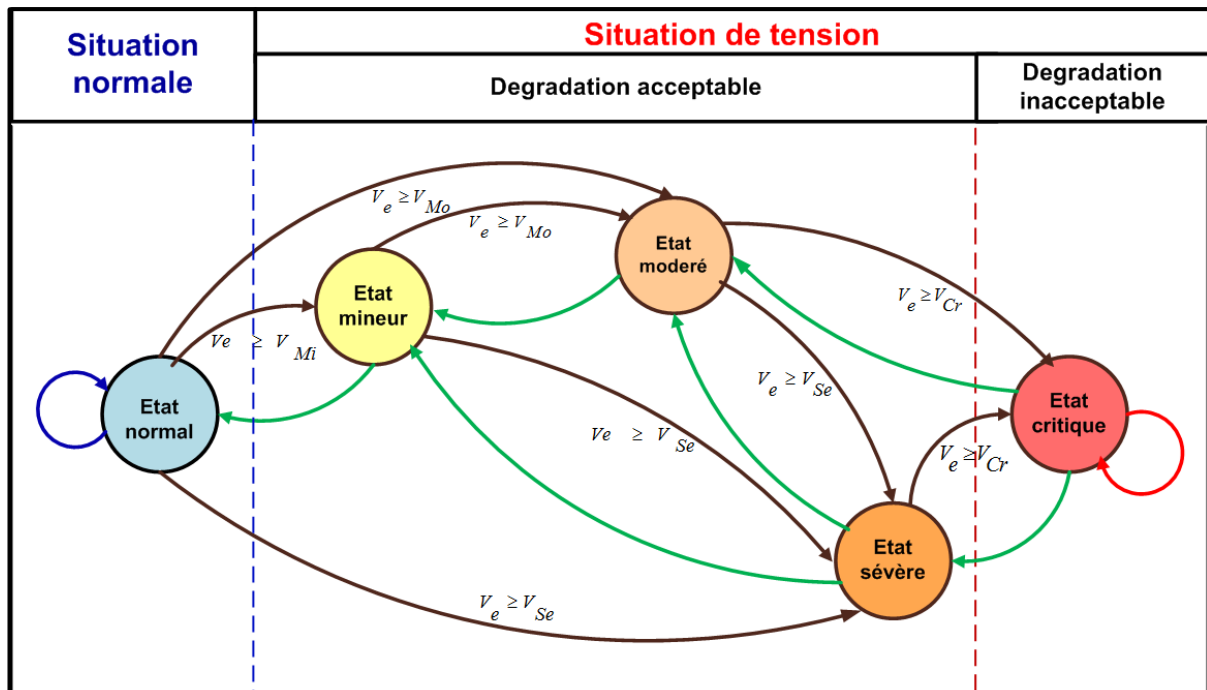


Figure II-4 : Situations, modes de gestion et de transitions entre états d'un service d'urgence.

Les transitions peuvent se produire de l'état normal à un ou plusieurs états dégradés (mineur, modéré et sévère) et de l'un des états dégradés à l'état critique. Dans la figure II-4,  $V_e$  est la valeur estimée du paramètre mesuré qui caractérise l'état du SU;  $V_{Mi}$ ,  $V_{Mo}$ ,  $V_{Se}$  et  $V_{Cr}$  sont les valeurs seuils qui correspondent à la transition d'un état à l'autre.

- **Etat normal** : la capacité de soins est supérieure ou égale au flux de charge en soins. Cet état correspond à la gestion courante, qui consiste à la mise en œuvre des actions planifiées pour gérer les perturbations habituelles et routinières.
- **Etats dégradés (mineur, modéré et sévère)** : si la capacité de soins est inférieure à la charge en soins, le service d'urgence passe de l'état normal à l'un des états dégradés.

Il faut alors mettre en place des actions de correction afin de permettre au SU de retrouver son état de fonctionnement normal.

- 1) *Etat dégradé mineur* : représente une dégradation mineure au niveau des performances du SU causée par une perturbation. Cela se traduit par le franchissement de premier seuil  $V_{Mi}$ , ( $V_e \geq V_{Mi}$ ).

- 2) *Etat dégradé modéré* : représente une dégradation modérée au niveau des performances du SU qui se traduit par le franchissement de deuxième seuil  $V_{Mo}$  ( $V_e \geq V_{Mo}$ ).
  - 3) *Etat dégradé sévère* : représente dégradation sévère ou grave au niveau des performances du SU. Ce dernier est défini par le franchissement du troisième seuil  $V_{Se}$ , ( $V_e \geq V_{Se}$ ).
- **Etat critique** : en état dégradé et en absence d'actions de corrections ou si les actions de corrections déployées ne sont pas efficaces face à persistance de la perturbation et/ou de ses effets (augmentation du flux de charge), le SU passe de l'état dégradé à l'état critique (dégradation inacceptable) en franchissant le seuil critique. Dans ce cas, le SU doit déployer des actions et des mesures d'urgence importantes pour tenter un retour à un état de fonctionnement acceptable dégradé ou normal.

L'identification, la modélisation des états d'un SU et l'évaluation des différentes valeurs seuils imposent de disposer des indicateurs de tension pertinents afin de mettre en œuvre les actions de corrections nécessaires.

### 3.3. Indicateurs de tension

#### 3.3.1. Indicateur

Un indicateur est défini comme une information sélectionnée, associée à un critère, destiné à observer l'évolution d'une situation à des intervalles bien définis (Luan, 2002). Un modèle générique d'indicateur de performance proposé par (Heini, 2007) est caractérisé par un triplet (Objectif, Variable d'état, Variable d'action) :

$$I = [O, V_E, V_A], \text{ où :}$$

- (O) *Objectif* : un indicateur doit correspondre à un objectif clairement défini pour permettre l'appréciation d'un événement par le gestionnaire de système.
- ( $V_E$ ) *Variables d'états* : les variables d'état doivent être choisies pour être facilement interprétées par le gestionnaire du système.
- ( $V_A$ ) *Variables d'actions* : un plan d'action(s) doit être associé à chaque indicateur lorsque  $V_E$  dépasse le seuil de fonctionnement limite défini pour la variable surveillée.

Les indicateurs de performance utilisés sont généralement orientés résultats et mettent l'accent sur la mesure des objectifs à atteindre. Mais dans la plupart du temps, leur incomplétude, ne leur permet pas de prendre en compte l'activité réelle d'un système sociotechnique (Jordan and Messner, 2012). Malgré cela, les indicateurs de performance ont tendance à s'imposer comme critères d'évaluation dans plusieurs systèmes et organisations.

Le choix de la pertinence et de la crédibilité de ces indicateurs est très important dans la modélisation et le suivi des situations de tension, en particulier, le choix des actions de correction pour chaque indicateur. Les indicateurs de tension et les valeurs des seuils peuvent

être obtenus en combinant les connaissances du personnel médical et le retour d'expériences sur des situations de tension déjà observées au sein du service d'urgence.

### 3.3.1. Indicateur de tension d'un service d'urgence

La table II-1 ci-dessous résume la liste (non exhaustive) des indicateurs de tension que nous avons identifiés dans la littérature. (Kadri et al., 2013b, 2012).

Table II-1 : Indicateurs de tension d'un service d'urgence

1. Le nombre d'arrivées des patients aux urgences par heure.	19. Le nombre de patients actuellement hospitalisés dans le secteur d'UHCD depuis plus de 24h, 12h, ...
2. Le nombre total de patients aux urgences.	20. Le nombre de transferts pour manque de place depuis 24h.
3. Le taux d'occupation service d'urgence par des patients hospitalisés.	21. La moyenne de présence aux urgences sur 24h.
4. Le temps de séjour aux urgences.	22. La durée moyenne d'attente aux urgences depuis 2h.
5. Le temps d'attente au guichet administratif.	23. Le passage depuis 6 h, et le passage/24h.
6. Le temps d'attente entre l'enregistrement au guichet administratif et la prise en charge par l'hôtesse.	24. Le nombre de patients selon leurs âges (ex : <1 ans, > 75 ans).
7. Le temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et l'intervention de l'IAO.	25. Le nombre de patients présents/médecin.
8. Le temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et le premier examen médical	26. Le nombre de patients présents / IDE (Infirmier Diplômé d'Etat).
9. Le délai écoulé entre l'enregistrement au guichet administratif et l'admission en UHCD.	27. Le nombre de patients présents depuis plus de 10h aux urgences.
10. Le délai écoulé entre l'enregistrement au guichet administratif et la sortie du service.	28. Le nombre de patients hospitalisés à la sortie des urgences depuis 3 jours.
11. Le taux d'occupation global des lits, box.	29. Le nombre d'interventions primaires et secondaires par le SAMU.
12. Le délai entre la demande de lit et son affectation.	30. Le nombre de CCMU (Classification Clinique des Malades aux Urgences) 4 et 5 présents (patients graves).
13. Le délai entre le premier triage et le premier soin.	31. Le taux d'occupation ponctuel (rapport à un instant t du nombre de patients hospitalisés sur la capacité d'accueil).
14. Le nombre de lits aux soins intensifs.	32. Le taux d'hospitalisation après urgence.
15. La satisfaction des médecins urgentistes.	
16. La satisfaction des patients.	
17. Le nombre d'hospitalisation sur 24 h.	
18. Le nombre d'hospitalisation par jour sur X jours.	

Cependant, les caractéristiques de ces indicateurs ne sont pas toutes accessibles ou exploitables, car elles doivent être établies et validées avec les professionnels du service d'urgence pour garantir leur efficacité à identifier, représenter et quantifier des situations de tension au SU dans différents contextes.

Par ailleurs, la notion d'indicateur de tension définie dans la littérature correspond généralement à la variable d'état ( $V_E$ ) présentée précédemment. Pour cette raison, nous utilisons dans cette partie le terme d'indicateur.

A partir de cette première liste d'indicateurs de tension et après l'adaptation de certains indicateurs, nous avons sélectionné 21 indicateurs susceptibles de couvrir l'ensemble des activités du processus de prise en charge au niveau du SUP du CHRU de Lille (de l'arrivée d'un patient à sa sortie du SUP). La liste des 21 indicateurs candidats est donnée table II-2.

Table II-2 : Les 21 indicateurs candidats

<b>La liste des indicateurs candidats au SUP du CHRU de Lille</b>
1. Temps d'attente au guichet administratif.
2. Temps d'attente entre l'enregistrement au guichet administratif et la prise en charge par l'hôtesse.
3. Temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et l'intervention de l'IAO
4. Temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et le premier examen médical.
5. Délai écoulé entre l'enregistrement au guichet administratif et l'admission en UHCD.
6. Délai écoulé entre l'enregistrement au guichet administratif et la sortie du service
7. Nombre d'hospitalisation sur 24 h.
8. Nombre d'hospitalisation par jour sur X jours.
9. Nombre de patients actuellement hospitalisés dans le secteur d'UHCD depuis plus de 24h, 12h.
10. Nombre de transferts pour manque de place depuis 24h.
11. Moyenne de présence aux urgences sur 24h.
12. Durée moyenne d'attente aux urgences depuis 2h.
13. Passage depuis 6 h, et le passage/24h.
14. Nombre de patients selon leurs âges (ex : <1 an).
15. Nombre de patients présents/médecin.
16. Nombre de patients présents/IDE (Infirmier Diplômé d'Etat).
17. Nombre de patients présents depuis plus de 10h aux urgences.
18. Nombre de patients hospitalisés à la sortie des urgences depuis 3 jours.
19. Nombre d'interventions primaires et secondaires par le SAMU.
20. Nombre de CCMU (Classification Clinique des Malades aux Urgences) 4 et 5 présents.
21. Taux d'occupation ponctuel (nombre de patients hospitalisé /capacité d'accueil à un instant t).

Pour aider au choix des indicateurs pertinents, cette liste a été soumise au personnel du service d'urgence pédiatrique (SUP) à l'aide d'interviews et de questionnaires. Les

professionnels de santé du SUP du CHRU de Lille ont classé les 21 indicateurs sélectionnés selon leur degré de pertinence. Le tableau II-3 présente les cinq indicateurs de tension jugés comme les plus pertinents et les plus significatifs.

Table II-3 : Les cinq indicateurs de tension au SUP- CHRU Lille

Classement	Indicateur de tension
1	Le temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et le premier examen médical.
2	Le temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et la consultation infirmière.
3	Le temps de séjour d'un patient non urgent au SUP (temps passé entre l'arrivée au SUP et la sortie du service d'urgence) par rapport au temps de séjour théorique.
4	Le nombre de patients présents au service d'urgence à l'arrivée d'un nouveau patient.
5	Le nombre de patients présents au SUP sur la capacité d'accueil (nombre de médecins).

### 3.3.2. Indicateur de tension complété

La recherche d'une action correctrice lors de l'occurrence d'une situation de tension est fortement guidée par le contexte dans lequel la situation de tension se manifeste. Cette action dépend notamment du type d'évènement ayant entraîné l'apparition de la tension, du niveau de tension (dégradé, critique) et de la période d'occurrence (hiver, heure de la journée, ...). Par conséquent nous proposons d'étendre la notion d'indicateur de tension précédente en incluant la notion de contexte dans la définition classique de l'indicateur. L'indicateur de tension ( $I_{TC}$ ) est ainsi caractérisé par un quadruplet :

$$I_T = [C, O, V_E, V_A], \text{ où :}$$

- **Contexte (C) :** ce paramètre définit trois éléments du contexte dans lequel l'indicateur est considéré :
  - a) *le contexte évènementiel :* il précise si nécessaire l'évènement(s) ou la menace(s) sanitaire(s) liée(s) à des épidémies, gripes, canicule, vague de chaleur, et événements exceptionnels comme les catastrophes naturelles ou technologiques.
  - b) *le contexte situationnel :* indique l'état du SU (e.g : dégradé ou critique) lors du lancement d'une (ou des) action de correction.
  - c) *le contexte temporel défini par :* i) l'heure de la journée, ii) la période de la journée (matin, soir), iii) le jour de la semaine, iv) le mois de l'année, v) la période de l'année (période épidémique et période normale) etc. Par exemple, ce paramètre permet au responsable du SU de filtrer les actions de

correction possibles selon le jour de la semaine sachant que le personnel médical est en effectif réduit en weekend (samedi et dimanche).

- **L'objectif (O), les variables d'état (V<sub>E</sub>) et les variables d'actions (V<sub>A</sub>)** sont identiques aux paramètres définis précédemment.

Un exemple d'un indicateur de tension "Taux de remplissage dans une salle d'attente d'un SU" est présenté figure II-5.

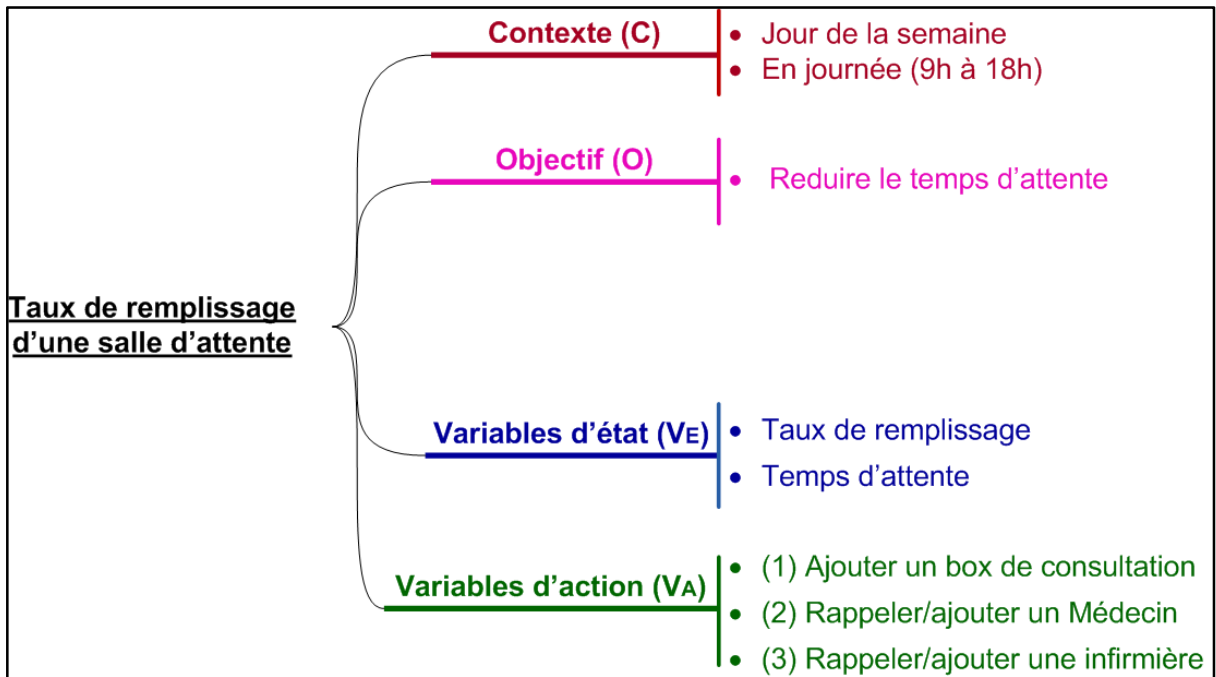


Figure II-5 : Exemple d'indicateur de tension : taux de remplissage de la salle d'attente dans un SU.

#### 4. Actions de correction

Elles peuvent être internes ou externes au SU.

##### 4.1. Actions internes

Ce sont les plus fréquentes. Dans le cas des actions internes, il est possible d'agir sur trois éléments principaux figure II-6 :

- a) sur les ressources : ressources humaines (médecins urgentistes, infirmières, personnel administratif, etc.) et les ressources matérielles (box, lits, matériel médical, etc.),
- b) sur les patients,
- c) sur la réorganisation spatiale du service d'urgence.

#### 4.2. Actions externes

Elles consistent essentiellement à diriger le patient vers d'autres établissements notamment en interaction avec les services chargés en temps normal d'acheminer les patients au SU.

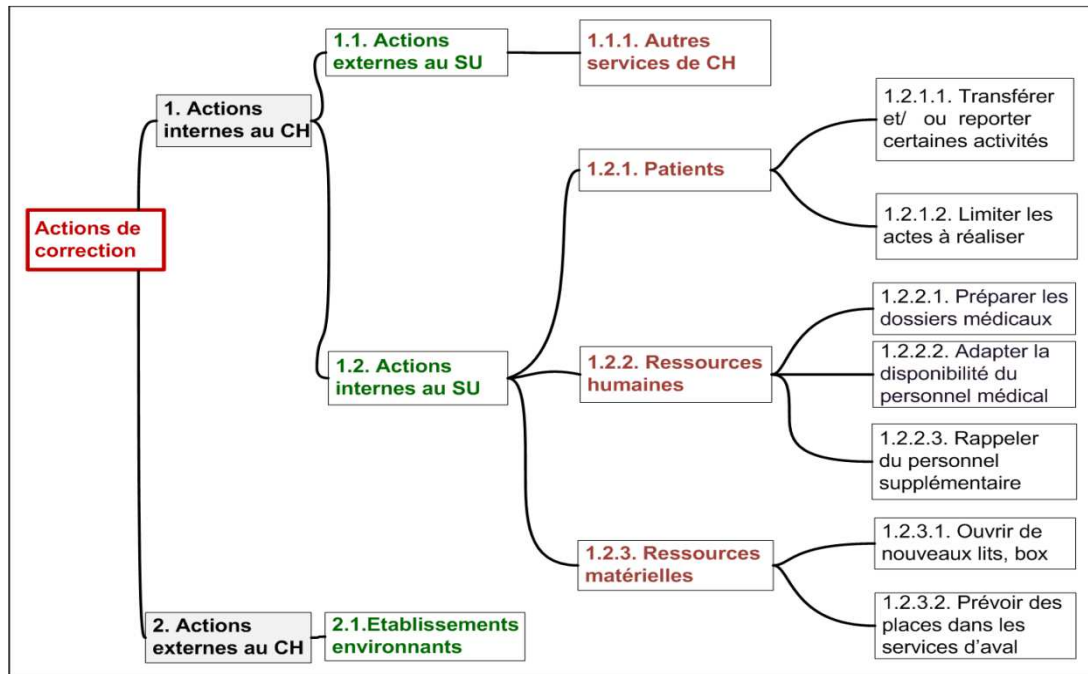


Figure II-6 : Les actions de correction possibles dans un service d'urgence.

La résilience organisationnelle d'un SU, c'est-à-dire sa capacité à réagir rapidement après l'occurrence d'une perturbation, peut être considérée comme l'un des critères de performance du SU. Dans la partie suivante nous proposons une procédure d'évaluation de la résilience d'un service d'urgence.

### 5. Résilience d'un service d'urgence - Proposition d'une définition

Dans un souci de généralité, la définition de la résilience d'un service d'urgence que nous proposons prend en compte les événements imprévus et les événements prévus.

Les événements prévus peuvent être définis comme générateurs de flux récurrents, pouvant présenter des variations saisonnières dont on connaît plus au moins les tendances moyennes à court ou à moyen terme (semaines, mois ou année). Les événements imprévus sont définis comme des générateurs de flux exceptionnels : menaces ou crises sanitaires (grippes, canicules, vagues de froid, etc.) non prévisibles en volume et en nature.

Nous définissons la résilience d'un service d'urgence comme sa capacité à procurer les meilleurs soins aux patients tout en maintenant ses performances (durée et qualité des soins...) à un niveau acceptable face à des perturbations et/ou situations prévues ou imprévues en s'adaptant avant, pendant et après la perturbation.



Les trois concepts clés sur lesquels se fonde cette définition sont présentés figure II-7.

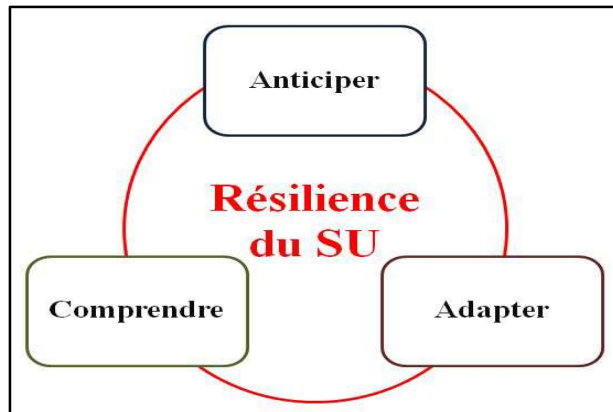


Figure II-7 : Exigence de la résilience d'un service d'urgence (SU).

- 1) **Anticiper** les perturbations en les détectant le plus tôt possible. Le SU doit :
  - i) surveiller l'évolution du SU afin de détecter l'occurrence de perturbations,
  - ii) planifier les actions de correction adaptées aux caractéristiques de la perturbation permettant au SU d'obtenir des délais suffisants pour retrouver ou le maintenir dans son état normal.
- 2) **Adapter** et réagir à des perturbations régulières ou irrégulières, prévisibles ou imprévisibles. Le SU doit posséder la capacité d'adaptation aux variations, perturbations inhabituelles, habituelles et/ou routinières,
- 3) **Comprendre et apprendre** des perturbations du passé (capacité d'apprentissage). En se basant sur les perturbations déjà enregistrées, le SU doit être capable de reproduire un comportement face à une ou des perturbations futures afin de proposer des actions spécifiques, adaptées à ces perturbations.

Pour qu'un service d'urgence soit résilient, il doit donc pouvoir à la fois surveiller l'évolution des procédures de soins en cours au sein du SU, anticiper les perturbations en les détectant le plus tôt possible, s'adapter aux variations/perturbations habituelles et inhabituelles, analyser et comprendre les causes des perturbations passées afin de proposer des réponses et des actions adaptées aux perturbations futures et enfin, concevoir et planifier des actions de prévention et de correction afin de maintenir un niveau de fonctionnement acceptable.

## 6. Evaluation de la résilience d'un service d'urgence

Dans l'objectif de répondre au besoin d'une méthode d'évaluation opérationnelle (Robert et al., 2010) nous considérerons ici la résilience du SU comme sa capacité à retrouver son état normal de fonctionnement face à des perturbations et/ou situations prévues ou imprévues. Cette interprétation est naturellement partielle car elle ne couvre pas tous les

champs de la résilience organisationnelle d'un service d'urgence telle que nous l'avons définie. Elle représente essentiellement la "résilience proactive et réactive", c'est-à-dire le comportement du SU suite à la prévision ou à l'occurrence d'une perturbation. Cependant elle peut constituer un premier élément d'évaluation de la résilience relativement simple à mettre en œuvre.

La résilience s'exprime en référence à l'état normal de fonctionnement. Le système est alors performant puisqu'il remplit correctement sa mission avec un niveau de performance défini. Il est donc essentiel de préciser dans le paragraphe suivant la notion de performance d'un système d'urgence.

### 6.1. Notion de performance d'un service d'urgence (SU)

La performance des systèmes hospitaliers fait débat depuis de nombreuses années en raison des évolutions rapides et profondes de ces derniers. La difficulté à définir la performance, et particulièrement celle d'un système hospitalier, résulte de nombreux facteurs, en particulier de son aspect multidimensionnel (Marcon et al., 2008).

La performance d'un service d'urgence est liée à la performance de l'ensemble des sous-services le constituant (l'urgence vitale, l'enregistrement administratif, la consultation médicale, l'unité d'hospitalisation de courte durée...) et une perturbation peut affecter un ou plusieurs sous-services du SU.

Par ailleurs, l'expression de la performance d'un SU doit s'exprimer en prenant en compte :

- les points de vue du personnel et des patients sur le comportement du SU, notamment les caractéristiques temporelles relatives au fonctionnement du SU,
- l'environnement dans lequel est plongé le SU lors de l'évaluation de la performance (en cas d'occurrence d'une perturbation : type de perturbation, action(s) de correction appliquées, ...),
- le mode d'évaluation, c'est-à-dire les critères de performance permettant de qualifier la performance du SU. Les critères généralement retenus par les urgentistes sont (Kadri et al., 2014b) :
  - le temps d'attente des patients avant la prise en charge par l'hôtesse et le premier examen médical,
  - le temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et l'intervention de l'IAO,
  - le temps de séjour des patients au service d'urgence,
  - la capacité de soins que l'on peut exprimer par le nombre de patients traités sur une période donnée,
  - la qualité organisationnelle des soins exprimée par exemple par le rapport entre le temps de séjour réel et le temps de séjour théorique. L'aspect

médical de la qualité des soins dispensés par le SU n'est pas pris en compte dans le cadre de notre travail.

D'autres critères peuvent être utilisés : les différents temps caractéristiques de l'impact d'une perturbation : délai de détection de la perturbation, durée d'impact de la perturbation, ... (ils sont précisés au § 11.1.2), les moyens mis en œuvre, la résilience.

Nous définissons ainsi la performance  $Q(t)$  d'un service d'urgence comme suit (figure II-8) :

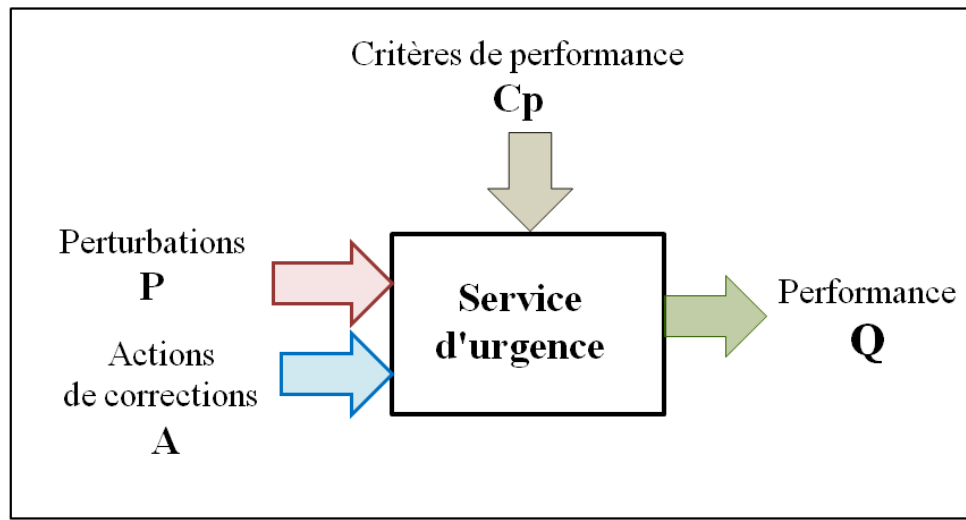


Figure II-8 : Performance d'un service d'urgence.

- $\mathbf{P} = (P_1, P_2 \dots, P_p)^T$  :  $P_i(t)$  représente la perturbation  $i$ . Une perturbation peut être définie suivant les paramètres de localisation spatiale (sous service(s) du SU concerné(s)), de localisation temporelle (date d'occurrence, date de fin), de nature (pic d'influence, saturation des box...), d'intensité (nombre de patients admis au SU dans la dernière heure...).
- $\mathbf{A} = (A_1, A_2 \dots, A_g)^T$  : qui caractérise les actions de correction conduites au sein du SU.  $A_i$  représente les actions de corrections dont dispose le SU.
- $\mathbf{C}_p = (C_{p1}, C_{p2}, \dots, C_{pr})^T$  : les  $C_{pi}$  sont les critères de performance utilisés pour caractériser la performance. Le choix du (des) critère (s) de performance est notamment fonction de sa mesurabilité au sein du service, des préférences des urgentistes, des possibilités d'actions possibles pour agir dans une situation donnée.

La performance  $Q(t)$  peut alors s'exprimer par :

$$\mathbf{Q}(t) = (Q_1, Q_2 \dots, Q_k)^T = f(\mathbf{P}, \mathbf{A}, \mathbf{C}_p, t) \quad (\text{II.1})$$

$\mathbf{Q}(t)$  : performance du SU sous la perturbation  $\mathbf{P}$ , de dimension  $k$ , définie comme étant la performance du SU.

### 6.1.1. Evolution de l'état du service d'urgence

A l'heure actuelle, les valeurs de seuil des différents états dégradés (mineur, modéré et sévère, voir figure II-4) n'ont pas encore été caractérisés et définis. C'est pourquoi un seul état dégradé, figure II-9, est actuellement considéré. Ainsi, le comportement du SU est caractérisé par deux situations (normale et de tension) et trois états (normal, dégradé et critique).

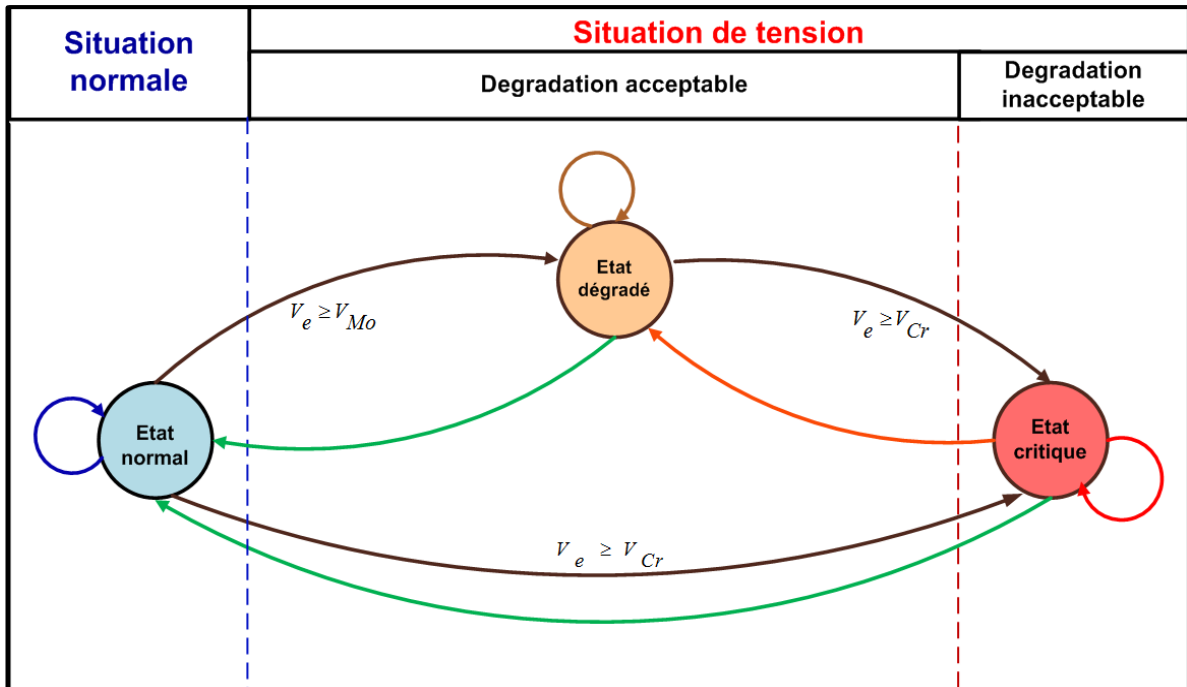


Figure II-9 : Etats du SU - Représentation simplifiée.

### 6.1.2. Evolution de la performance du SU

On considère un SU dont la performance dans l'état normal pour lequel il a été conçu. Après l'occurrence d'une perturbation à la date  $t = t_p$ , en fonction de la nature, de l'intensité et de la durée de la perturbation, le niveau de performance baisse, le SU passant en état dégradé à l'instant  $t_{vse}$ . A l'aide des actions correctives mises effectivement en œuvre à l'instant  $t_A$ , le SU retrouve son état de fonctionnement normal à la date la date  $t = t_F$  après un temps de récupération  $T_R$ .

L'évolution de la performance  $Q(t)$  du SU après l'occurrence d'une perturbation est représentée figure II-10. Les notations utilisées sont données table II-4.

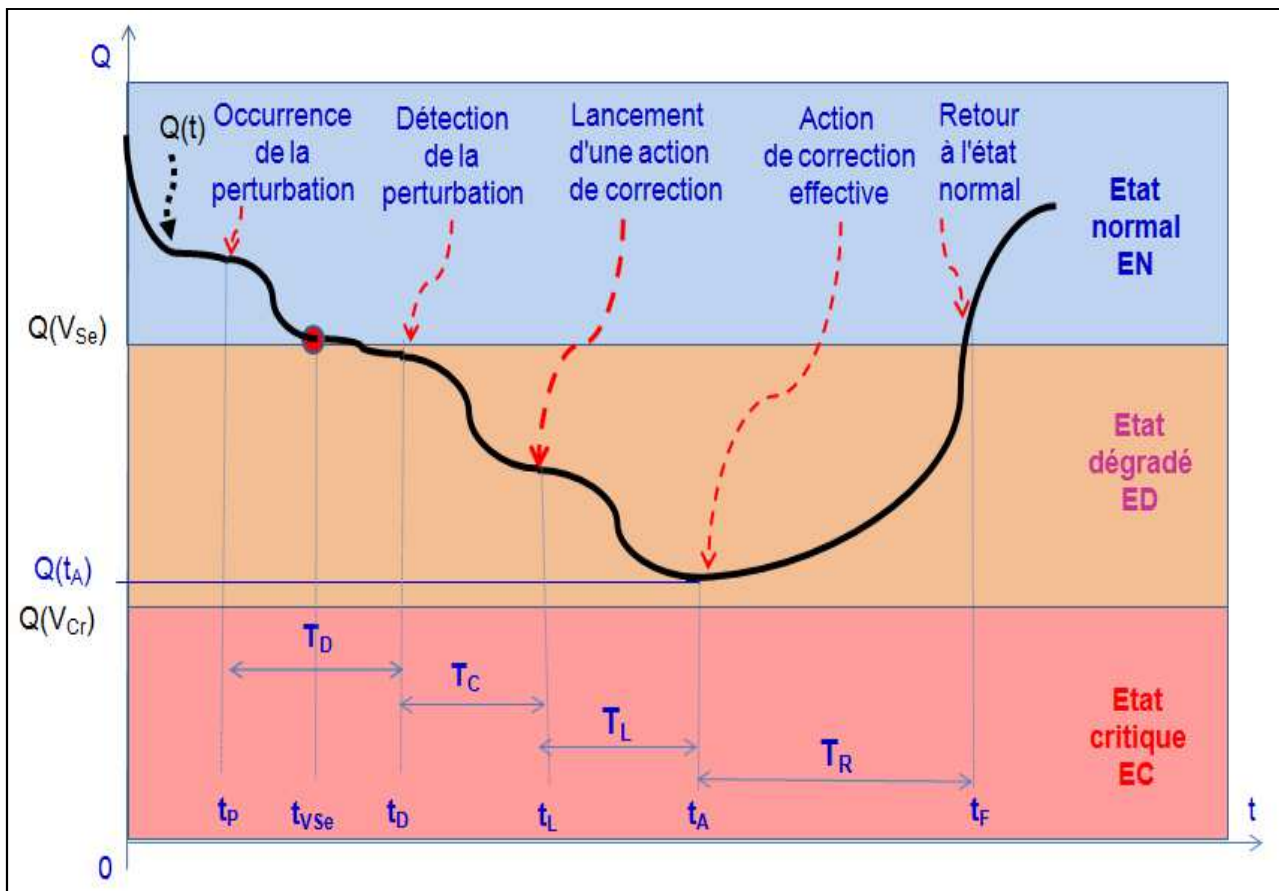


Figure II-10 : Modèle de perturbation au sein d'un SU après occurrence d'une perturbation.

*Remarques :*

- *Instant d'occurrence d'une perturbation  $t_p$*  : la figure II-10 représente un scénario où une perturbation apparaît alors que le SU est dans son état normal. Naturellement d'autres situations peuvent se produire selon l'état du SU (normal, dégradé ou critique).
- *Instant de détection de la perturbation  $t_D$*  : nous avons considéré que la perturbation pouvait ne pas être détectée dès son apparition (dérive lente d'un indicateur, temps de calcul et de mise à jour des indicateurs, ...). Ainsi, dans le cas envisagé, la détection est faite après le passage en état dégradé. Le délai de détection dépend de l'expérience des personnels de santé (la détection peut être immédiate) et de la dynamique du système d'information élaborant les indicateurs de tension.
- *Temps de lancement d'une action corrective  $T_C$*  : nous avons pris en compte le fait que le responsable du SU peut avoir besoin d'un délai pour la recherche d'une action corrective (recherche et/ou d'un personnel supplémentaire, comparaison entre plusieurs actions possibles, ...).
- *Temps de lancement d'une action corrective  $T_L$*  : ce temps correspond au délai nécessaire pour que, après que le choix d'une action correctrice est fait, l'action soit

réellement opérationnelle au sein du SU (e.g. temps d'arrivée d'un personnel supplémentaire).

C'est pourquoi une des perspectives de notre travail portera sur l'analyse des effets de perturbations cumulatives et sur les combinaisons d'actions correctives envisageables dans ce cas.

Table II-4 : Notations

Notation	Signification	Commentaire
$Q(t)$	Valeur courante de la performance du SU	.
$Q(V_{Se})$	Valeur de la performance lorsque le SU passe en l'état dégradé (seuil $V_{Se}$ )	
$Q(V_{Cr})$	Valeur de la performance lorsque le SU passe en état critique (seuil $V_{Cr}$ )	
$Q(t_A)$	Valeur de la performance lorsque l'action correctrice est effective	
$t_p$	Date d'occurrence de la perturbation	
$t_{VSe}$	Date à laquelle $Q(t)$ atteint la valeur $Q(V_{Se})$ correspondant au passage à l'état dégradé (seuil $V_{Se}$ )	
$t_D$	Date à laquelle la perturbation est détectée	
$t_L$	Date à laquelle une action correctrice est choisie et lancée	
$t_A$	Date à laquelle l'action correctrice est effective au sein du SU (e.g. : arrivée du médecin supplémentaire au SU)	
$t_F$	Date à laquelle le SU retrouve son état normal	
$T_D$	Temps nécessaire pour détecter la perturbation	$T_D = t_D - t_p$
$T_C$	Temps nécessaire pour identifier et choisir une action correctrice	$T_C = t_L - t_D$
$T_L$	Temps nécessaire pour lancer l'action correctrice	$T_L = t_A - t_L$
$T_R$	Temps de récupération : temps nécessaire pour que le SU retrouve son état normal après application effective de l'action correctrice	$T_R = t_F - t_A$
$T_{REC}$	Temps de recouvrement : temps nécessaire pour que le SU retrouve son état normal après lancement d'une action correctrice	$T_{REC} = t_F - t_L$
$T_P$	Temps nécessaire pour que le SU retrouve son état normal après que la perturbation a été détectée	$T_P = t_F - t_D$
$T_{VSe}$	Temps nécessaire pour que le SU retrouve son état normal après que le SU soit passé en état dégradé	$T_{VSe} = t_F - t_{VSe}$
$T_T$	Temps total pendant lequel le SU est soumis à la perturbation avant retour à l'état normal	$T_T = t_F - t_p$

### 6.1.3. Evaluation de la résilience

Pour le calcul de la résilience, nous représentons la performance  $Q(t)$  par la valeur d'un des critères de performance choisis (ou par une valeur représentative de l'ensemble des critères : moyenne, moyenne pondérée...).

Nous proposons pour la mesure de la résilience  $R$  du SU une quantification selon différents paramètres

- a. En fonction du temps de récupération  $T_R$  :

$$R_{T_R} = \int_{t_A}^{t_F} [Q(V_{Se}) - Q(t)] dt \quad (II.2)$$

La résilience correspond dans ce cas au temps nécessaire pour retrouver un fonctionnement normal après application de l'action corrective.

- b. En fonction du temps de recouvrement  $T_{REC}$  :

$$R_{REC} = \int_{t_L}^{t_F} [Q(V_{Se}) - Q(t)] dt \quad (II.3)$$

On s'intéresse alors à la résilience correspondant au temps nécessaire pour retrouver un fonctionnement normal après le passage du SU en état dégradé.

- c. En fonction du temps de  $T_P$  :

$$R_D = \int_{t_D}^{t_F} [Q(V_{Se}) - Q(t)] dt \quad (II.4)$$

La résilience correspond au temps nécessaire pour retrouver un fonctionnement normal SU après la détection de la perturbation.

- d. En fonction du temps global de perturbation  $T_T$  :

$$R_P = \int_{t_P}^{t_F} [Q(V_{Se}) - Q(t)] dt \quad (II.5)$$

La résilience correspond alors au temps total durant lequel le SU a été soumis à la perturbation.

Pour estimer les résiliences du SU comme définies précédemment, nous proposons une procédure qui permet d'évaluer la résilience d'un service d'urgence avec pour objectif de contribuer à l'ingénierie de la résilience.

## 6.2. Proposition d'une procédure d'évaluation de la résilience d'un SU

Les principales étapes de la procédure sont présentées figure II-11.

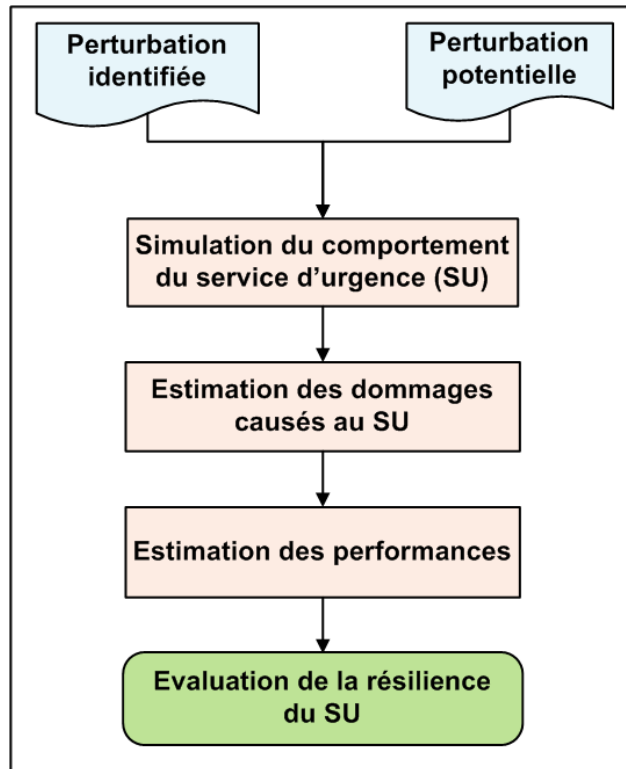


Figure II-11 : Procédure générale d'évaluation de la résilience d'un SU.

### 6.2.1. Choix d'une perturbation pour l'évaluation

L'évaluation de la résilience d'un SU peut s'effectuer en utilisant :

- des perturbations identifiées : l'évaluation s'effectue par l'analyse du comportement du SU pour des perturbations qui ont eu lieu antérieurement,
- des perturbations potentielles : on génère des perturbations potentielles susceptibles de se produire au sein du SU.

### 6.2.2. Simulation du comportement du SU

La deuxième étape de la procédure a pour objectif de visualiser et d'évaluer le comportement et la réaction du SU face à une perturbation. La simulation peut alors apporter un support conséquent dans l'analyse du comportement du SU lors de l'occurrence d'une perturbation. Elle permet de représenter les relations et les interactions complexes entre le flux de charge en soins et la capacité de soins, les actions de correction et le temps de récupération face à une perturbation (Kadri et al., 2014b).



La simulation peut être utilisée pour :

- a. évaluer les actions de corrections prises suite à une perturbation (passée ou potentielle) et identifier les actions de correction les plus appropriées.
- b. imaginer et évaluer des scénarios alternatifs à ceux qui ont été mis en œuvre lors des perturbations réellement survenues (on "rejoue" les situations de tension qui se sont déroulées).
- c. allouer les ressources pour renforcer la résilience du SU.

### 6.2.3. Estimation des dommages causés au SU

Cette étape vise à estimer les dommages ou les pertes causées par la perturbation. Cette étape est primordiale car elle permet de quantifier les dommages. Les dommages causés au SU peuvent être variés : allonger le temps de séjour des patients, occasionner et/ou aggraver le stress du personnel médical, entraîner la perte de patients (fugues, patients non traités, décès).

Les critères de performances et les indicateurs de tension peuvent constituer des éléments de mesure des dommages causés par comparaison avec leur valeur dans l'état de fonctionnement normal du SU. Par exemple, un afflux brusque de patients va occasionner une forte augmentation du taux d'occupation ponctuel (rapport à un instant  $t$  du nombre de patients hospitalisés sur la capacité d'accueil).

### 6.2.4. Estimation des performances

L'estimation des performances est réalisée en construisant les vecteurs  $Q(t)$  définis précédemment. Cette analyse permet une classification des perturbations et contribue à l'élaboration de la base de connaissances du système d'aide à la décision présenté chapitre 3.

Comme formulé, la résilience organisationnelle d'un SU est liée à la rapidité :

- de la détection d'une perturbation (diminution de  $t_D$ ),
- de la sélection et de lancement des actions correctrices (diminution de  $t_C$ ),
- de la mise en œuvre de ces actions (diminution de  $t_L$ ).

Il est donc indispensable de disposer d'un système d'aide à la décision proactif et réactif permettant :

- le pilotage proactif du SU : anticiper les situations de tension (prévision de l'apparition d'une situation de tension en la détectant le plus tôt possible) et proposer les actions de correction pertinentes afin d'éviter ces situations,
- le pilotage réactif du SU : gérer les tensions non détectées,
- l'estimation du comportement du service d'urgence suite à l'application de ces actions, (simulation, modèle de prévision et de détection ...),
- la capitalisation des connaissances sur les comportements du SU pour mieux faire face aux futures tensions (apprentissage, retour d'expériences),
- l'aide à la formation du personnel.

## **7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord défini et caractérisé une situation de tension dans un service d'urgence, ainsi que les indicateurs de tension et les actions de correction associées. Une deuxième partie nous a permis de définir la résilience d'un service d'urgence en précisant les trois concepts fondamentaux : anticipation, adaptation, compréhension. Dans la dernière partie du chapitre nous avons proposé une procédure d'évaluation de la résilience d'un SU dans une approche de mesure du temps de recouvrement intégrant le délai de mise en œuvre des actions correctrices au sein du SU.

Le chapitre III présente notre proposition d'un système d'aide à la décision pour l'anticipation et la gestion efficace des situations de tension dans un service d'urgence.

# **Chapitre III : Proposition d'un système d'aide à la décision pour la gestion des situations de tension d'un service d'urgence**

## **1. Introduction**

Nous avons montré dans le chapitre précédent la nécessité d'anticiper l'occurrence des situations de tension dans un service d'urgence pour une gestion efficace de ces situations. Cela implique la surveillance des indicateurs de tension caractérisant chaque situation de tension, constituant le tableau de bord du responsable du SU, lui permettant la mise en œuvre d'actions de correction associées à chaque situation.

Ce constat conduit à mettre en œuvre, pour les gestionnaires des services d'urgence, un système d'aide à la décision pour l'anticipation et la gestion de ces situations, leur apportant une aide efficace pour le pilotage du SU.

Dans ce chapitre, nous rappelons tout d'abord les aspects fondamentaux de la prise de décision (la décision, le processus décisionnel, l'aide à la décision) et les principales caractéristiques des systèmes d'aide à la décision. Nous présentons, dans une deuxième partie les systèmes d'aide à la décision hospitaliers.

Les caractéristiques d'un service d'urgence en terme de décision nous conduisent ensuite à caractériser un SAD pour la gestion efficace des situations de tension dans un service d'urgence (SAGEST) et à en proposer une architecture fonctionnelle. Nous en présentons les fonctions essentielles dans la dernière partie du chapitre.

## **2. Aide à la décision et systèmes d'aide à la décision**

### **2.1. Définition et classification des décisions**

De nombreuses définitions de la décision ont été proposées selon les domaines considérés. Nous retiendrons la définition suivante : « la décision constitue la réponse d'un décideur, dans un contexte donné, qui effectue un choix entre plusieurs solutions susceptibles de résoudre le problème ou la situation auxquels il est confronté ».

Plusieurs typologies des décisions ont été proposées parmi lesquelles (Pellegrin, 1997; Pierreval, 1999; Simon, 1977). Nous rappelons brièvement les principaux critères de classification d'une décision dans la table III-1 ci-dessous.

Table III-1 : Critères de classification des décisions.

Horizon de la décision	Décision stratégique/long terme, tactique/moyen terme, opérationnelle/court terme
Contexte de la décision	Politique, administratif, social, temporalité, économique, ...
Environnement certain/incertain	Incertitude mesurable, incertitude non mesurable ou radicale
Caractère unique/répété de la décision	Décision unique liée à un problème spécifique, répétée pour des situations usuelles
Périodicité/fréquence	Décision à intervalles réguliers (rapports d'activité, bilans...) /e.g.: événementielle, journalière, hebdomadaire, mensuelle, annuelle, ...
Décision temps réel	Affectation, attribution, ...
Champ de la décision	Planification, pilotage, régulation
Domaine de la décision	Economique, technologique, humain, ...
Contraintes	Temporelles, organisationnelles, de sécurité, de coût, de ressources, ...
Caractère partagé ou non de la décision	Décideur unique, décision de groupe
Niveau de structuration de la décision	Programmable, semi-programmable, non programmable
Perception du problème	Perception, degré de conscience de la situation
Critères de sélection	Décision mono ou multicritère

### 2.1.1. Le processus de décision

Selon Roy et Bouyssou, (1993), le processus de prise de décision est composé des cinq activités fondamentales suivantes :

- *Renseignement* : l'activité de renseignement consiste à surveiller l'environnement, à déclencher le besoin en décisions et à rechercher l'ensemble des informations nécessaires à la perception par le(s) décideur(s) de la situation courante.
- *Conception* : l'activité de conception consiste à élaborer les alternatives possibles et l'évaluation a priori de leurs impacts potentiels sur les performances correspondantes.
- *Décision* : l'activité de décision peut consister :
  - soit à restreindre (ou non si la décision est de ne pas décider) les domaines de valeur d'une variable d'état d'un système. C'est une problématique de "choix".
  - soit à trier les domaines (singletons ou non) de valeurs des variables d'état d'un système. C'est une problématique de "tri".
  - soit à ranger ou non ces domaines ou ces valeurs par catégories. C'est une problématique de "rangement".
- *Application* : l'application consiste à transformer une décision prise en actions à mener au niveau du système.
- *Evaluation* : l'évaluation consiste à évaluer a posteriori l'application d'une décision.

Cette évaluation permet :

- de valider ou non les hypothèses posées lors des évaluations a priori réalisées en phase de conception,
- d'enrichir éventuellement la connaissance du comportement du système opérant par rapport à la décision prise pour améliorer, lors des processus de pilotage décisionnels ultérieurs, une nouvelle évaluation a priori.

La majorité des travaux portant sur la décision concerne les approches et les méthodes de résolution. On constate ainsi qu'il existe deux démarches fondamentales pour la résolution de problème :

- la première est une démarche dite "optimale" dont l'objectif est de rechercher une décision optimale à partir d'hypothèses permettant d'établir et de prouver cette optimalité,
- la seconde est une démarche orientée "rationalité limitée" dont l'objectif est de rechercher plutôt une décision satisfaisante (Simon, 1977; Quinet, 1994).

## 2.2. Aide à la décision

### 2.2.1. Définition

Le concept d'aide à la décision peut se définir comme l'ensemble des activités destinées à aider le décideur dans sa prise de décision en lui proposant d'effectuer un choix, un tri, ou un rangement. L'aide à la décision porte ainsi sur la mise en œuvre de plusieurs fonctions décrites dans le paragraphe suivant.

### 2.2.2. Les fonctions de l'aide à la décision

L'aide à la décision se décline globalement en six fonctions associées aux cinq activités élémentaires décrites auparavant (Tahon and Trentesaux, 2001). Nous les décrivons brièvement ci-dessous :

- *Aide au déclenchement* : elle porte sur le suivi de l'évolution des variables d'état, la gestion de la criticité des événements générés suite à ce suivi la sélection d'événements jugés prioritaires selon les objectifs recherchés, etc.
- *Aide au renseignement* : elle doit permettre l'établissement d'un contexte décisionnel. L'aide apportée concerne :
  - la gestion de la complexité des données (multiplicité, diversité, lien de causalité, redondance, obsolescence, imprécision, etc.),
  - la gestion des informations d'agrégation, simulations, génération et sélection des indicateurs de performances, adaptés à l'événement et aux objectifs, etc.).
- *Aide à la conception* : elle comporte la génération des solutions possibles en fonction de la nature de la décision à prendre, des objectifs, des informations disponibles et des contraintes, ainsi que l'évaluation a priori de cette décision par rapport aux critères d'évaluation.
- *Aide à la décision* : l'aide à la décision *stricto sensu* consiste à aider l'opérateur dans

sa prise de décision en lui proposant une décision (choix, tri, rangement) et en lui expliquant le cas échéant le raisonnement ou le calcul qui a mené à cette proposition.

- *Aide à l'application* : elle consiste à vérifier la mise en application d'une décision et à la suivre au fil du temps en fonction du contexte spécifié (périodique, événementielle).
- *Aide à l'évaluation* : elle peut s'envisager essentiellement au niveau de la capitalisation des connaissances résultant d'un processus de pilotage décisionnel et au niveau des tests de validation des hypothèses fixées en phase de conception.

Lorsque les gestionnaires du système sont confrontés à des situations de décision complexes un système d'aide à la décision (SAD) est nécessaire (Fogli and Guida, 2013). Nous en donnons les caractéristiques essentielles dans le paragraphe suivant.

### 3. Les systèmes d'aide à la décision (SAD)

#### 3.1. Caractéristiques d'un SAD

L'objectif général d'un SAD est d'éclairer les modalités de choix du décideur, le déroulement du processus de décision doit rester, complètement ou en partie, sous le contrôle de l'opérateur humain et non pas de se substituer à ce dernier. Un SAD est ainsi conçu pour aider et remédier aux déficiences cognitives humaines en mettant en œuvre une ou plusieurs des fonctions d'aide à la décision et faciliter le processus de structuration et l'optimisation des décisions.

En pratique, le concept de SAD recouvre des réalités diverses et relève de champs conceptuels différents : la théorie de la décision, l'informatique, l'intelligence artificielle, la psychologie cognitive et l'ergonomie. C'est sans doute la raison pour laquelle il n'existe pas de définition établie d'un SAD.

Plusieurs définitions d'un SAD ont été proposées dans la littérature (Hansson, 2005; Levine and Pomerol, 1995; Power, 2002). L'intérêt de ces différentes définitions est de mettre en évidence la diversité des points de vue et les caractéristiques de ces systèmes.

Nous retiendrons, sans vouloir être exhaustif, les caractéristiques d'un SAD qui nous paraissent fondamentales :

- le SAD est utilisé pour résoudre des problèmes peu ou mal structurés, à des niveaux de management différents,
- il permet l'identification d'un problème et sa compréhension,
- il doit permettre l'accès à des informations de natures différentes (interne/externe, structurée/peu ou non structurée) lui permettant d'appréhender le contexte de la décision,
- c'est un système homme-machine permettant à l'opérateur de mettre en œuvre, à travers un dialogue qu'il contrôle, une démarche de recherche heuristique,
- il permet la génération de solutions et leur évaluation à partir de modèles,

- il doit être flexible, c'est-à-dire pouvoir s'adapter à un large spectre de processus de pilotage décisionnels.

Les SAD sont utilisés dans de nombreux domaines. Parmi ceux-ci, on peut citer :

- les télécommunications (Flynn et al., 2002; Hafez and ElDahshan, 2010),
- les systèmes de transport (Alvear et al., 2013; Durduran, 2010) : choix du tracé d'une voie de tramway, aide routage de transports de produits dangereux, régulation de trafic,
- les installations industrielles (Abdolhamidzadeh, 2013; Reniers et al., 2006) : supervision, gestion des risques, maintenance,
- les installations nucléaires (Geldermann et al., 2009; Papamichail and French, 2005) : supervision, contrôle et régulation des réacteurs,
- gestion d'urgences en cas de catastrophes naturelles et/ou technologiques (Chang et al., 2010) : gestion des interventions des unités de secours, gestion des centres d'accueil des blessés,
- les systèmes hospitaliers (gestion des personnels, choix de protocoles de soins, gestion des services d'urgence). Ils sont décrits au paragraphe 4.

### 3.2. Typologie des systèmes d'aide à la décision

La littérature sur ce sujet est très abondante et fournit plusieurs approches pour la classification des SAD. Nous en citerons deux à titre d'exemple :

Volle, (2005) et Laudon et al., (2010) distinguent quatre types de systèmes d'aide à la décision selon le type et le niveau de la décision à prendre par les managers des entreprises : systèmes d'information de gestion (SIG), systèmes d'information pour dirigeants (SID), systèmes de décision de groupe (SADG) et systèmes interactifs d'aide à la décision (SIAD).

Turban et al., (2004) et Power, (2008) ont proposé des classifications plus détaillées. Ils distinguent :

- *Les SAD guidés par des modèles* : fondés sur des modèles d'analyse d'hypothèses, ils proposent des simulations, des optimisations, des prévisions et des suggestions de décision.
- *Les SAD guidés par les données* : ils permettent d'analyser de grandes quantités de données stockées pour produire des associations, des séquences, des classifications et des prévisions.
- *les SAD basés sur la communication* : ils exploitent les réseaux de communication pour faciliter la collaboration.
- *les SAD basés sur les connaissances* : procurant l'expertise nécessaire à la résolution des problèmes, formalisée en termes de recommandations, règles, procédures....
- *Les SAD basés sur le WEB* : les technologies du Web permettent de prendre des décisions dans un environnement distribué qui prend en charge l'accès aux données et la communication à distance.

Les outils mis en œuvre (recherche opérationnelle, systèmes multi-agent, modèles mathématiques, datawarehouse, datamining, aide multicritère à la décision, intelligence

artificielle, extraction de connaissance à partir de données, et les caractéristiques temporelles (SAD utilisé en temps réel ou non) constituent également des critères de classification.

Le domaine hospitalier est l'un des domaines où les SAD peuvent apporter un soutien indispensable pour la prise de décision des professionnels de santé. Nous donnons dans la partie suivante un aperçu des SAD existants dans ce domaine.

### **3.3. Les systèmes d'aide à la décision hospitaliers**

Les systèmes d'aide à la décision dans les établissements hospitaliers ont comme objectif de fournir aux professionnels de santé en temps et lieux utiles les informations et les connaissances spécifiques à certaines situations et au processus de prise en charge des patients afin d'améliorer la qualité des soins et la santé des patients (Lobach et al., 2007; Ltifi, 2011).

Nous distinguons dans le domaine hospitalier deux types de SAD : les systèmes d'aide à la décision médicale et les SAD pour les services d'urgence.

#### **3.3.1. Les systèmes d'aide à la décision médicale (SADM)**

La Haute Autorité de Santé a réalisé une étude de synthèse sur les systèmes d'aide à la décision médicale destinés aux cliniciens (HAS, 2010). Les systèmes d'aide à la décision médicale concernent :

- l'ensemble des activités médicales : prévention, dépistage, diagnostic, prescriptions, la plupart des spécialités médicales, les maladies chroniques (cancer, diabète, maladies cardiovasculaires, etc.), les affections aiguës et les urgences,
- les diverses catégories de médecins : généralistes, spécialistes, médecins en formation et les différents modes d'exercice de soins : cabinets médicaux, services d'hospitalisation, de consultation ou d'urgence des établissements de santé publics ou privés.

Leurs modalités d'intervention sont diverses :

- accès en ligne à des informations de référence dans le contexte d'une situation clinique donnée,
- recherche et présentation des données cliniques pertinentes dans le contexte de la tâche en cours : décision diagnostique ou thérapeutique, prescription médicamenteuse, tableaux de bords pour le suivi des traitements etc.,
- aide à la documentation des soins sous la forme de listes de données cliniques pertinentes,
- aide à la prescription des actes diagnostiques ou des médicaments au moyen de formulaires,
- gestion de protocoles pour la prise en charge de maladies chroniques,



- alertes (survenue d'évènements, tels que l'identification d'un résultat d'examen anormal, la détection d'une allergie ou d'une interaction médicamenteuse dangereuse),
- rappels de recommandations (pour la prévention, le diagnostic, la prescription d'examens ou de médicaments, la surveillance d'un traitement).

Dans environ deux tiers des études rapportées dans la littérature, l'utilisation des SADM entraîne une amélioration de la qualité et de la sécurité des soins :

- conformité des prescriptions aux recommandations,
- réduction du risque relatif d'erreurs de prescription,
- réduction de plus de moitié du risque relatif d'effets indésirables potentiels,
- l'amplitude moyenne des améliorations de pratique reste cependant relativement modeste, une revue systématique récente sur l'impact des rappels automatiques montre en effet une amélioration cliniquement significative sous réserve d'une intégration aux outils métiers et d'une bonne adaptation au processus de travail.

L'analyse des facteurs de succès des SADM montre que les systèmes bien adaptés au processus de travail ont le plus de chances d'être utilisés et d'entraîner des améliorations de la qualité des soins. Les principaux facteurs de succès identifiés sont les suivants :

- intégration du système d'aide à la décision médicale aux autres applications du système d'information clinique : dossier patient et systèmes informatisés de prescription,
- déclenchement automatique des interventions du SADM, sans perturbation du travail du médecin,
- fourniture de la bonne information, à la bonne personne, au bon moment, au bon endroit et par le bon canal,
- présentation par le système de recommandations pouvant donner lieu à une action plutôt qu'à un constat, offrant la possibilité de prescrire les actions recommandées par le système, sans quitter l'application en cours.

Cependant, l'étude a mis en évidence les obstacles à la diffusion des SADM :

- coûts d'investissement et de maintenance des systèmes d'information,
- problèmes structurels du secteur de la santé, incluant la taille moyenne des structures de soins,
- facteurs socioculturels, dont le niveau de sophistication technologique des utilisateurs potentiels, l'influence des pairs et les normes culturelles,
- problèmes de sécurité et de confidentialité des données personnelles qui doivent être pris en compte en priorité pour entraîner la confiance des patients et des professionnels,
- fonctionnalités, fiabilité et utilisabilité hétérogènes et manque d'interopérabilité des systèmes commerciaux.

### **3.3.2. Les systèmes d'aide à la décision pour les services d'urgence**

Dans le cas des services d'urgence, les systèmes d'aide à la décision sont appliqués dans des cas variés, notamment :

Andersson and Värbrand, (2007) ont développé un système d'aide à la décision pour la régulation dynamique et la répartition des ambulances. Le système d'aide à la décision utilise des mesures de préparation pour évaluer la capacité de gérer les appels en cours ainsi que les futurs appels dans toute la région concernée.

Kohli and Piontek, (2008) ont présenté la contribution des systèmes d'aide à la décision dans le soutien et l'aide à la décision dans le domaine hospitalier. Les auteurs ont classé les contributions et les possibilités des systèmes d'aide à la décision en quatre domaines clés : la qualité et la satisfaction des patients, l'efficacité et la rentabilité, la mitigation des risques, et l'apprentissage.

Hoot and Aronsky, (2008) ont développé un simulateur à événements discrets des flux de patients pour la prévision de situation de surpeuplement. Les entrées et sorties du modèle, respectivement, sont des descriptions de six variables de chaque patient présent et à venir du SU. La validation du modèle a été réalisée en utilisant les données réelles des patients d'un SU.

Ahmed and Alkhamis, (2009) présentent une méthodologie qui utilise la simulation combinée avec l'optimisation pour déterminer le nombre optimal de médecins, de techniciens de laboratoire et les infirmières nécessaire pour maximiser le débit des patients, réduire le temps du patient et évaluer l'impact de divers membres du personnel sur l'efficacité des services.

(Marmor et al., 2009) propose un système d'aide basé sur la simulation utilisant une procédure en deux étapes pour le contrôle d'un SU en temps réel. Dans la première étape, un gestionnaire du SU déduit l'état actuel du SU, basé sur des données historiques et la simulation : les données sont envoyées dans le simulateur et le simulateur fournit alors l'état des composantes non observables. Dans la seconde étape, et sur la base de l'état actuel présumé, la simulation prend en charge le contrôle en prédisant les futurs scénarios du SU en estimant les besoins en ressources par une nouvelle technique : la notion de charge offerte.

Thorwarth, (2011) afin d'étudier les causes de goulets d'étranglement et la distribution insuffisante des ressources, une approche de la modélisation des processus est développée, où le cheminement des patients est étudié en relation avec le flux de travail du personnel médical. Un SAD basé sur la simulation fournit une perspective globale sur les facteurs influant sur le fonctionnement du service d'urgence.

Taboada et al., (2012) ont proposé un modèle régissant le comportement des agents qui peuplent le système. Deux types distincts d'agents ont été identifiés : les agents actifs représentant des personnes, les agents passifs, les services et autres systèmes réactifs. Le modèle comprend également le système de communication et de l'environnement dans lequel les agents se déplacent et interagissent.

Cabrera et al., (2012), présentent un système d'aide à la décision pour l'exploitation des services d'urgence. Le principal objectif de la simulation est d'optimiser la performance d'un SU. L'optimisation est effectuée pour trouver la configuration optimale du personnel (médecins, personnel infirmier, personnel de triage) et le personnel d'admission.

Nous avons présenté brièvement l'utilisation des systèmes d'aide à la décision dans le domaine médical et dans les systèmes d'urgence. L'objectif recherché est principalement la prévision et l'optimisation des activités, s'appuyant sur la simulation.

Nous présentons, dans la partie suivante notre proposition d'un système d'aide à décision pour l'anticipation et la gestion des situations de tension pour un service d'urgence.

#### **4. Spécification d'un SAD pour un service d'urgence**

Nous avons retenu les caractéristiques suivantes pour caractériser un SAD pour les services d'urgence : le contexte, les objectifs du SAD, les exigences fonctionnelles du SAD, le type de décision et le processus décisionnel dans un SU, les bonnes pratiques et recommandations d'usage présentées dans la littérature.

##### **4.1. Le contexte**

Le contexte du cadre opérationnel d'un SU est caractérisé par plusieurs facteurs rendant sa gestion complexe que nous rappelons brièvement :

- l'environnement est dynamique, perturbé et incertain,
- certains éléments qui caractérisent l'activité de soins sont non-déterministes (temps de traitement, les attentes, examens complémentaires),
- globalement, l'arrivée du patient au SU est imprévue ou inattendue,
- chaque patient a besoin d'un traitement spécifique qui diffère en fonction de sa pathologie et implique un itinéraire spécifique au sein du SU,
- il n'y a pas de connaissance préalable concernant les patients nécessitant un traitement d'urgence durant une période de temps donnée (on peut cependant noter que des informations sur l'état du patient peuvent être fournies par les véhicules d'urgences : SMUR, pompiers, ambulances).

le décideur est confronté à une "situation décisionnelle" ou "décision en situation" (Lebraty and Pastorelli-Nège, 2004). Ce concept traduit le fait que l'analyse d'une décision doit intégrer le contexte dans lequel elle est prise. Il est à rapprocher du concept de "relativité situationnelle" de l'urgence (Weckel, 2010). Le temps disponible pour formuler des décisions est variable en fonction de la situation. Pour un responsable de SU, l'espace-temps de l'urgence se mesure souvent en minutes et l'enjeu (réel ou perçu) est un facteur de cette relativité situationnelle. La difficulté réside dans cette intersection entre diminution relative du temps disponible et enjeu. Par ailleurs, la décision dans un contexte d'urgence est complexe et sujette à erreur.

#### **4.2. Les objectifs du SAD**

Conformément à ce que nous avons identifié au chapitre 2, l'objectif global recherché dans la mise en œuvre d'un SAD est d'améliorer la résilience du SU en assurant :

- l'élaboration des indicateurs de tension pertinents pour obtenir une image représentative de l'état du SU,
- l'aide au pilotage proactif, c'est-à-dire permettre la prévision à court et/ou à moyen terme et la détection de l'apparition de situations de tension, s'appuyant sur les indicateurs de tension, l'aide à la mise en œuvre d'actions correctives efficaces et adéquates à chaque occurrence potentielle ou effective d'une situation de tension et l'évaluation de ces actions,
- l'aide au pilotage réactif s'appuyant également sur les indicateurs de tension,
- la capitalisation des connaissances sur les comportements du SU pour mieux faire face aux futures tensions (apprentissage, retour d'expériences) et favoriser la formation du personnel.

Le SAD pour le service d'urgence devra donc mettre en œuvre l'ensemble des fonctions nécessaires pour la réalisation de ces fonctions d'aide.

#### **4.3. Les exigences fonctionnelles d'un SAD pour un SU**

Le processus de décision au sein d'un SU implique que le SAD doit répondre aux exigences suivantes :

- permettre au décideur de contrôler l'ensemble des étapes du processus de décision et pouvoir, à tout moment, remettre en cause les recommandations faites par le SAD. Le SAD doit aider le décideur et non se substituer à lui,
- offrir des modèles permettant d'expérimenter différentes stratégies sous différentes conditions,
- fournir une aide pour différentes catégories d'utilisateurs ou des groupes d'utilisateurs,
- être suffisamment flexible pour que le décideur soit capable de les adapter face à de nouvelles conditions (ajouter, combiner, modifier les variables du processus de décision, et les différents calculs fournissant ainsi une réponse rapide à des situations inattendues).

#### **4.4. La décision organisationnelle dans un SU**

Nous proposons deux caractérisations des décisions en ne considérant que les décisions organisationnelles (c'est-à-dire concernant la gestion des situations de tension du SU) mais non les décisions d'ordre médical. Ces classifications sont présentées :

- table III-2, s'appuyant sur les critères de classification de la table III-1,
- table III-3, selon l'objectif de résilience.

Table III-2 : Nature des décisions organisationnelles dans un SU

Horizon de la décision	Tactique/moyen terme (mensuelle, annuelle), opérationnelle/court terme, très court terme (minute, heure, jour)
Contexte de la décision	Le contexte est : <ul style="list-style-type: none"> <li>- social : vis-à-vis des patients (leur apporter les soins adaptés dans les meilleures conditions possibles), vis-à-vis des personnels (prise en compte de la situation psychologique et de fatigue)</li> <li>- lié à la situation décisionnelle</li> <li>- dynamique : par la nature même de l'activité du SU</li> </ul>
Environnement incertain	Le système est globalement non-déterministe en raison de la non connaissance a priori : du nombre exact d'arrivée des patients, du type et la gravité de pathologie, de l'âge des patients, de la nature et de la durée de chaque procédé de traitement, dépendant des éléments précédents
Caractère unique/répété de la décision	La décision dépend de la situation. Elle peut être unique si la situation est nouvelle, répétée si la situation est jugée comparable à une situation antérieure
Périodicité, fréquence	La décision est essentiellement événementielle, liée à l'arrivée de patients et à l'apparition éventuelle d'une situation de tension
Décision temps réel	La décision est prise en temps réel dans le cas de la gestion réactive. Dans le cas de la gestion proactive, c'est le rôle du SAD de permettre d'anticiper les décisions organisationnelles afin d'éviter les situations de tension.
Champ de la décision	Planification : des personnels, des ressources matérielles et des patients Pilotage/régulation : affectation des personnels, distribution des tâches, gestion des situations de tension
Domaine de la décision	La décision concerne les aspects : <ul style="list-style-type: none"> <li>- humains : elle touche les patients et les personnels du SU</li> <li>- organisationnels : recherche de la résilience maximale</li> <li>- économiques : chaque décision a nécessairement un impact économique</li> </ul>
Contraintes	Elles sont de nature : <ul style="list-style-type: none"> <li>- temporelles : le temps de réaction peut être très court (décision en temps réel) tout particulièrement en situation de tension</li> <li>- humaines : disponibilité et compétences des ressources humaines</li> <li>- organisationnelles : limitations des espaces et de leurs fonctionnalités</li> <li>- économiques : restrictions budgétaires, augmentation des coûts...</li> </ul>
Caractère partagé ou non de la décision	<ul style="list-style-type: none"> <li>- décideur unique</li> <li>- décision de groupe (dans certains cas, la décision est établie avec des responsables de plusieurs services)</li> </ul>
Niveau de structuration de la décision	Les décisions au sein d'un SU en situation de tension ne sont en général pas programmables en raison de l'environnement incertain. Cependant certaines décisions organisationnelles peuvent être programmées si le SU peut mettre en œuvre une gestion proactive permettant à court ou moyen terme de déclencher les actions nécessaires pour conserver un fonctionnement satisfaisant
Perception du problème	La perception de la situation de tension au SU est difficile en raison des diversités des situations. Elle nécessite de disposer des indicateurs appropriés pour estimer, dans des délais très brefs, l'état du SU.
Critères de sélection	Une décision concernant une action de correction est par nature multicritère : elle dépend en particulier de l'état du système et des contraintes humaines et organisationnelles. Toutefois en situation de tension, le temps de réaction du décideur est restreint et la décision va s'appuyer sur un unique indicateur (e.g. nombre de patients dans le service d'urgence).

Table III-3 : Nature de décision dans le cadre d'un SU / objectif de résilience

Concepts de résilience d'un SU	Caractéristiques et nature des décisions dans un service d'urgence					
	Caractéristiques	Méthodes d'étude et outils	Objet de la décision	Horizon temporel	Domaine de la décision	Niveau de décision
Anticiper l'occurrence des situations de tension	Prévision des perturbations à court et moyen terme  Détection précoce des situations de tension	-Méthodes de prévision et de détection des situations de tension  -Simulation de l'efficacité des actions de correction	Proposer et évaluer des actions adaptées à chaque situation de tension	Moyen (semaine, mois) et long terme (année)	-Gestion des ressources humaines et matérielles  -Prévenir d'autres services externes au SU	Stratégique  et  tactique
Réagir rapidement à l'occurrence des situations de tension	Surveillance en temps réel des états du SU (indicateurs de tension)	- Méthodes de détection et de surveillance en temps réel - Modèle de simulation du SU	- Appliquer des actions disponibles et adaptées à chaque perturbation - Proposer et simuler rapidement l'efficacité des actions correctrices	Court et très court terme (heure(s) journée)	-Ajouter et/ou adapter les ressources humaines et matérielles -Agir sur l'ordre de priorité des patients	Opérationnelle

#### 4.5. Le processus décisionnel dans un service d'urgence

Dans le cas des services d'urgence, il apparaît qu'une démarche de rationalité limitée pour la résolution de problème est la seule applicable. En effet, les situations rencontrées lors du fonctionnement d'un SU sont en général complexes et contraintes temporelles impliquent de réaliser un choix en un temps limité en particulier dans le cas du pilotage réactif.

Par ailleurs, les informations dont dispose le décideur sont très souvent incomplètes et/ou imparfaites. On notera également, que compte tenu du contexte, le décideur a des capacités de traitement de l'information limitées. Cela le conduit ainsi à prendre des décisions "satisfaisantes" mais non-optimales.

La prise de décision doit s'effectuer dans deux contextes : proactif et réactif. On peut faire l'analogie avec la prise de décision pour le pilotage des systèmes de production (Berchet, 2000; Mirdamadi, 2009) :

- le pilotage proactif : il recouvre le pilotage prédictif (destiné à prévoir une activité, pour laquelle la prise de décision est basée sur des paramètres estimés de manière déterministe ou probabiliste), et l'anticipation des perturbations. Il permet en se basant sur divers scénarios d'identifier les risques de ne pas maintenir le SU en situation normale face à des perturbations. Il concerne le court, moyen (journée, semaine, mois) et long terme (année),
- le pilotage réactif doit réagir en temps réel par rapport à l'apparition d'événements imprévus, d'aléas et de dérives. Ce pilotage se fait donc durant le fonctionnement du SU et sans anticipation. Il concerne le très court terme (minute, heure). Il est nécessaire :
  - dans le cas d'un événement imprévisible survenant sans avoir été anticipé,
  - dans le cas de dérives pouvant conduire à un glissement du SU vers un état dégradé ou critique.

Le décideur doit ainsi :

- identifier l'état du SU (prévisionnel dans le cas du pilotage proactif, courant dans le cas du pilotage réactif),
- rechercher une action correctrice (à moyen terme si une situation de tension risque d'apparaître (proactif) ou court et très court terme) ou est apparue (réactif),
- évaluer l'impact de cette action sur le comportement du SU,
- lancer l'action correctrice s'il la juge satisfaisante, en rechercher une autre dans le cas contraire.

Ces différents aspects précédents impliquent que le SAD constitue un SIAD (Akharraz, 2004). Ceci nous a conduit à proposer un modèle de processus décisionnel inspiré des travaux sur l'approche couplée homme/machine de la résolution de problèmes et la modélisation du processus de décision (Cardin, 2007; Bouamrane and Tahon, 2005; Millot, 1988; Rasmussen, 1985). Il correspond au niveau "Aide à la décision" proposé par (Endsley and Kaber, 1999).

#### 4.6. Modèle de processus décisionnel

L'identification de l'état du SU,  $E(SU)$ , permet au responsable du SU d'évaluer l'état du SU. Une situation de tension, prévisionnelle ou réelle, peut alors éventuellement être détectée lors de l'évaluation.

Le responsable peut alors mettre en œuvre différents modes de prise de décision (figure III-1) :

- **Décision individuelle directe (I)** : le responsable du SU connaît l'action(s) de correction(s) qui répond(ent) efficacement à la situation détectée. Dans ce cas, le manager prend la décision directement et choisit l'action(s) sans évaluation pour application.

- **Recherche d'action de correction (2)** : le responsable du SU cherche à identifier une (des) action(s) exécutée(s) pour une même situation déjà identifiée dans le passé, ou une (des) action(s) de tension similaire(s) à la situation courante. Dans ce cas, il a le choix d'appliquer la (les) action(s) identifiée(s) qu'il juge efficace(s) après évaluation. Chaque action identifiée et appliquée pour une situation de tension donnée sera répertoriée dans la base de connaissances pour la gestion des futures situations de tension.

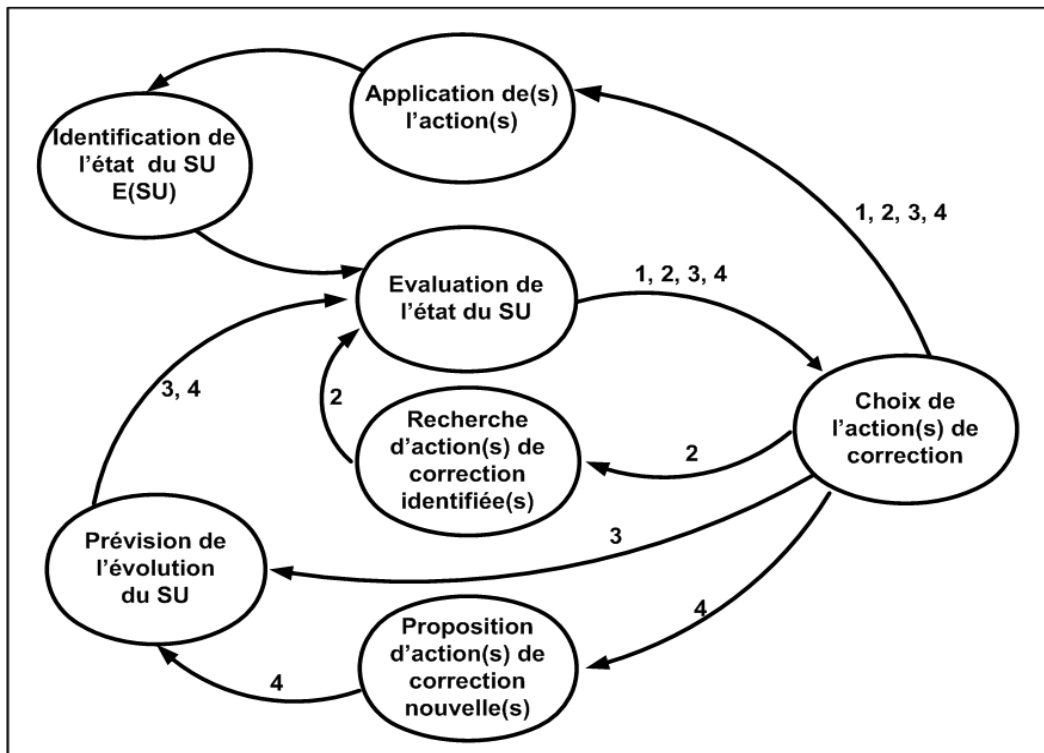


Figure III-1 : Processus de prise de décision pour le pilotage proactif/réactif d'un service d'urgence (SU).

- **Validation d'une action de correction identifiée (3)** : si le responsable du SU souhaite vérifier que l'action de correction identifiée est pertinente dans le contexte courant, il fait appel à la simulation puis à l'évaluation.
- **Recherche d'une nouvelle action de correction (4)** : si la base de connaissances ne contient pas d'action(s) correspondante(s) à la même situation ou à une situation similaire à la situation actuelle, il peut proposer d'autres actions correctives et vérifier leur efficacité en utilisant la simulation puis l'évaluation. Si l'action(s) proposée(s) est efficace(s), il l'applique directement. Sinon; il propose d'autres actions et simule à nouveau leurs effets et ainsi de suite jusqu'à obtenir une solution satisfaisante.



#### 4.7. Les bonnes pratiques et recommandations d'usage pour la conception d'un SIAD

Plusieurs auteurs ont proposé des recommandations pour la conception d'un SIAD (Bouamrane and Tahon, 2005; Adya and J., 2012; Cegarra and Wezel, 2012), notamment :

- description fonctionnelle du SAD à concevoir,
- implication des utilisateurs dans le processus de conception du SAD,
- réduire la charge informationnelle pour le décideur,
- proposer des alternatives autorisant un choix dans la décision,
- favoriser le développement d'un prototype qui sera affiné et finalisé après expérimentation et validation par les utilisateurs.

La prise en compte des considérations précédentes et les modèles d'architecture de SIAD proposés dans la littérature ont conduit à proposer pour le SIAD SAGEST l'architecture fonctionnelle présentée dans le paragraphe suivant.

### 5. Architecture fonctionnelle du SIAD SAGEST

L'architecture fonctionnelle du système d'aide à la décision pour l'anticipation et la gestion des situations de tension proposé (SAGEST) est présentée (figure III-2). Il comporte les fonctions suivantes :

- **Fonctions d'identification de l'état du SU :**
  - Prévision, qui permet la prédiction des situations de tension.
  - Détection, qui permet la détection des situations de tension.
  - Construction des indicateurs de tension.
- **Fonctions de recherche d'action(s) de correction :**
  - Mémorisation des situations de tension déjà identifiées. Elle permet de constituer la base de connaissances de SAGEST.
  - Simulation de processus de prise en charge des patients et des effets des actions de correction sur le comportement du SU.

- **Fonction d'interface utilisateur :**

Elle permet des requêtes interactives, la visualisation du suivi de l'état du SUP, ...

- **Fonction d'évaluation :**

Elle est utilisée pour l'évaluation de l'efficacité des actions de correction.

- **Fonction de mémorisation des données :**

Elle comporte :

- une partie statique : elle contient l'ensemble des données caractéristiques du SUP,

- une partie dynamique : valeurs des indicateurs, résultats des simulations, prévision et détection, des actions correctrices....

Nous précisons, dans la partie suivante, les fonctions ayant fait plus particulièrement l'objet de nos travaux de thèse : la prévision et la détection de situations de tension et la recherche d'action de correction.

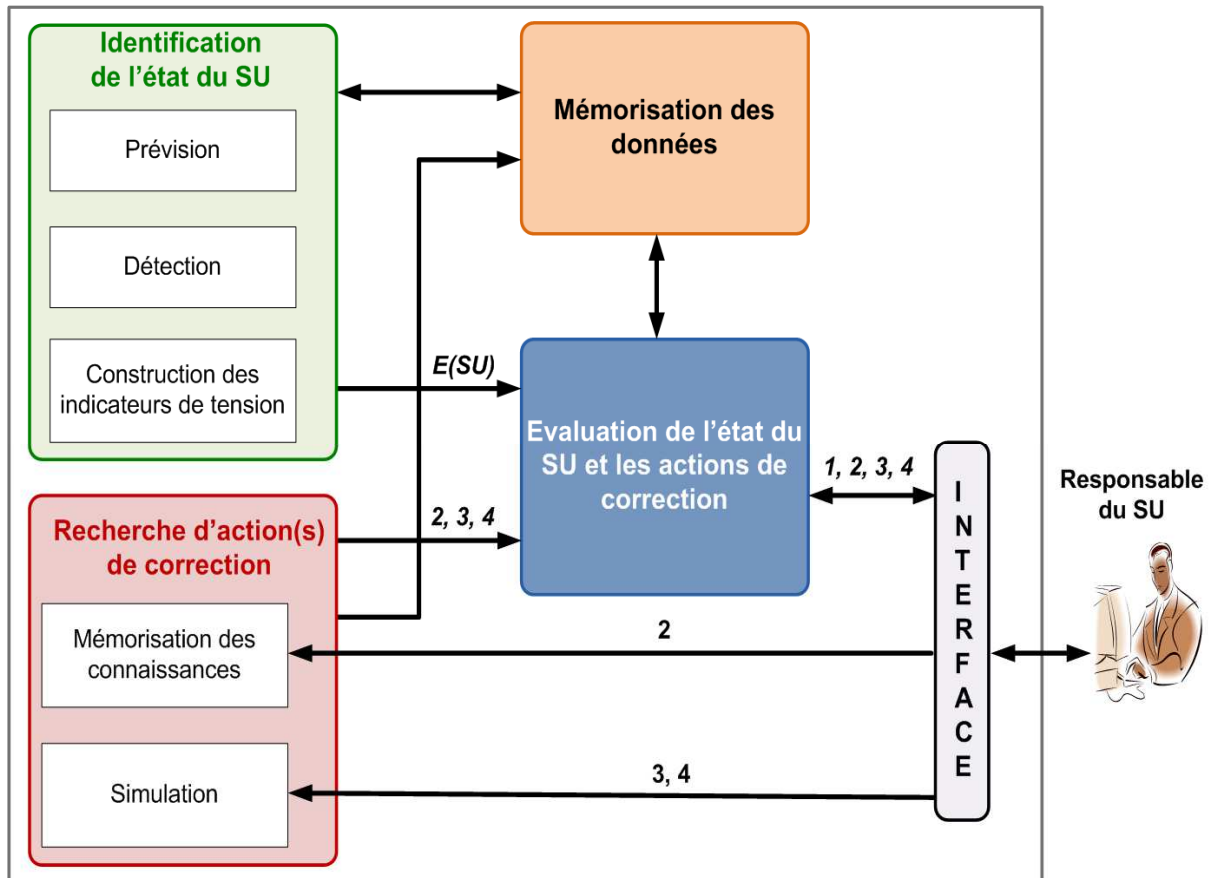


Figure III-2 : Architecture fonctionnelle du SAD SAGEST (les repères chiffrés correspondent à ceux de la figure III-1).

## 5.1. Identification de l'état du SU

### 5.1.1. Prévision

#### a) Les méthodes de prévision

Globalement, il existe 3 méthodes principales pour effectuer des prévisions

- **Les méthodes informelles** utilisent des experts, soit au travers de "focus groups", soit en utilisant des méthodes moins formalisées. Ces méthodes utilisent les connaissances implicites des experts, leur connaissance des phénomènes spéciaux, et d'événements

futurs. Ils apportent dans la prévision du futur tout ce qui ne s'expliquera pas par le passé.

- **Les méthodes extrapolatives** ne cherchent pas à expliquer l'historique, mais seulement à le prolonger. En fait, la seule variable "explicative" utilisée par les méthodes extrapolatives est le temps pour les saisonnalités.
- **Les méthodes explicatives** utilisent les valeurs passées d'une ou de k variables, (variables indépendantes), pour expliquer les variations de la variable étudiée Y (variable dépendante).

Les méthodes peuvent être combinées. Il est pertinent de recourir aux combinaisons lorsque les méthodes sont jugées complémentaires et qu'il existe une grande incertitude sur le meilleur modèle à employer.

Le choix de la fonction de prévision a été réalisé en prenant en compte les considérations suivantes :

- à l'heure actuelle, disposer des données concernant un centre hospitalier reste encore, pour de nombreuses raisons, relativement difficile. Nous avons donc privilégié une méthode permettant d'exploiter au mieux les données généralement disponibles dans un SU qui sont des relevés d'historiques de l'évolution de certaines caractéristiques du SU, notamment le nombre d'entrées au SU durant une période donnée,
- l'objectif étant principalement axé sur l'aspect proactif et réactif, nous avons retenu une méthode extrapolative permettant de modéliser et d'exploiter ces historiques. Ainsi, nous avons utilisé les modèles de séries chronologiques adaptés à notre objectif et aux données disponibles.
- l'utilisation et validation de ces modèles dans le domaine hospitalier,
- la possibilité de combinaison avec d'autres méthodes (méthodes de détection),
- la facilité de mise en œuvre des méthodes.

#### **b) L'analyse par les séries chronologiques**

L'analyse par les séries chronologiques est l'un des outils les plus utilisés dans la prévision des valeurs futures d'une série de données (Madsen, 2007; Shumway and Stoffer, 2011). L'avantage de ces méthodes réside dans leur simplicité, leur efficacité et leur attractivité dans les applications pratiques (Kadri et al., 2014a; Shumway and Stoffer, 2011).

L'analyse des séries chronologiques a deux objectifs principaux :

- le premier est d'identifier la nature du phénomène représenté par la séquence d'observations,
- le deuxième est la prévision qui consiste à prévoir les valeurs futures de la série chronologique à partir de ses valeurs observées.

Les méthodes de séries chronologiques sont des outils intéressants pour prédire les demandes de soins aux urgences hospitalières. Elles sont très utilisées en raison de leurs

facilités d'utilisation, de mise en œuvre et d'interprétation dans le cadre de la modélisation et de la prévision des situations de tension aux services d'urgence (Kadri et al., 2014a, 2014b).

Les travaux qui existent dans la littérature sur les modèles de prévision basés sur les séries chronologiques et les principales étapes de construction et validation des modèles sont présentés dans le chapitre IV.

### 5.1.2. Approches de détection d'anomalies

La surveillance d'un système dynamique a pour objectif de déceler les comportements qui diffèrent d'un fonctionnement normal. Le rôle de la surveillance est de suivre les évolutions du comportement du système et de collecter des informations pertinentes pour la prise de décisions dans le cas d'une défaillance ou d'un événement anormal. La surveillance regroupe deux fonctions principales (Isermann, 2011; Montgomery, 2012) :

- l'acquisition de données : utilisée pour la reconstitution de l'état réel du système,
- la détection : elle consiste à définir, dans une première phase, un certain comportement du système considéré comme normal ou comportement de référence; dans une seconde phase, à observer le comportement de ce dernier. Tout écart par rapport au comportement normal est alors signalé.

La nécessité de détection rapide et précise des situations anormales a attiré l'attention de chercheurs de différents domaines. Au cours de la dernière décennie, plusieurs techniques de détection ont été développées et appliquées dans plusieurs domaines (Hwang et al., 2010; Isermann, 2006; Venkatasubramanian et al., 2003).

La classification des principales méthodes de détection peut être réalisée selon plusieurs critères tels que la nature de l'information disponible (quantitative ou qualitative), la dynamique du système (continu, discret ou hybride), la structure de prise de décision (centralisée, décentralisée ou distribuée). Nous proposons une classification non exhaustive des méthodes de détection selon deux grandes catégories : les approches à base de données (*Data-based approach*) ou approches de détection sans modèles, et les approches à base de modèles (*Model-based approach*) (Hwang et al., 2010; Qin, 2012; Venkatasubramanian et al., 2003). Pour plus de détails sur ces deux catégories d'approches, le lecteur peut se référer aux travaux de (Basseville and Nikiforov, 1993; Venkatasubramanian et al., 2003; Zemouri, 2003; Mouzakis, 2013) . Les deux catégories d'approches sont présentées brièvement ci-dessous (figure III-3).

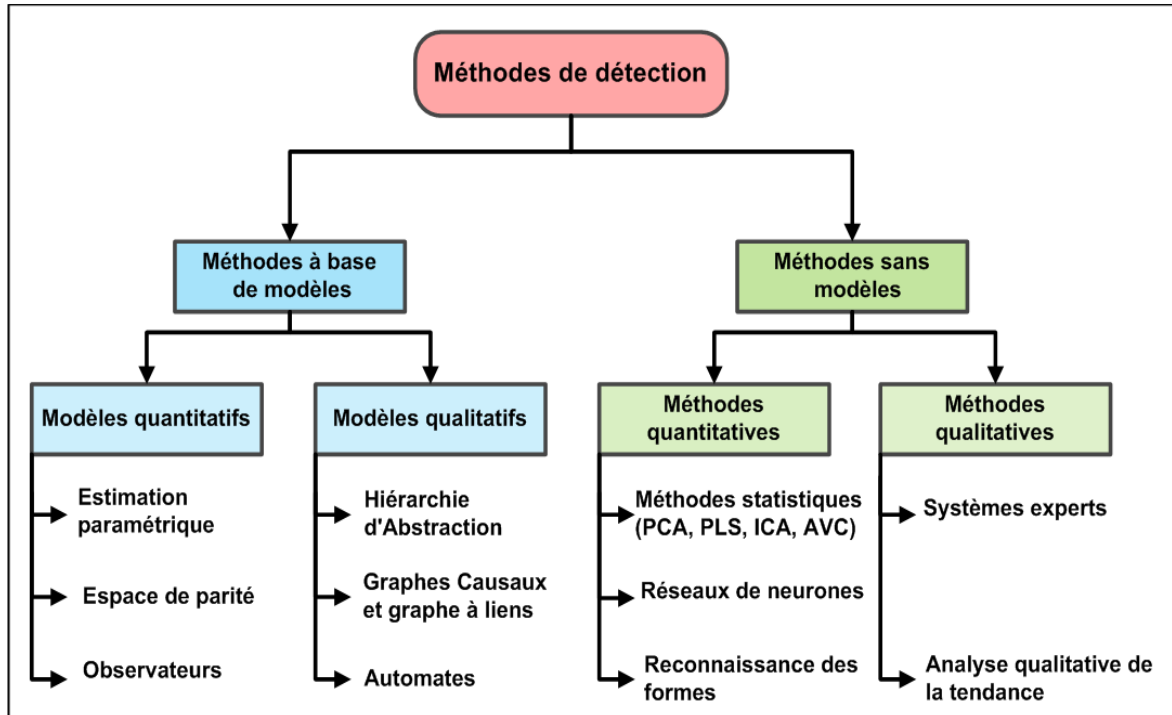


Figure III-3 : Classification des méthodes de détection.

### 1) Les approches de détection d'anomalie à base de modèles.

Dans cette catégorie, la détection d'anomalie est basée sur un modèle (quantitatif ou qualitatif) qui décrit le comportement du système surveillé. La détection est effectuée en comparant les variables mesurées du système avec les informations obtenues à partir d'un modèle (Dai and Gao, 2013; Isermann, 2006).

Parmi les approches de détection à base de modèles, deux classes importantes peuvent être distinguées selon le type du modèle :

- a) **Modèles quantitatifs** : les approches de détection à base de modèles quantitatifs utilisent des modèles mathématiques décrivant le comportement du système. Si l'écart entre ces modèles et les variables du système dépasse un certain seuil, une anomalie est alors détectée. Les méthodes les plus utilisées sont :
  - l'estimation paramétrique : elle consiste, les paramètres en fonctionnement nominal étant connus, à identifier les paramètres caractérisant le fonctionnement réel, à partir de mesures des entrées et des sorties du système (Lehmann and Romano, 2005),
  - l'espace de parité : cette méthode repose sur la vérification de la cohérence (parité) des modèles du système avec les mesures des entrées connues (Gertler, 1998),
  - observateurs : cette méthode se base sur la reconstruction de la sortie du système à l'aide d'observateurs; cette dernière est comparée avec la sortie mesurée (Larroque, 2008).
- b) **Modèles qualitatifs** : les approches de détection à base de modèles qualitatifs permettent de représenter le comportement du système (avec un certain degré d'abstraction) à travers des modèles de type symbolique. Ils décrivent, en termes de

modes de fonctionnement, l'espace d'état continu du système. Parmi les méthodes les plus utilisées on peut citer la méthode de la Hiérarchie d'Abstraction (Rasmussen, 1985), les graphes causaux (Mosterman, 2001) et les graphes à liens ou bond graphs (Feenstra et al., 2001), et les automates d'états finis (Bhowal et al., 2007).

Pour atteindre l'objectif de la gestion réactive d'occurrence des situations de tension au SU, nous avons retenu les approches de détection à base de modèles quantitatifs car elles permettent d'établir et de surveiller l'état du SU. Par ailleurs, les méthodes paramétriques issues de l'analyse des séries chronologiques (e.g : ARMA et ses variantes) permettent de décrire le comportement du SU en se basant sur les données historiques issues de la base de données du SU.

Nous proposons donc de coupler les modèles d'analyse de séries chronologiques avec les cartes de contrôle MSP (Maîtrise Statistique des Processus) pour développer une méthodologie pour la détection de l'occurrence des situations de tension dans un SU. Cette méthodologie est présentée au chapitre IV.

## 2) Les approches de détection d'anomalie à base de données

Contrairement à la première catégorie, cette catégorie d'approches exploite directement les données du système surveillé et seul un historique des données du système est nécessaire (Venkatasubramanian et al., 2003). Ces approches utilisent les données recueillies dans des conditions normales de fonctionnement du processus de production pour construire un modèle empirique qui représente le comportement normal du système sous contrôle. Ce modèle est ensuite utilisé pour détecter des anomalies dans le comportement du système surveillé. Parmi les approches de détection à base de données, on distingue deux types :

- a) **Approche quantitative** : parmi ces approches on trouve les méthodes statistiques de régression des moindres carrés partiels (Partial Least Square - PLS) (Tenenhaus, 1998), l'analyse en composantes principales, ACP (Principal Component Analysis, PCA) (Jolliffe, 2013; Mnassri, 2012), l'analyse en composantes indépendantes (ICA) (Hyvärinen et al., 2001), l'analyse de variables canoniques (AVC) (Chiang et al., 2001), les réseaux de neurones (Subbaraj and Kannapiran, 2010), les méthodes de reconnaissance de formes (Ondel, 2006).
- b) **Approche qualitative** : parmi ces approches on trouve :
  - les systèmes experts qui utilisent une information heuristique pour lier les symptômes aux pannes (Adeli, 2003),
  - l'analyse qualitative de la tendance (Qualitative Trend Analysis, QTA) basée sur les données, souvent utilisée pour la surveillance et la détection des anomalies dans les processus de production. Elle fonctionne en représentant des signaux mesurés comme une séquence de formes de base, appelé primitives (Balasko et al., 2007).

Dans notre étude, nous avons utilisé les approches quantitatives de détection d'anomalies à base de données. En effet, dans le cas des services d'urgence où plusieurs variables sont hautement corrélées, la construction de modèles expliquant les corrélations entre les variables est généralement difficile à réaliser. En outre, le temps nécessaire pour y parvenir est élevé.

Par ailleurs, certaines de ces méthodes peuvent être combinées avec d'autres méthodes de détection. Dans cette logique, nous proposons de coupler le modèle ACP avec les cartes de contrôle MSPM (Maitrise Statistiques des Processus Multivariés) pour développer une méthodologie pour la détection de l'occurrence des situations de tension dans un SU. Cette méthodologie est présentée chapitre IV.

## 5.2. Recherche d'actions de correction

La recherche d'actions de correction s'effectue dans deux cas (figure III.4, c.f. § 5.3) :

- validation d'une action de correction identifiée : le responsable du SU recherche une action identifiée et répertoriée dans la base de connaissances et vérifie que l'action de correction identifiée qu'il a retenue est pertinente dans le contexte courant. Cette vérification s'effectue soit par le responsable lui-même (2), soit par simulation pour prévoir le comportement du SU (3),
- recherche d'une nouvelle action de correction : lorsque la base de connaissances ne contient pas d'action de correction adaptée à la situation courante le responsable du SU propose lui-même une action à évaluer (4).

Les actions de correction identifiées sont mémorisées dans la base de connaissances du système SAGEST.

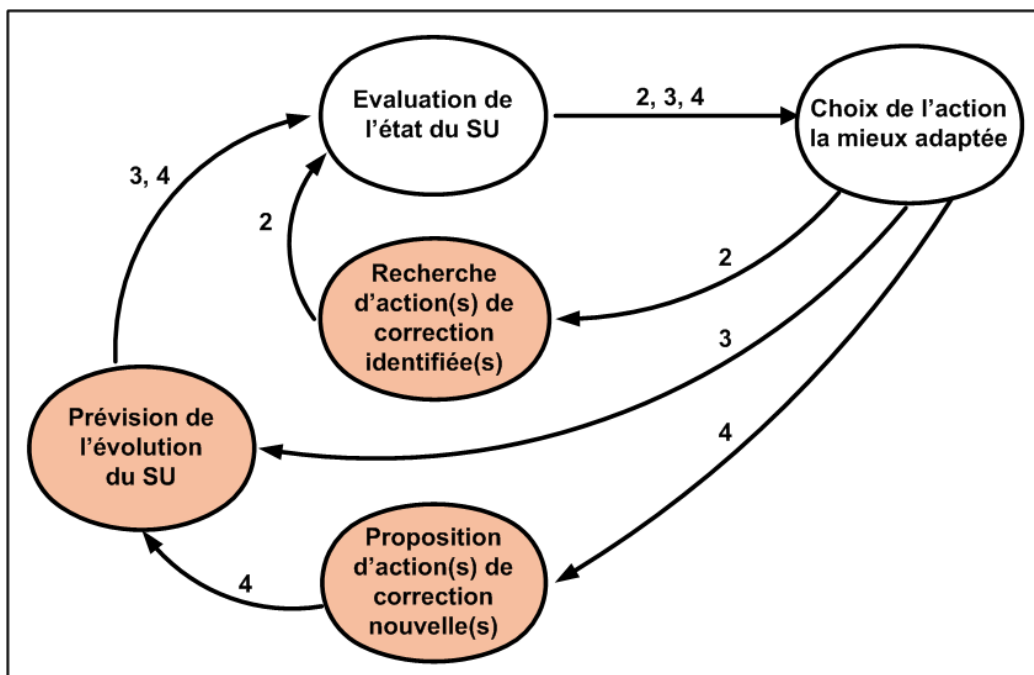


Figure III-4 : Recherche d'actions de correction.

### 5.2.1. Mémorisation des connaissances

La base de connaissances du système, SAGEST, contient un ensemble d'informations caractérisant les situations de tension déjà identifiées. Pour faciliter la recherche, l'interprétation et le choix des actions de correction à appliquer par l'utilisateur, ces situations

sont mémorisées dans la base de connaissances selon le modèle CAST (Cas de Situation de Tension) représenté figure III-5.

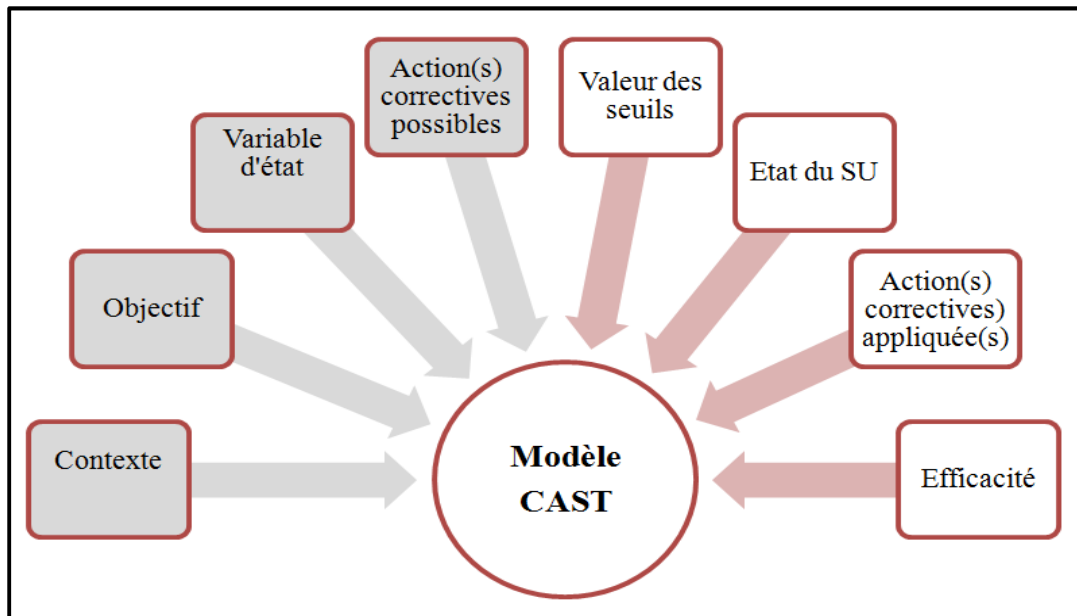


Figure III-5 : Modèle CAST.

Le modèle CAST est structuré selon un quintuplet :

$$\text{CAST} = (I_T, E_{SU}, V_S, A_P, E) \text{ où :}$$

- $I_T$  : indicateur de tension complété,  $I_T = [C, O, V_E, V_A]$ , (C : contexte, O : objectif,  $V_E$  : variable d'état,  $V_A$  : variable d'action de correction possibles) définis chapitre II, § 3.3.2),
- $E_{SU}$  : état du SU, il indique si le SU était en état dégradé ou critique après l'occurrence de la situation de tension,
- $V_S$  : rappelle quelles sont les valeurs des seuils correspondant au passage d'un état à un autre pour l'indicateur concerné suite à l'apparition d'une (de) perturbation(s),
- $A_P$  : indique quelle(s) action(s) de correction a (ont) été appliquée(s),
- $E$  : indique l'efficacité de l'action de correction (des actions) appliquée(s). L'efficacité peut s'exprimer en termes :
  - de temps caractéristique de la réponse du SU à un type de perturbation. On peut par exemple utiliser le temps de récupération  $T_R$ , temps nécessaire pour que le SU retrouve son état normal après application effective de l'action corrective et/ou le temps de recouvrement  $T_{REC}$ , temps nécessaire pour que le SU retrouve son état normal après lancement d'une action correctrice (Voir table II-4 du chapitre II),
  - de résilience du SU, calculée selon les formules (II.2) à (II.5).



### 5.2.2. Simulation

La simulation constitue une fonction importante de SAGEST. La simulation, outil privilégié pour l'étude du comportement des systèmes dynamiques complexes (Babin and

Greenwood, 2011; Thorwarth, 2011), il est largement utilisé dans le cas des services d'urgence (Belaidi et al., 2007; Diefenbach and Kozan, 2008; Jones and Evans, 2008; Kadri et al., 2014c; Taboada et al., 2013; Thorwarth, 2011).

Dans notre cas, la simulation intervient lors de la phase de prévision du comportement du SU selon le processus décisionnel figure III-6 (c.f. & 5.3).

Elle est exploitée pour l'évaluation a priori et a posteriori en permettant :

- la prévision de l'évolution du comportement du SU,
- la visualisation du processus de prise en charge des patients et l'évolution des situations de tension en se basant sur les indicateurs associés à chaque situation de tension,
- le test d'alternatives (actions de correction, adaptation du personnel médical) avant leur mise en œuvre afin d'analyser les scénarios simulés et d'améliorer la prise de décision et l'évaluation de leur efficacité,
- l'évaluation des paramètres de la résilience du SU (capacité de soins, qualité organisationnelle de soins, temps de recouvrement, temps d'attente, etc.).

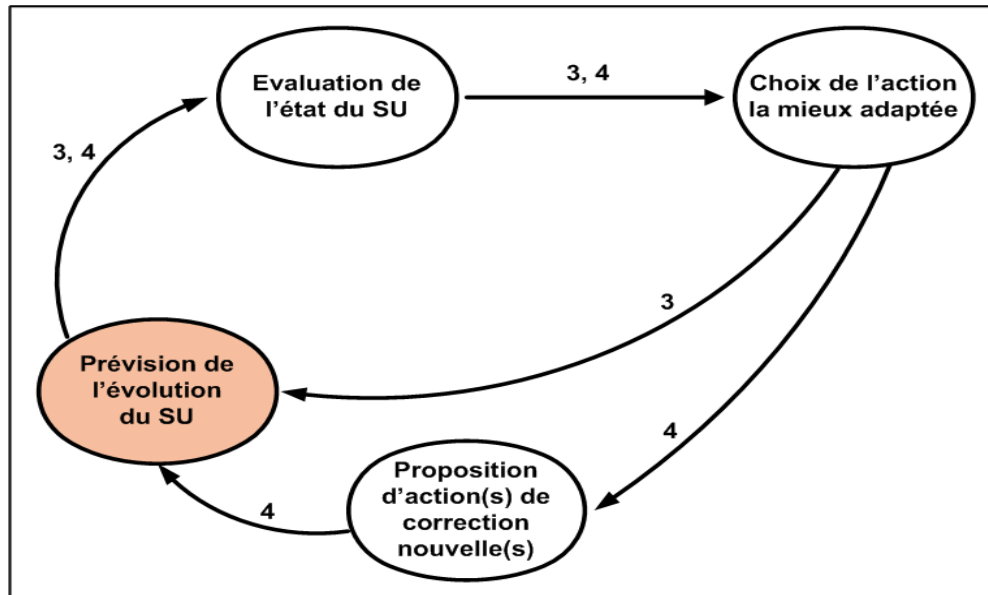


Figure III-6 : Simulation du comportement du SU.

### 5.3. Evaluation

L'évaluation comporte deux types d'évaluation :

- évaluation de l'état du SU,
- évaluation des actions de correction.

### 5.3.1. Evaluation de l'état du SU

L'évaluation de l'état du SU s'appuie essentiellement sur les indicateurs de tension. Le responsable du SU dispose des indicateurs de tension lui permettant de suivre l'évolution du fonctionnement du SU :

- soit par analyse en temps réel des indicateurs de tension. Naturellement, cela implique que le SU soit instrumenté en conséquence si l'on souhaite que cette évaluation ait lieu en temps réel,
- soit en s'appuyant sur les résultats fournis par la simulation.

### 5.3.2. Evaluation des actions de correction

Le processus d'évaluation s'effectue, dans ce cas, à l'aide de la simulation. Elle s'effectue suivant le processus décisionnel décrit dans la figure III-1. Les actions de correction sont soit des actions de correction identifiées, soit une nouvelle action de correction proposée par le responsable du SU.

Si, après examen de l'efficacité d'une action proposée, le SU demeure dans l'état dégradé ou critique, le manager peut proposer de nouvelles actions de correction. Une nouvelle simulation sera réalisée pour vérifier l'efficacité de ces nouvelles actions. Ce processus est répété jusqu'à ce que le SU retrouve un état de fonctionnement normal. Dans ce cas, les actions de correction jugées efficaces associées à la situation de tension traitée seront appliquées et la règle de gestion sera répertoriée dans la base de connaissances selon le modèle CAST.

## 5.4. Interface utilisateur

L'acceptabilité d'un outil par les utilisateurs finaux est un des éléments indispensable à son succès. Or, seule une prise en compte efficace des aspects d'utilité et d'utilisabilité permet de garantir l'adhésion des utilisateurs. L'importance de l'ergonomie dans les projets technologiques en termes de retours sur investissement a ainsi été démontrée à de nombreuses reprises. Il est indispensable :

- d'identifier les besoins réels des utilisateurs de l'outil, et ce dès la phase de conception,
- de respecter les préconisations de la norme ISO-9241 (Ergonomie des interactions homme-système) et plus particulièrement la norme NF EN ISO 9241-210<sup>14</sup>.

On peut distinguer deux types d'interfaces :

- Interface personnelles (favoriser l'aspect prédictif en présentant les indicateurs de tension (e.g.: temps de séjour dynamique d'un patient au SU, la priorité de passage des patients, ...))
- Interface patient : pour le patient, un élément important est de connaître son temps de

---

<sup>14</sup>NF EN ISO 9241-210 - Ergonomie de l'interaction homme-système – Partie 210 conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs. Janvier 2011.

séjour au fur à mesure du déroulement de sa prise en charge au sein du SU.

Pour la thèse, les interfaces n'ont pas fait l'objet d'une étude spécifique de notre part. En effet, dans le cadre du projet HOST, une équipe d'ergonomes du laboratoire CERIM (EA 2694) en est plus particulièrement chargée en collaboration avec les autres partenaires. Nous avons cependant créé une interface permettant de tester les modèles précédents. Elle est présentée chapitre VI.

## **6. Conclusion**

Dans ce chapitre, après avoir présenté brièvement les aspects fondamentaux de la prise de décision et les principales caractéristiques des systèmes d'aide à la décision, nous avons présenté les systèmes d'aide à la décision dans le domaine hospitalier. Nous avons caractérisé, dans un deuxième temps un système d'aide à la décision pour l'anticipation et la gestion efficace des situations de tension dans un service d'urgence et proposé une architecture fonctionnelle d'un tel système. Les fonctions essentielles ont ensuite été décrites.

Le chapitre IV présente les différentes méthodes (prévision et détection) et outils (simulation) utilisés pour le système SAGEST.

# Chapitre IV : Les modèles du système SAGEST

## 1. Introduction

Le chapitre III a présenté l'architecture fonctionnelle du système d'aide à la décision pour la gestion efficace des situations de tension (SAGEST) dans les services d'urgence. Ce chapitre présente les modèles de prévision et de détection de situation de tension et les modèles de parcours patients que nous avons utilisés dans la conception du système SAGEST.

La première partie présente l'utilisation des séries chronologiques pour la prévision dans le domaine hospitalier. Les méthodes de prévision utilisées s'appuient sur des modèles de séries chronologiques univariés et multivariés.

Dans la deuxième partie, après avoir présenté les méthodes de détection d'anomalies basées sur la Maîtrise Statistique des Processus (MSP), nous proposons deux méthodes de détection des situations de tension. La première, à base de modèles, combine les modèles de séries chronologiques et les cartes de contrôle MSP. La seconde, à base de données, combine la méthode d'analyse de données multivariées ACP (Analyse en Composante Principale) et les cartes de contrôle MSPM (Maîtrise Statistique des Processus Multivariés).

La dernière partie décrit la modélisation des processus de prise en charge au sein d'un SU selon le type des patients en se basant sur l'état du patient à son arrivée au SU (critique, urgent, non urgents) et la nécessité ou non d'examens complémentaires.

## 2. Modèles de prévision

### 2.1. Modèles de séries chronologiques

L'analyse par les séries chronologiques est l'un des outils les plus utilisés dans la prévision (Kadri et al., 2014a). Beaucoup de techniques de prévision de séries chronologiques sont référencées dans la littérature, et elles peuvent être classées en deux catégories principales : les techniques univariées et les techniques multivariées (Wei, 2006). Les techniques univariées analysent une seule variable tandis que les techniques multivariées portent sur l'analyse simultanée de deux ou plusieurs variables. Une présentation générale de l'analyse par les séries chronologiques est donnée en annexe A.

Les méthodes de modélisation des séries chronologiques sont des outils intéressants pour prédire les demandes de soins aux urgences. Elles sont très utilisées en raison de leur facilité d'utilisation, de mise en œuvre et d'interprétation dans le cadre de la modélisation et de la prévision des situations de tension aux services d'urgence provoquée par l'afflux de patients (Kadri et al., 2014b).

Le modèle ARMA (Autoregressive-Moving-Average), Autorégressif et moyenne mobile, est un outil d'analyse des séries chronologiques stationnaires très accessible tant au niveau des contraintes méthodologiques qu'au niveau des modèles mathématiques utilisés (modèles stochastiques linéaires). Les modèles ARMA ont été étendus selon deux approches :

- des modèles hybrides univariés ; les modèles ARMA, ARIMA et SARIMA. Ils peuvent être complétés en utilisant des variables explicatives exogènes représentant des mesures météorologiques (température, pollution, direction du vent...) ou les épidémies. Les modèles correspondant sont les modèles ARMAX (Auto-Régressifs Moyenne mobile avec variable exogène) ARX, ARIMAX, SARIMAX (Shumway and Stoffer, 2011).
- des modèles multivariés : un vecteur de variables dépendantes remplace la variable dépendante. Ces modèles comprennent l'auto-régression vectorielle, VAR (Jones et al., 2009), et ses extensions : VMA, VARMA, VARIMA.

Dans les deux parties suivantes nous présentons brièvement les deux modèles, univariés et multivariés.

### 2.1.1. Modélisation des séries chronologiques univariées

Le modèle Autorégressif et moyenne mobile, ARMA (p, q) combine une partie autorégressive (AR) et une partie moyenne mobile (MA) (voir Annexe A2.2) :

$$Y_t = \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t \quad (\text{IV.1})$$

où :

- $\sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i}$  : partie AR(p)
- $\sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j}$  : partie MA(q)
- $\varepsilon_t$  est un bruit blanc.

En utilisant l'opérateur de retard  $B$  (l'opérateur de retard  $B$  défini par:  $B^k Y_t = Y_{t-k}$ , opère sur les éléments de la série pour produire les éléments précédents), nous pouvons réécrire l'équation (IV.1) comme suit :

$$\begin{aligned} \emptyset(B)Y_t &= \Theta(B)\varepsilon_t, \\ \emptyset(B) &= (1 - a_1 B - a_2 B^2 - \dots - a_p B^p) \\ \Theta(B) &= (1 - b_q B - b_q B^2 - \dots - b_q B^q) \end{aligned} \quad (\text{IV.2})$$

Où :

- $\emptyset(B)$  est le polynôme de degré  $p$  des coefficients du processus autorégressif AR(p),
- $\Theta(B)$  est le polynôme de degré  $q$  des coefficients du processus en moyenne mobile MA(q).

Si la série chronologique étudiée n'est pas stationnaire on a recours à un modèle de type *ARIMA* (p,d,q) (*AutoRegressive Integrated Moving-Average*) (Box and Jenkins, 1976) où  $d$  est le degré de la courbe de tendance (ou degré d'intégration de la série). Le modèle ARIMA a été présenté comme l'approche la plus efficace pour modéliser une grande variété de séries

temporelles (Babai et al., 2013; Earnest et al., 2005; Ediger et al., 2006; Ediger and Akar, 2007; Hassan, 2014; Makridakis et al., 1998; Narayanan et al., 2013).

Le modèle SARIMA (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average) est une extension du modèle ARIMA pour inclure la saisonnalité. Il exploite la corrélation entre les données de la série à intervalles de temps successifs. Un modèle SARIMA d'ordre  $(p, d, q)$   $(P, D, Q)_S$ , dans lequel  $(p, d, q)$  représente la partie non saisonnière,  $(P, D, Q)$  représente la partie saisonnière, et  $S$  représente la longueur de la saisonnalité. La forme généralisée d'un modèle SARIMA peut s'écrire comme suit (Box et al., 2008; Cryer and Chan, 2009) :

$$\varphi_p(B)\Phi_P B^S \nabla^d \nabla_S^D y_t = \theta_q(B)\Theta_Q(B^S)\varepsilon_t \quad (IV.3)$$

où :

- $B$  est l'opérateur de retard,
- $\nabla$  est l'opérateur de différenciation ( $\nabla Y_t = y_t - y_{t-1}$ ),
- $\theta_p B^S$  est le polynôme de degré  $p$  des coefficients saisonniers du modèle AR,
- $\Theta_Q(B^S)$  est le polynôme de degré  $Q$  de coefficients saisonniers du modèle MA.

$$\nabla^d = (1 - B)^d$$

$$\nabla_S^D = (1 - B^S)^D$$

$$\varphi_p(B) = (1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_p B^p)$$

$$\Phi_P B^S = (1 - \Phi_1 B - \Phi_2 B^2 - \dots - \Phi_P B^P)$$

$$\theta_q(B) = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) \quad (IV.4)$$

$$\Theta_Q(B^S) = (1 - \Theta_1 B - \Theta_2 B^2 - \dots - \Theta_Q B^Q)$$

La méthode de Box et Jenkins nous permet de déterminer les paramètres du modèle SARIMA (Box and Jenkins, 1976; Makridakis et al., 1998). La procédure et les principales étapes nécessaires pour construire et valider un modèle de SARIMA sont présentées en annexe A.2.3.

### 2.1.2. Modélisation des séries chronologiques multivariées : modèle VARMA

Le modèle VARMA (*Vector AutoRegressive Moving Average* - modèle autorégressif moyenne mobile vectoriel) est une extension du modèle ARMA. Il constitue la classe la plus utilisée pour la modélisation des séries temporelles multivariées.

Le modèle  $VARMA_d(p,d)$  d'ordre  $d$  est donné par la formule suivante (Metaxoglou and Smith, 2007) :

$$y_t + \Phi_1 y_{t-1} + \dots + \Phi_p y_{t-p} = \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (\text{IV.5})$$

$$y_t = \sum_{i=1}^p \Phi_i y_{t-i} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (\text{IV.6})$$

où :

- $\varepsilon_t$  est un bruit blanc centré de variance nulle,
- $\Phi_i$  ( $1 \leq i \leq p$ ) et  $\theta_j$  ( $1 \leq j \leq q$ ) sont des matrices ( $d \times d$ ).

En utilisant l'opérateur de retard B précédent, l'équation (IV.6) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\Phi(B)Y_t = \theta(B)\varepsilon_t, t = 1, \dots, n \quad (\text{IV.7})$$

$$\begin{cases} \Phi(B) = I - \Phi_1 B - \dots - \Phi_p B^p \\ \theta(B) = I + \theta_1 B + \dots + \theta_q B^q \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

L'estimation des paramètres du modèle VARMA est fondée sur la méthode du maximum de vraisemblance gaussienne (Mélard et al., 2006). Il existe deux approches principales pour évaluer la fonction de vraisemblance exacte d'un modèle VARMA gaussien : une approche basée sur la factorisation de Cholesky (Quarteroni et al., 2008), et une approche basée sur le filtre de Kalman (Grewal and Andrews, 2011).

## 2.2. Utilisation des séries chronologiques dans le domaine hospitalier

La revue de la littérature montre que l'analyse des séries chronologiques a été largement appliquée dans le domaine hospitalier afin de prévoir les arrivées de patients (jours, mois, années) et la durée du séjour dans les unités d'hospitalisation.

Abdel-Aal and Mangoud, (1998) ont utilisé le modèle ARIMA pour modéliser les admissions mensuelles (entre 1986 à 1996) à la clinique de - Roi Fayçal, Al -Khubar, en Arabie Saoudite.

Jones et al., (2002) ont utilisé la méthode de Box-Jenkins (modèle ARMA) pour prévoir le nombre d'admissions quotidiennes et le nombre de lits occupés aux urgences de l'hôpital de Bromley au Royaume-Uni.

Martin Rodriguez and Caceres Hernandez, (2005) ont étudié les admissions aux services d'urgence de l'hôpital de Tenerife, Espagne (1997 -2002). Ils ont utilisé l'analyse des séries temporelles pour la prévision du nombre d'arrivées par heure aux urgences.

Champion et al., (2007) ont utilisé deux méthodes statistiques, un lissage exponentiel et le modèle de Box- Jenkins, pour prévoir le nombre d'admission mensuelle pour la période 2000 à 2005 aux urgences de l'hôpital régional de Victoria en Australie.

Sun et al., (2009) ont étudié les fréquentations quotidiennes des services d'urgence. Les auteurs ont conclu que l'analyse des séries chronologiques fournit un outil très intéressant et

facile à utiliser pour prédire la charge de travail des services d'urgence et pouvant être utilisé dans la planification des ressources.

Chen et al., (2011) après avoir collecté et analysé les données mensuelles sur cinq ans (2005 à 2009) issues de l'hôpital régional universitaire de Taiwan, ont utilisé le modèle ARIMA pour prédire les visites mensuelles des patients à l'hôpital. Les auteurs ont conclu que l'analyse des séries chronologiques avec le modèle ARIMA est une méthode incontournable dans la prévision à long-terme.

Bergs et al., (2014) ont appliqué un modèle de lissage exponentiel pour la prévision des arrivées mensuelles des patients aux urgences hospitalières en utilisant des données de quatre hôpitaux belges collectées sur une période de 6 ans (Janvier 2005 à Décembre 2011). Les auteurs ont conclu que l'utilisation d'une approche de lissage exponentiel automatisée peut fournir des prévisions mensuelles du nombre de visites des patients très utiles aux urgences hospitalières. Les résultats de la prévision peuvent être ensuite utilisés dans la prise de décision stratégique et la planification des interventions pour la gestion des tensions dans les services d'urgence.

### **3. Méthodes de détection d'anomalies pour la détection des situations de tension aux urgences hospitalières**

#### **3.1. Maîtrise statistique des processus (MSP)**

La Maîtrise Statistique des Processus (*Statistical Process Control - SPC*) est définie comme l'ensemble des méthodes et des actions permettant de détecter des changements dans un processus de production (Pillet, 2005). Les techniques de la MSP sont largement utilisées dans divers systèmes industriels pour surveiller le processus de production et en ingénierie de la qualité<sup>15,16</sup> pour améliorer la qualité des produits (Biau et al., 2011; Carey and Lloyd, 2001; Isermann, 2006; Montgomery, 2008).

La MSP est également très utilisée dans le domaine médical pour la surveillance des soins en anesthésie, en soins intensifs, la gestion des risques et en santé publique notamment pour le contrôle des taux d'infection, du taux de chutes de patients, des taux de décès et des temps d'attente de types variés (Albers, 2011; Mohammed et al., 2008; Thor et al., 2007).

Les cartes de contrôle ou *control charts* sont l'un des principaux outils de la MSP. Une carte de contrôle permet d'identifier l'état du processus en question, c'est à dire, s'il est en mode de fonctionnement normal ou pas (Montgomery, 2012). Longtemps réservée aux applications de contrôle qualité, l'utilisation des cartes de contrôle a été étendue à de

---

<sup>15</sup> AFNOR : norme nf iso 7870-1 avril 2008. Cartes de contrôle. Partie 1 : lignes directrices générales (2008)

<sup>16</sup> NF EN ISO 9000 Octobre 2005. Systèmes de management de la qualité - Principes essentiels et vocabulaire



nombreux domaines d'application, notamment l'économie, les systèmes de santé, l'informatique et l'environnement.

L'analyse de la performance utilisant les cartes de contrôle a commencé avec l'apparition de la carte de contrôle univariée de Shewhart (Pearson, 1935; Shewhart, 1931). puis d'autres types de cartes ont été développés et n'ont pas cessé d'évoluer CUSUM (Cumulative Sum charte, (Lucas, 1985; Woodall and Adams, 1993), EWMA, (Exponentially Weighted Moving Averages chart), (Hawkins and Olwell, 1998; Lucas et al., 1990). Cependant, l'évolution de systèmes régis par un grand nombre de variables qu'il faut maîtriser simultanément, a imposé l'apparition de nouvelles méthodes et cartes de contrôles multivariées.

Dans les deux sections suivantes, nous présentons brièvement les deux types de cartes de contrôles univariées et multivariées.

### 3.2. Contrôle statistique des processus univariés : cartes de contrôle univariées

Les trois cartes de contrôle univariées les plus utilisées dans la surveillance des processus et la détection des anomalies sont détaillées Annexe B.1 :

- La carte de contrôle Shewhart : la carte de Shewhart a été conçue pour visualiser l'évolution de la moyenne d'un processus (Shewhart, 1931). Elle met en évidence la tendance centrale du processus et deux limites de contrôle : la limite de contrôle inférieure (LCI) et la limite de contrôle supérieure (LCS). Une situation "hors-contrôle" est détectée lorsqu'une des deux limites de contrôle est dépassée (voir Annexe B.1.2). La méthode de Shewhart est l'une des plus simples pour la surveillance des anomalies, cette carte n'utilise que les mesures effectuées à l'instant  $t$ . Elles détectent uniquement les variations importantes.
- Carte CUSUM (Cumulative Sum Chart) : la carte CUSUM repose sur un modèle de processus dont les observations  $y_k$  suivent une distribution normale de moyenne  $\mu$  et d'écart-type  $\sigma$  (Lucas, 1985). La carte représente la somme cumulée de la différence entre les observations  $y_k$  et la valeur moyenne  $\mu$  ;  $[\sum_{k=1}^t (y_k - \mu)]$ , aux différents moments d'échantillonnage  $k$  (voir annexe B.1.3). Cette méthode a l'avantage d'émettre une alerte quand de faibles déviations positives se succèdent et non uniquement lorsqu'une observation est largement supérieure à sa valeur attendue.
- La carte EWMA (Exponentially Weighted Moving Average Chart) : proposée par Roberts, (1959) effectue un lissage (moyenne mobile pondérée) des observations brutes qui sont comparées aux limites de contrôle (voir annexe B.1.4).

Les avantages et les inconvénients de chaque carte de contrôle, le mode de construction, ainsi que leurs principales caractéristiques sont présentés dans l'annexe B.1.

### 3.3. Contrôle statistique multivarié des processus : cartes de contrôle multivariées

La surveillance multivariée est motivée par la possibilité de détecter des anomalies qui pourraient être non détectées par les tests univariés. Plutôt que d'appliquer une carte de

contrôle univariée à chaque série, une statistique de test unique est calculée en injectant les différents flux de données et leur matrice de corrélation (méthode de contrôle statistique des procédés multivariés - Multivariate Statistical Process Control, MSPC). Contrairement à la surveillance parallèle, ces méthodes prennent en compte la corrélation entre les différentes séries temporelles. Les principales cartes de contrôle multivariées sont (Annexe B.2) :

- *La carte  $T^2$  de Hotelling* : Hotelling a été le premier à mettre au point un concept de surveillance de procédé multivarié en proposant la carte  $T^2$  (Hotelling, 1947). Le calcul du  $T^2$  donne un scalaire, dont la mesure peut être représentée dans le temps sous la forme d'une carte de contrôle, comparée à une limite de contrôle supérieure (Annexe B.2.1). Le calcul des limites dépend de l'estimation des paramètres du processus (Montgomery, 1997, 2008). La carte de contrôle  $T^2$  de Hotelling utilise le vecteur d'observations à l'instant courant pour déterminer l'état du processus, elle est donc moins performante pour la détection des faibles dérèglements du processus. Pour remédier à cet inconvénient, les cartes de contrôle MEWMA (Multivariate EWMA) et MCUSUM (Multivariate CUSUM) ont été développées par extension des cartes univariées correspondantes.
- *La carte MEWMA* : développée par Lowry (Lowry et al., 1992), la construction de la carte MEWMA repose sur le même principe que la carte univariée EWMA. Les performances de la carte MEWMA dépendent de son paramètre de lissage,  $\lambda$  (voir annexe B.2.2).
- *La carte MCUSUM* : Plusieurs versions de la carte MCUSUM ont été proposées dans la littérature (Crosier, 1988; Hawkins, 1991; Pignatiello and Runger, 1990; Runger and Testik, 2004). Une des cartes MCUSUM la plus utilisée a été développée par Pignatiello and Runger, (1990) (voir annexe B.2.3).

Dans la partie suivante nous proposons deux méthodologies de détection d'occurrence des situations de tension dans un SU utilisant les cartes de contrôle MSP, les méthodes de séries chronologiques et les méthodes d'analyse de données multivariées.

#### 4. Détection d'occurrence de situations de tension dans le fonctionnement d'un SU

La première méthodologie (méthode de détection avec modèles) combine les méthodes de séries chronologiques (SC) et les techniques de la Maîtrise Statistique de Processus (MSP). La deuxième méthodologie (méthode de détection sans modèles) combine l'analyse en composante principale (ACP) et les techniques de la MSPM pour les processus multivarié.

##### 4.1. Méthode de détection des situations de tension à base de modèles (SC-MSP)

L'utilisation des seules cartes de contrôle MSP traditionnelle pour surveiller le comportement d'un système présente des inconvénients majeurs. Les cartes de contrôle

supposent que les statistiques surveillées suivent une distribution normale "iid" (identiquement et indépendamment distribuées) avec une moyenne et une variance constante. En réalité, la plupart des phénomènes observés et des données réelles recueillies ne répondent pas à cette hypothèse. Dans le cas des services d'urgence, les données générées par les SU contiennent souvent des tendances, des variations cycliques et saisonnières (Kadri et al., 2014a, 2014b). Le contrôle et la surveillance de ces données nécessite donc une étape initiale de traitement des données correspondant aux phénomènes explicables (variation cycliques, tendances, saisonnalité...) qu'il est nécessaire de supprimer. Ceci peut être réalisé en utilisant des modèles de séries chronologiques qui fournissent un modèle pouvant être utilisé par des méthodes de la MSP.

La combinaison des modèles de séries chronologiques et des cartes de contrôle MSP permettent d'établir une méthodologie de détection d'anomalies beaucoup plus puissante. Les auto-corrélations peuvent être décrites par des modèles de séries chronologiques. Puis, les cartes de contrôle MSP peuvent alors être appliquées aux résidus non corrélés du modèle de séries chronologiques.

Le problème de détection d'anomalie à base de modèle est ainsi constitué de deux étapes principales :

- 1) la génération des résidus à l'aide d'un modèle mathématique de référence,
- 2) l'évaluation des résidus avec des tests statistiques (cartes de contrôle MSP).

Nous proposons dans cette première proposition de coupler un modèle d'analyse de séries chronologiques avec les cartes de contrôle MSP (univariées et multivariées) pour développer une méthodologie pour la détection de l'occurrence des situations de tension dans un SU (Kadri et al., 2014). La méthodologie proposée est décrite figure IV-1.

- **Phase 1: La construction du modèle de référence** (modèle descriptif). Cette phase est composée des trois étapes présentées suivantes :
  - a) *Collection de l'ensemble de données d'apprentissage* (données nominales correspondant à la situation normale (état de fonctionnement normal du SU). Ceci est nécessaire pour la construction du modèle de référence.
  - b) *Prétraitement des données*, qui consiste à l'analyse (tendances, la saisonnalité et les variations cycliques dans les séries de données) et la standardisation des données utilisées.
  - c) *Construction du modèle de référence* en utilisant l'ensemble des données d'apprentissage qui représentent des situations normales. L'objectif est de construire et de valider le meilleur modèle descriptif (ARMA, SARMA, VARMA, SARMAX) en utilisant l'analyse des séries chronologiques.

- **Phase 2 : calcul des limites de la carte de contrôle.** Dans cette deuxième étape, la limite de contrôle supérieure (LCS) et la limite de contrôle inférieure (LCI) de la carte de contrôle utilisée sont calculées à partir des résidus obtenus avec le modèle de référence. Dans notre cas, on s'intéresse à la limite de contrôle supérieure LCS.
- **Phase 3 : détection d'anomalies.** Cette phase, réalisée en temps réel, est composée de cinq étapes:
  - a) *Définition de l'ensemble de données* à tester qui peuvent éventuellement contenir des situations de tension.
  - b) *Prétraitement de données* à tester, qui consiste à analyser et standardiser (centrer et réduire) les données.
  - c) *Génération du vecteur des résidus* ( $\varepsilon_t$ ),  $\varepsilon_t$  est défini comme la différence entre les mesures des variables tests et la sortie du modèle de référence construit dans l'étape 1.
  - d) *Estimation de la valeur de la fonction de décision*  $Z(t)$ ,
  - e) *Vérification de l'état du SU et détection des situations anormales* :
    - 1) Si  $Z(t) < LCS$ , aucune anomalie n'est détectée, on maintient la surveillance du SU.
    - 2) Si  $Z(t) > LCS$ , une alerte est déclenchée pour avertir le manager du SU de l'occurrence d'une situation de tension. Dans ce cas, le responsable du SU va choisir, selon le processus décrit au chapitre 3 et une ou des actions correctives et lancer leur mise en œuvre.

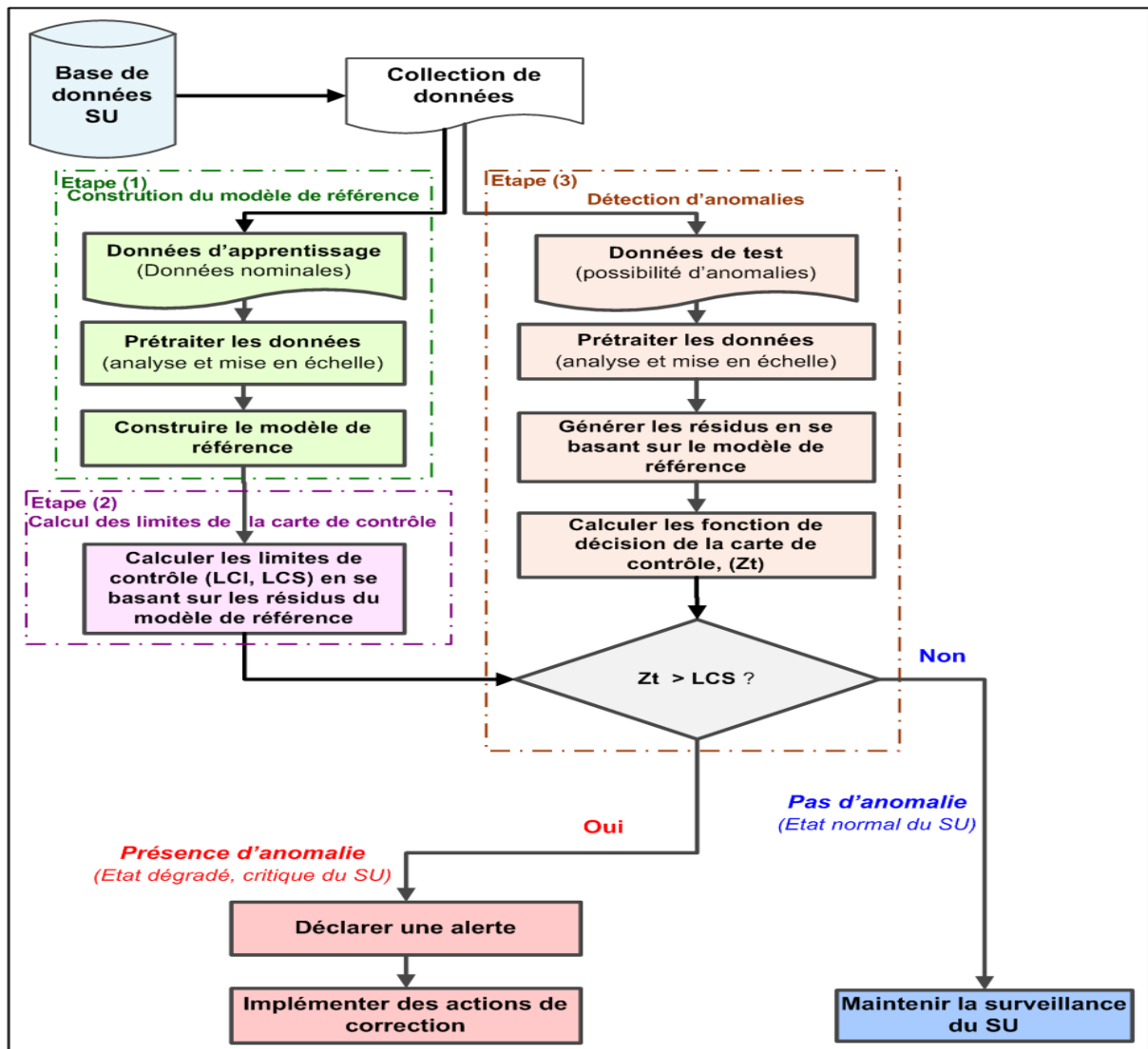


Figure IV-1 : Méthodologie de détection des situations de tension à base de modèle.

#### 4.2. Méthode de détection des situations de tension à base de données (ACP-MSPM)

Nous présentons tout d'abord la méthode de l'Analyse en Composantes Principales (ACP), utilisée dans l'analyse des données multivariées. Puis nous décrivons la combinaison de l'analyse ACP avec les cartes de contrôle MSPM pour construire une stratégie de détection multivariée.

##### 4.2.1. Analyse en composante principale (ACP)

L'ACP est la méthode multivariée la plus connue et la plus utilisée dans la surveillance de processus et la détection d'anomalies (Mnassri, 2012; Qin, 2012). L'utilisation fréquente de l'ACP dans ces différentes disciplines est justifiée par la réduction des données caractérisant un espace de grande dimension en un ensemble de composantes principales (CPs) constituant un sous-espace de dimension réduite (Mnassri, 2012). De nombreux travaux ont proposé d'utiliser l'ACP comme technique de modélisation multivariée à partir de laquelle un modèle

ACP peut être obtenu (Cherry and Qin, 2006; Harkat et al., 2007; Harmouche et al., 2014; Jolliffe, 2002, 2013; Mnassri, 2012; Qin and Dunia, 2000).

Le concept de base de l'ACP est de réduire la dimension de l'espace des données fortement corrélées (MacGregor and Kourti, 1995; Patton and Chen, 1994). L'ACP ne nécessite pas de connaissances a priori sur le système contrôlé, les informations nécessaires sont les données de l'historique du fonctionnement normal du système. Le comportement courant du processus est ensuite comparé au fonctionnement normal pour détecter une anomalie éventuelle.

Par conséquent, l'ACP et ses extensions ont été appliquées avec succès pour détecter des anomalies dans différents domaines d'application (George et al., 2009; Harrou et al., 2013; Mnassri, 2012; Tharrault, 2008). La modélisation par l'ACP, le choix du nombre de composantes principales (CPS) que l'on peut utiliser et les métriques de surveillance associées sont présentés en annexe C.

#### 4.2.2. Méthode de détection ACP- MSPM

Lorsque le SU est dans des conditions de fonctionnement normales, la valeur résiduelle du résidu est égale ou proche de zéro. Lorsqu'une anomalie se produit, les résidus s'écartent sensiblement de zéro indiquant la présence d'une condition nouvelle, nettement distinguée du mode de fonctionnement normal du SU. Les résidus du modèle ACP sont utilisés pour calculer les valeurs des limites de contrôle des cartes MSPM. L'algorithme de détection d'anomalies basé sur les cartes de contrôle multivariées et l'ACP est présenté annexe C.3.

La méthodologie adoptée est illustrée figure IV-2. Cette méthodologie comporte deux phases principales, une phase d'apprentissage et une phase de test.

##### 1) La phase d'apprentissage

L'objectif de cette phase est la construction du modèle de référence ACP à partir des données de la base de données du SU. Par conséquent, elles doivent représenter l'état de fonctionnement normal du SU.

Cette phase est composée des étapes suivantes :

- a) *Prétraitement de données*, qui consiste à analyser et standardiser (centrer et réduire) les données.
- b) *Construction du modèle de référence ACP* en utilisant les données d'apprentissage représentant l'état de fonctionnement normal de SU. L'objectif ici est de construire et de valider le meilleur modèle descriptif sur la base de l'analyse des données d'apprentissage.
- c) *Calcul des limites de contrôle de la carte multivariée*. Dans cette étape, en se basant sur les résidus obtenus à partir du modèle de référence ACP, les limites de contrôle (LCI, LCS) de la carte de contrôle utilisée sont calculées.

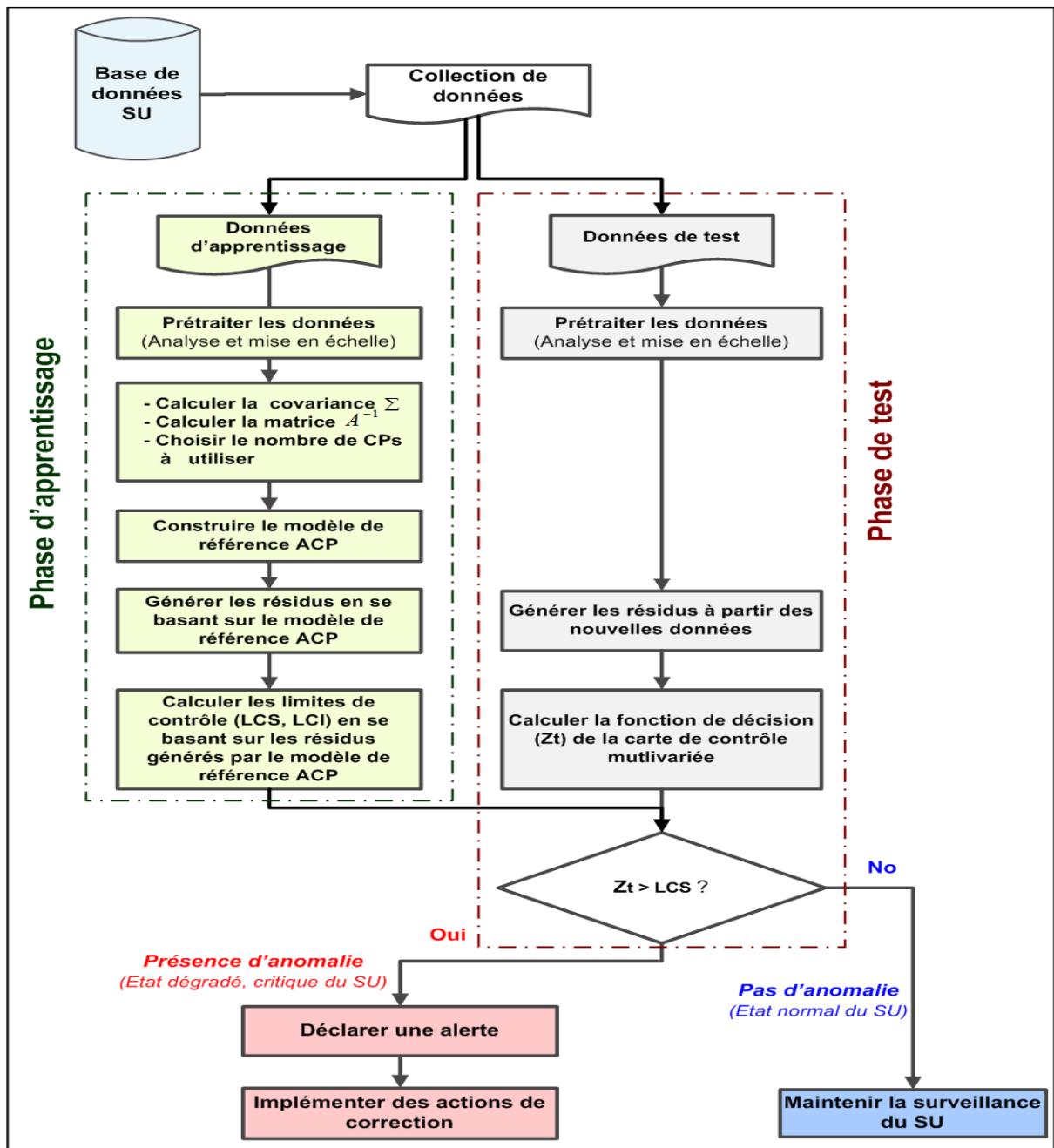


Figure IV-2 : Méthodologie de détection des situations de tension à base de données.

## 2) La phase de test

La phase d'apprentissage est suivie par la phase de test, où des nouvelles données (données de test) sont prises en compte. Ces données de test peuvent éventuellement contenir des anomalies qui correspondent à un comportement anormal dans le SU. Cette phase est composée des étapes suivantes :

- a) *Prétraitement des données de test* qui consiste à définir et standardiser les nouvelles données qui peuvent éventuellement contenir des situations de tension.

- b) *Génération des résidus* : ils sont définis comme la différence entre les mesures de la sortie (avec les données de test) et le modèle de référence ACP construit dans la phase d'apprentissage.
- c) *Estimation de la fonction de décision  $Z(t)$  de la carte de contrôle multivariée.*
- d) *Vérification de l'état du SU et détection des anomalies* :
  - 1) Si la fonction de décision ( $z_t$ ) dépasse la limite de contrôle supérieure (LCS) une alerte est déclarée pour avertir le manager du SU d'occurrence d'une situation de tension.
  - 2) Si aucune anomalie n'est détectée ( $z_t$  ne dépasse pas la LCS), on maintient la surveillance du SU.

Dans la partie suivante, nous présentons nous présentons les modèles de parcours patient que nous avons élaborés selon le type de patients en prenant en compte leur degré d'urgences et les examens complémentaires éventuels.

## 5. Les modèles de parcours patients pour la simulation

Avant de présenter les cinq types identifiés (type 1 à type 5), nous présentons le processus général de prise en charge dans un service d'urgence.

### 5.1. Processus général de prise en charge

En général et dans le cadre d'un service d'urgence (SU), le processus de prise en charge des patients comporte quatre activités principales (figure IV-3).

- $A_1$  : enregistrement administratif du patient à son arrivée au service d'urgence,
- $A_2$  : consultations infirmières et médicales,
- $A_3$  : hospitalisation du patient en Salle d'Accueil d'Urgence Vitale (SAUV),
- $A_4$  : hospitalisation du patient en Unité d'Hospitalisation de Courte Durée (UHCD).



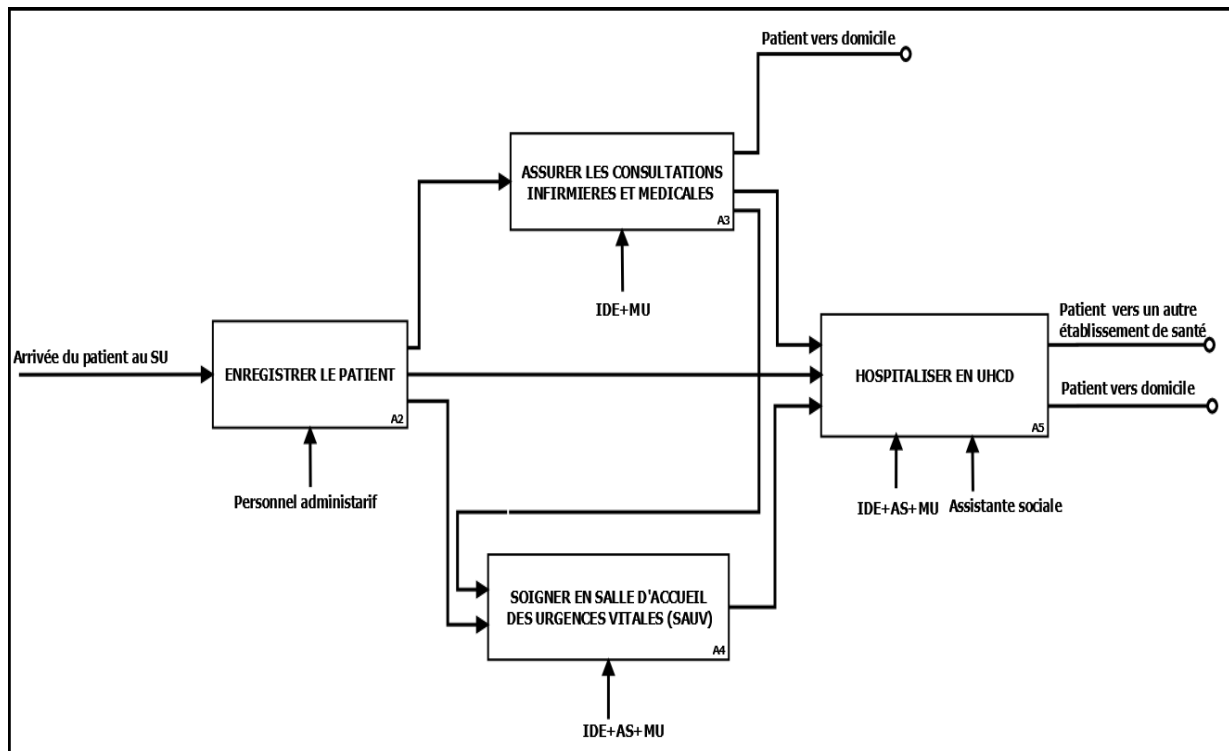


Figure IV-3 - Principales activités du processus de prise en charge des patients dans un SU

- *Notations* : IDE : infirmières diplômées d'état, AS : aides-soignantes, MU : médecins urgentistes.

## 5.2. Typologie des patients admis au service d'urgence

En considérant l'état d'urgence du patient à son arrivée au service d'urgence et la nécessité ou non d'exams complémentaires, nous avons identifié 5 types de patients (figure IV-4) :

- **Type 1** : patient présentant un état critique, ce type de patient est pris en charge directement en salle d'urgence vitale (SAUV).
- **Type 2** : patient présentant un état urgent mais sans examens complémentaires.
- **Type 3** : patient présentant un état urgent mais qui nécessite un ou plusieurs examens complémentaires.
- **Type 4** : Patient présente un état non urgent mais sans examens complémentaires.
- **Type 5** : patient présentant un état non urgent mais qui nécessite un ou plusieurs examens complémentaires.

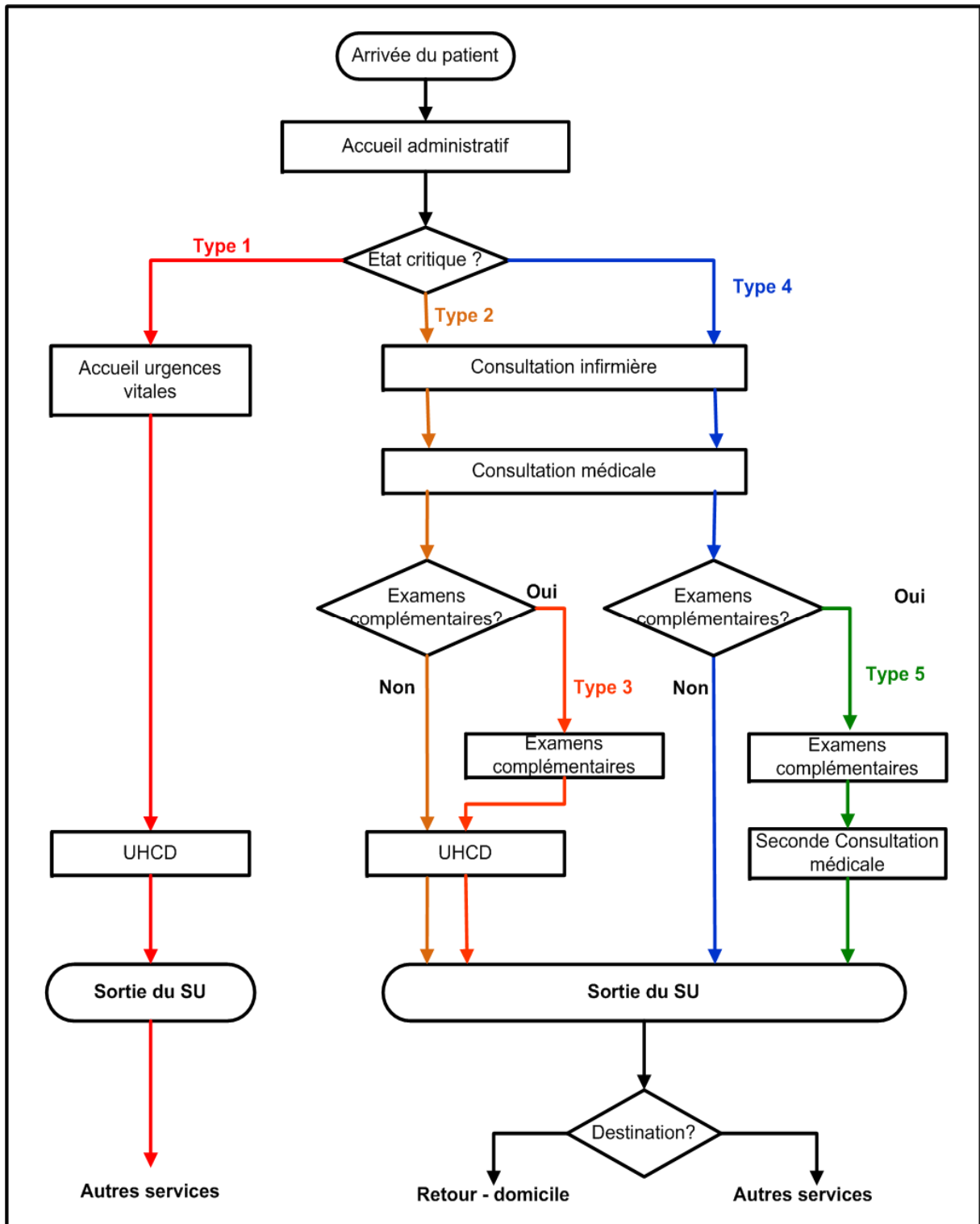


Figure IV-4 : Les étapes de prise en charge selon le type de patient admis au service d'urgence.

### 5.2.1. Patient critique type 1

Dès son arrivée au service d'urgence, le patient de type 1 est pris en charge directement dans la salle d'accueil des urgences vitales sans passer par le guichet administratif; la procédure administrative se fait alors soit en parallèle soit en différé. Généralement, le patient de type 1 est amené au SU par le SMUR, les pompiers ou la police.

Après les soins d'urgence vitale, le patient sera :

- transféré directement dans un autre service du centre hospitalier ou un autre établissement, ou
- admis en unité d'hospitalisation de courte durée pour surveiller l'évolution de son état de santé avant son transfert dans un autre service.

### 5.2.2. Patient urgent de type 2

Dès l'arrivée d'un patient urgent de type 2 à l'entrée des urgences, celui-ci est pris en charge par l'agent administratif (accueil administratif). Ce dernier enregistre les informations administratives concernant le patient. Le patient est ensuite directement consulté par une infirmière, puis par un médecin avant d'être orienté vers l'unité d'hospitalisation de courte durée (UHCD) du service d'urgence afin de surveiller ses constantes.

### 5.2.3. Patient urgent de type 3

Dès l'arrivée d'un patient urgent de type 3 au service d'urgence, il suit les mêmes étapes de prise en charge que les patients de type 2 (figure VI-4). Mais, outre ces étapes, l'état du patient de type 3 nécessite de faire un ou plusieurs examens complémentaires (exemple : scanner, radiologie, biologie, échographie...).

### 5.2.4. Patient non urgent de type 4

Dès son arrivée, un patient non urgent de type 4 du SU, est pris en charge par l'agent administratif. Le patient est ensuite dirigé directement vers la salle d'attente pour attendre les soins infirmiers. Après la consultation infirmière, le patient revient en salle d'attente pour attendre la consultation médicale. Dès qu'un médecin se libère, il consulte le patient avant sa sortie.

### 5.2.5. Patient non urgent de type 5

Un patient de type 5 suit la trajectoire la plus longue dans le service d'urgence. Outre les étapes suivies par les patients de type 4, un patient de type 5 nécessite des examens complémentaires et doit attendre une deuxième consultation médicale pour pouvoir regagner son domicile ou être transféré vers un autre service ou autre établissement hospitalier. Le temps de séjour d'un patient de type 5 est très variable étant donné qu'il ne présente pas un caractère d'urgence et n'est donc pas prioritaire.

## **6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents modèles (de prévision, de détection et de flux patients) utilisés pour la conception du système SAGEST.

Puis, nous avons présenté deux méthodologies pour la détection d'occurrence des situations de tension dans les SU. La première méthodologie, à base de modèles, combine les modèles de séries chronologiques et les cartes de contrôle MSP. La deuxième méthodologie à base de données, combine la méthode d'analyse de données multivariées ACP et les cartes de contrôle MSPM. Enfin, nous avons présenté les modèles de prise en charge au niveau d'un SU selon le type des patients selon l'état du patient à son arrivée au SU (critique, urgent, non urgent) et la nécessité ou non d'examens complémentaires.

Le chapitre suivant présente l'étude et l'application des principaux modèles du système SAGEST au de service d'urgence pédiatrique (SUP) du centre hospitalier régional universitaire du Lille.

# Chapitre V : Service d'urgence pédiatrique du CHRU de Lille

## 1. Introduction

Le chapitre IV a décrit les méthodes et modèles utilisés dans la construction des principaux modules du système SAGEST. Ce chapitre présente leur application dans le cas du service d'urgence pédiatrique (SUP) au centre hospitalier régional universitaire (CHRU) de Lille.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du service d'urgence pédiatrique (SUP) du CHRU de Lille. Les principales activités et le modèle fonctionnel du processus de prise en charge au niveau du SUP sont décrits.

La deuxième partie présente et analyse brièvement l'ensemble des données extraites de la base de données du SUP utilisées pour la construction des modèles de prévision et de détection d'occurrence des situations de tension.

La troisième partie présente les modèles (modèles de prévision, de détection et de parcours patients) développés pour le SUP en exploitant les méthodes décrites dans le chapitre IV. Ainsi, les modèles de prévision du nombre d'arrivées de patients par jour au SUP sont des modèles ARMA (autorégressif et moyenne mobile). Le modèle de prévision du nombre d'arrivées de patient par heure au SUP est un modèle SARMA (autorégressif et moyenne mobile saisonnier). Le modèle de détection est un modèle multivarié associé à la méthode d'analyse en composante principale (ACP), et les modèles de parcours patients présentent les cinq parcours principaux définis au chapitre IV.

## 2. Le service d'urgence pédiatrique du CHRU de Lille

### 2.1. Présentation du site d'expérimentation – SUP du CHRU de Lille

Le centre hospitalier régional universitaire (CHRU) de Lille, 1<sup>er</sup> établissement de la région Nord-Pas-de-Calais en termes de lits et places de court séjour (15,5% des lits et places d'hospitalisation), a une capacité totale de 3084 lits et places installés en 2012<sup>17</sup>. Il propose une offre de soins en court et long séjours, en soins de suite et en hospitalisation à domicile, permettant à toute la population du Nord Pas-de-Calais de bénéficier d'une prise en charge multidisciplinaire.

Le CHRU de Lille est une plateforme régionale de recours et de référence pour ses activités médicales, chirurgicales et médico-techniques (imagerie, biologie, explorations

---

<sup>17</sup> Le centre hospitalier régional universitaire (CHRU) de Lille, 2012- Les Chiffres Clés.

fonctionnelles, système d'information), au bénéfice des 4 millions d'habitants que compte la région Nord Pas-de-Calais. Sa vocation est de développer des innovations et de prendre en charge des pathologies lourdes nécessitant un plateau médico-technique de pointe, une expertise médicale spécialisée et une prise en charge multidisciplinaire.

Ouvert 24h/24, le CHRU de Lille assure un rôle majeur dans la permanence des soins notamment dans le cadre de ses services d'urgence (urgences médicales et chirurgicales pour adultes et enfants, urgences spécialisées : cardiologiques, ophtalmologiques, et gynécologiques).

Le service d'urgence pédiatrique (SUP) du centre hospitalier régional universitaire (CHRU) de Lille reçoit toute personne en attente de soins dans les différents domaines médicaux et chirurgicaux se présentant spontanément ou amenée par le SMUR, les pompiers ou les ambulanciers privés, etc., Le SUP du CHRU de Lille partage plusieurs ressources avec d'autres services tels que le service des urgences adultes, blocs opératoires, radiologie (Scanner, IRM, Rayons X, Ultrason, etc.) et les laboratoires (Banque du sang, Chimie, Microbiologie, Pathologie, etc.).

Le SUP est composé principalement de cinq zones (Figure V-1) :

- 1) Zone 1 : elle est composée d'une salle d'attente et une salle de jeux pour les enfants.
- 2) Zone 2 : elle comporte quatre boxes de consultation.
- 3) Zone 3 : c'est la salle d'urgence vitale (SAUV) utilisée pour le traitement des patients qui présentent un état critique.
- 4) Zone 4 : c'est l'unité d'hospitalisation à courte durée (UHCD) ; elle est composée de 10 chambres qui sont consacrées à des patients dont l'état nécessite une surveillance.
- 5) Zone 5 : elle est composée d'une salle pour la pose de plâtres et d'une salle pour les sutures.

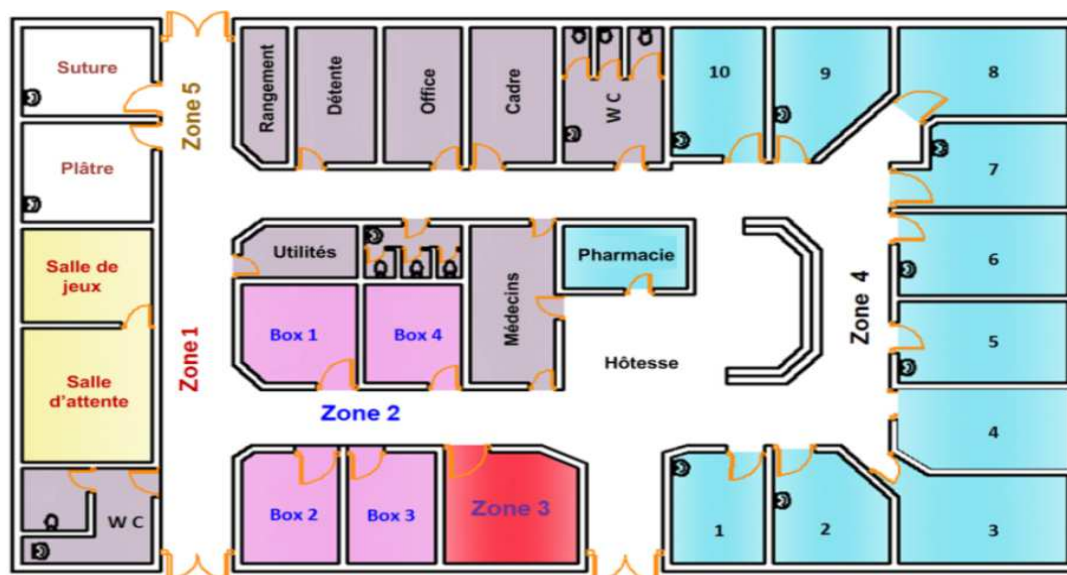


Figure V-1 : Plan du SUP de CHRU de Lille.

## 2.2. Modèle fonctionnel général du SUP

Le processus de prise en charge des patients comporte cinq activités principales (figure V-2) (Kadri et al., 2014c) :

- 1) Enregistrer le patient (enregistrement administratif).
- 2) Accueillir et orienter le patient au sein du SUP.
- 3) Soigner le patient en salle d'urgence vitale (SAUV).
- 4) Assurer les consultations infirmières et médicales.
- 5) Hospitaliser le patient en UHCD.

A la sortie du service d'urgence pédiatrique, le patient est soit :

- a) renvoyé à son domicile,
- b) soigné dans un autre service pédiatrique du CHRU,
- c) transféré vers un autre établissement de la région.

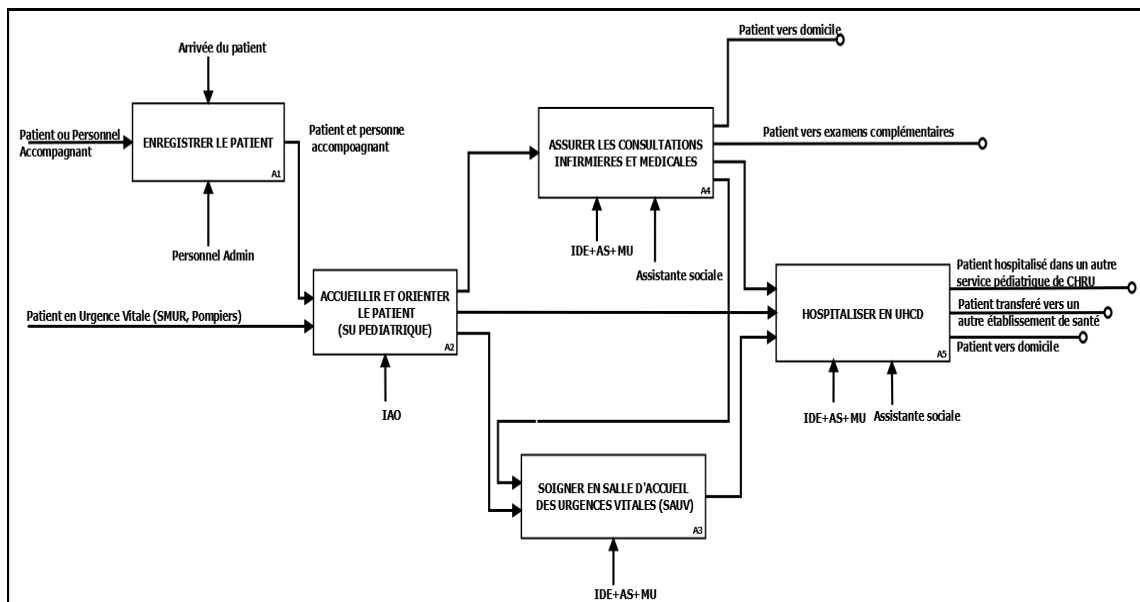


Figure V-2 : Processus de prise en charge des patients au niveau de SUP du CHRU de Lille.

Pour assurer ses missions, le SUP dispose des ressources suivantes : agents administratifs, aides-soignantes (AS), infirmières d'accueil et d'orientation (IAO), infirmières diplômées d'État (IDE), médecins urgentistes (MU), médecins impliqués dans la prise en charge l'enfant : chirurgiens et spécialistes (ORL, neurochirurgien, etc.) appelés au cours du passage de l'enfant au SUP.

La table V-1 et la table V-2 présentent respectivement, le nombre de personnel soignant (AS, IDE) et le personnel médical selon la plage horaire au sein du service d'urgence pédiatrique du CHRU de Lille.

Table V-1 : Nombre de personnel soignant au SUP.

Plage horaire	IAO	AS	IDE
7h – 13h	1	2	1 (2 en hiver)
13h – 21h	1	2	2 (3 en hiver)
21h – 7h	1	1	2

Table V-2 : Nombre de personnel médical au SUP.

Plage horaire	Praticien Hospitalier	Internes		
		Chirurgie	Pédiatre	Médecin Général
9h – 18h	2	1	3	1
18h – 24h	1	1	1 (2 en hiver)	1
24h – 9h	1	1	1	0

Le nombre de ressources équivalent de chaque type par plage horaire que nous avons utilisé pour la simulation est présenté table V-3 (Exemple, 2 MU de 00h00 à 9h00, 4,5 MU de 9h00 à 18h00 et 2,5 (3 en hiver) MU de 18h00 à 24h00).

Table V-3 : Nombre de ressources équivalent.

	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
<b>Ressources</b>																								
<b>MU</b>	2							4.5							2,5 (3 en hiver)									
<b>IDE</b>	2							2							2							2		
<b>IAO</b>	1							1							1									
<b>AS</b>	2							2							1							2		

### 2.2.1. Enregistrer le patient

Dès l'arrivée d'un patient non urgent à l'entrée du SUP, il est pris en charge par l'agent administratif (Accueil administratif) qui enregistre les informations administratives concernant le patient. Celui-ci est ensuite dirigé directement vers l'accueil du service d'urgence pédiatrique (SUP) (figure V-3).



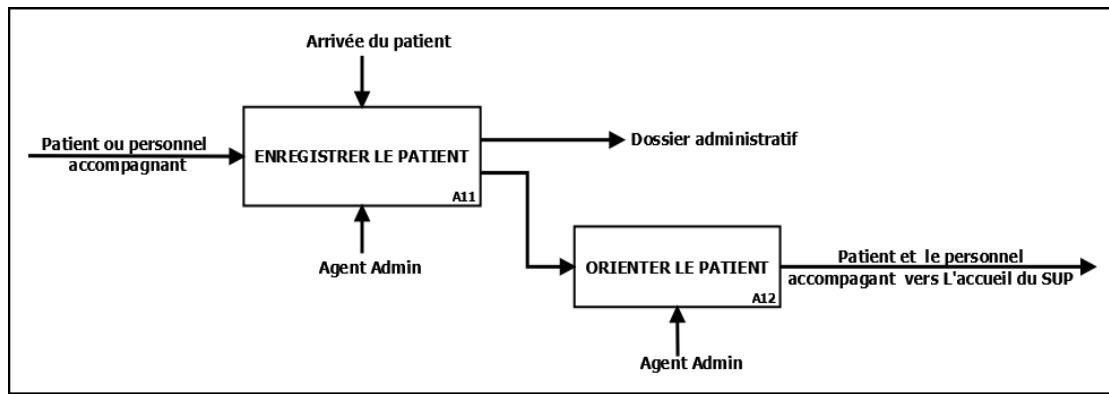


Figure V-3 : Enregistrer le patient.

### 2.2.2. Accueillir et orienter les patients

L'hôtesse d'accueil (ou une IDE ou une auxiliaire de puériculture/aide-soignante) remplit un dossier précisant l'ensemble des données administratives nécessaires, notamment le motif de venue, l'âge, les coordonnées téléphoniques, l'identité des accompagnants, l'identité des détenteurs de l'autorité parentale, les traitements en cours, les antécédents, etc. La personne ayant effectué l'accueil classe ensuite, le dossier dans le casier « IAO ». Le patient est alors orienté soit vers la salle d'urgence vitale, soit vers la salle d'attente, un box de consultation ou une chambre de l'UHCD (figure V-4). Dès que cela est possible ou immédiatement si l'état de l'enfant le nécessite, une IAO prend les constantes de l'enfant, complète le dossier informatique et met le dossier dans le casier « MEDICAL » ou « CHIRURGIE » selon le motif de la consultation. Si l'état de l'enfant nécessite un examen médical immédiat, l'IAO prévient un des médecins du service.

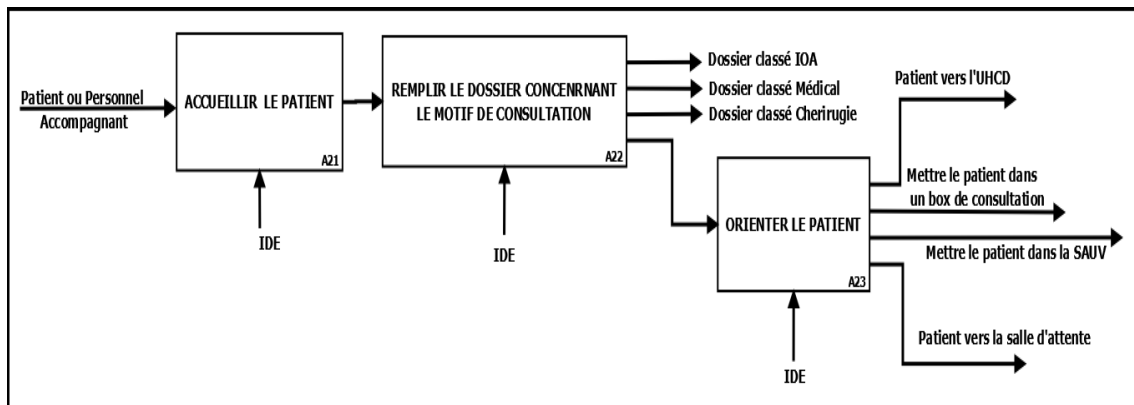


Figure V-4 : Accueillir et orienter les patients.

Si le patient présente un état d'urgence il est pris en charge directement par l'accueil du SUP sans passer par le guichet administratif. Dans ce cas, la procédure administrative se fait en parallèle ou en différé. Les enfants polytraumatisés ou présentant une urgence vitale (i.e. arrêt cardiaque) sont pris en charge dans le service d'accueil des urgences vitales de l'urgence adulte avant un éventuel transfert aux SUP. Ils peuvent également être ensuite transférés en chirurgie pédiatrique, en neurochirurgie pédiatrique ou en réanimation pédiatrique.

### 2.2.3. Soigner le patient en salle d'accueil d'urgence vitale (SAUV)

La salle d'accueil des urgences vitales est un lieu d'accueil, au sein du service d'urgence pédiatrique, des patients présentant un état de détresse vitale existante ou potentielle. Cette salle a été créée pour permettre le traitement et la surveillance des défaillances des grandes fonctions vitales dans l'attente de transfert dans un autre service pédiatrique du CHRU ou vers un autre établissement hospitalier (figure V-5). L'équipement de la salle d'accueil des urgences vitales est vérifié tous les jours et après chaque utilisation.

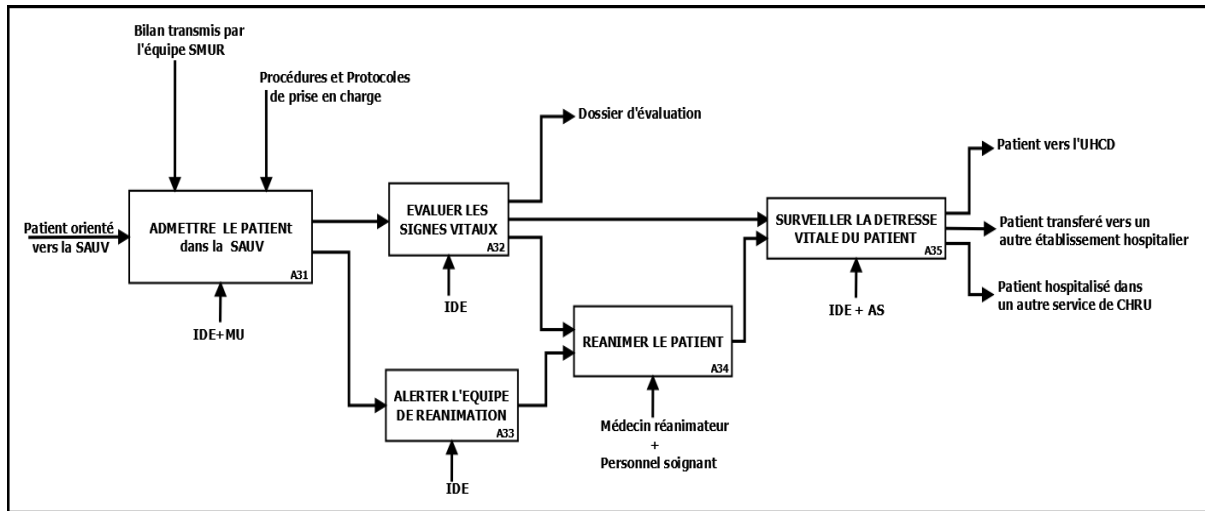


Figure V-5 : Soigner le patient salle d'accueil des urgences vitales (SAUV).

### 2.2.4. Consultations infirmières et médicales

Selon le personnel médical du SUP, la majorité des patients admis au SUP sont pris en charge par plusieurs intervenants : IDE, MU (consultation infirmière et médicale) et parfois assistante sociale. Le patient est ensuite dirigé soit vers la SAUV ou l'UHCD (Figure V-6). Parfois, les patients sont orientés vers d'autres services du CHRU pour des examens complémentaires (examens de biologie, radiologie, scanner ...), vers d'autres établissements ou rentrent à leur domicile.

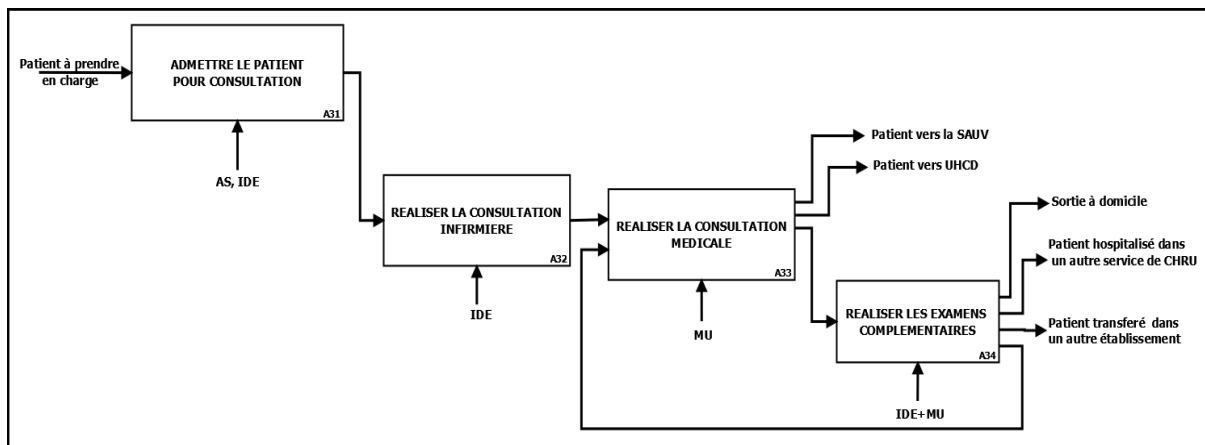


Figure V-6 : Assurer les consultations infirmières et médicales.

### 2.2.5. Soigner le patient en UHCD

L'UHCD (unité d'hospitalisation de courte durée) permet de recevoir les patients nécessitant une période d'observation et/ou nécessitant des examens supplémentaires et/ou admis au bloc opératoire pour des éventuelles interventions chirurgicales. A l'issue de ce séjour à l'UHCD, le patient quitte le service d'urgence pédiatrique et, soit rentre à son domicile ou est admis dans un autre service pédiatrique de CHRU ou dans un autre établissement de périphérie (figure V-7).

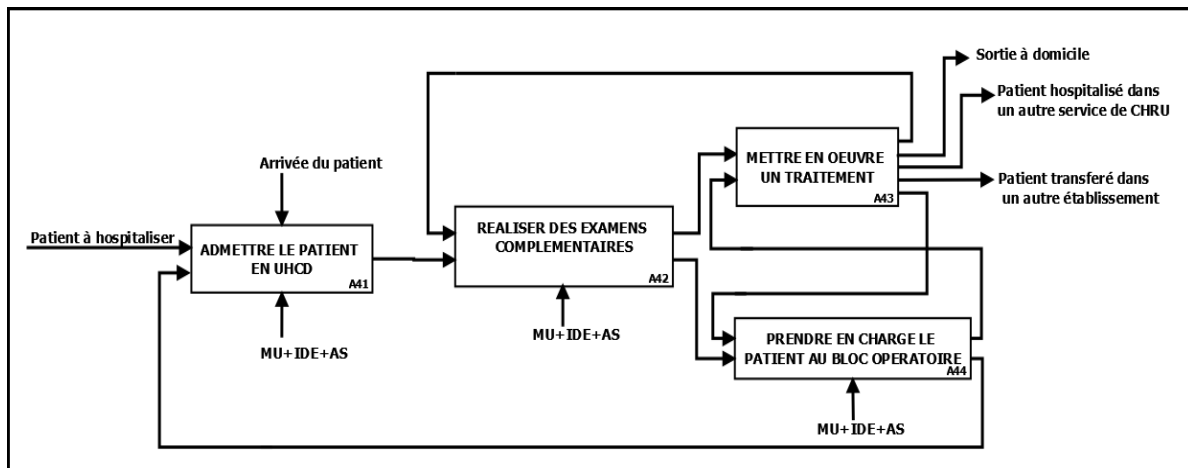


Figure V-7 : Hospitaliser le patient en UHCD.

### 2.3. Modèle dynamique du SUP

L'analyse des questionnaires et des interviews réalisées avec le personnel médical du SUP, nous avons établi un modèle du processus dynamique de prise en charge composé de cinq étapes principales. Chaque étape est caractérisée par sa durée, la nature des soins et le type de personnel(s) requis (figure V-8). Les durées des étapes de soins et les temps d'attente entre chaque étape du processus de soins sont présentés dans la table V-4.

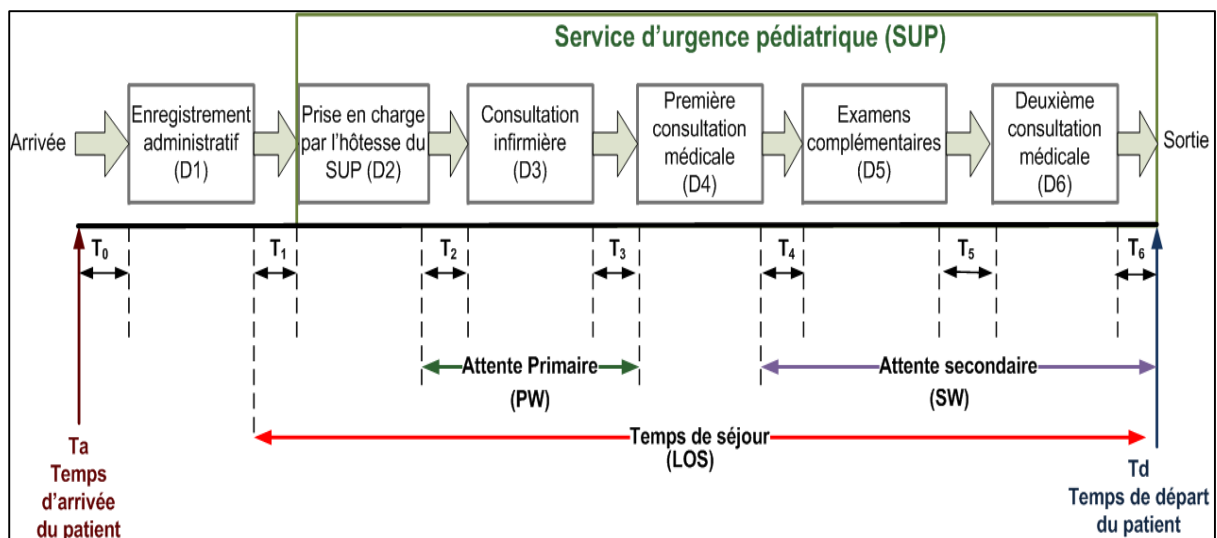


Figure V-8 : Etapes principales du processus de prise en charge au SUP.

Table V-4 : Durées et temps d'attentes au SUP.

Durée de chaque étape	Temps d'attente entre chaque étape
<p><b>D1</b> : Temps nécessaire pour l'enregistrement administratif</p> <p><b>D2</b> : Temps nécessaire pour la prise en charge par l'hôtesse</p> <p><b>D3</b> : Temps nécessaire pour la consultation infirmière</p> <p><b>D4</b> : Temps nécessaire pour la première consultation médicale</p> <p><b>D5</b> : Temps nécessaire pour l'examen complémentaire</p> <p><b>D6</b> : Temps nécessaire pour la deuxième consultation médicale</p>	<p><b>T0</b> : Temps d'attente entre l'arrivée et l'enregistrement administratif</p> <p><b>T1</b>: Temps d'attente entre l'enregistrement administratif et la prise en charge par l'hôtesse</p> <p><b>T2</b> : Temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et la consultation infirmière</p> <p><b>T3</b> : Temps d'attente entre la consultation infirmière et la consultation médicale</p> <p><b>T4</b> : Temps d'attente entre la première consultation médicale et l'examen complémentaire</p> <p><b>T5</b> : Temps d'attente entre l'examen complémentaire et la deuxième consultation médicale</p> <p><b>T6</b> : Temps d'attente entre la deuxième consultation médicale et la sortie du SUP</p> <p><b>PW</b> : Temps entre la prise en charge par l'hôtesse et la consultation médicale</p> <p><b>SW</b> : Temps entre la première consultation médicale et la sortie du SUP</p>

### 3. Données du SUP

Cette étude a été menée en utilisant un ensemble de données issues de la base de données du service d'urgence pédiatrique (SUP).

#### 3.1. Données patient au SUP

##### 1) Données d'identification du patient.

- Date et heure d'arrivée.
- Le patient est adressé par un médecin traitant, un médecin hospitalier, les pompiers, vient de sa propre initiative...
- Moyen d'arrivée (personnel, SAMU, pompiers, hélicoptère...).
- Origine (domicile, transfert interne, autre établissement...).
- Age et sexe du patient.
- Temps de séjour au SUP.
- Date et heure de sortie.
- Destination/transfert (Domicile, transfert interne au CHRU, autre établissements environnants...).

##### 2) Centre d'activité du séjour (CAC)

- 3091 = soins externes aux urgences pédiatriques.

- 3092 = hospitalisation de courte durée aux urgences pédiatriques).
- 3) Données médicales
- Statut (Médical, chirurgical...).
  - Diagnostic principal (définit le motif de la venue au SUP ou la pathologie du patient).
  - Examens complémentaires (Echographie, scanner, radiologie, biologie).
- 4) Classification Clinique des Malades aux Urgences (CCMU)
- CCMU 1 : aucun examen complémentaire ni aucune surveillance n'est nécessaire. Les malades classés dans cette catégorie regagnent leur domicile après le passage au SUP.
  - CCMU 2 et CCMU P (malade psychiatrique) : dans ce cas, aucune attente ni service approprié n'est prévisible. Le patient peut regagner son domicile ou passer en UHCD ou être hospitalisé.
  - Les CCMU 3 : ce type de patient doit être pris en charge dans la demi-heure qui suit son arrivée mais peut ensuite être transféré à domicile (en général après passage en UHCD) ou être hospitalisé.
  - CCMU 4 et 5 : la prise en charge est immédiate, ce type de patient est souvent admis directement en SAUV, puis en UHCD avant d'être transféré vers d'autres services du CHRU ou d'autres établissements.
- 5) Classification GEMSA élaborée par le Groupe d'Etude Multicentrique des Services d'Accueil :
- GEMSA 1 : patient décédé avant l'arrivée.
  - GEMSA 2 : patient non convoqué, arrivée imprévue, retour à domicile après prise en charge aux urgences.
  - GEMSA 3 : patient convoqué, arrivée attendue, retour à domicile après prise en charge aux urgences.
  - GEMSA 4 : patient non convoqué, arrivée imprévue, hospitalisation après prise en charge aux urgences.
  - GEMSA 5 : patient convoqué, arrivée attendue, hospitalisation après prise en charge aux urgences.
  - GEMSA 6 : la prise en charge du patient est importante et prolongée ; soins lourds aux urgences.

Pour mieux illustrer chaque champ des données patient précédentes, une analyse statistique descriptive de ces données est présentée dans l'annexe D.

### 3.2. Données chronologiques

#### 3.2.1. Nombre d'arrivées journalières au SUP

Les données utilisées dans cette partie représentent les arrivées journalières au SUP de CHRU de Lille de Janvier 2012 à décembre 2012.

Avant toute tentative de modélisation et de prévision il est essentiel de procéder à des analyses préliminaires des séries de données utilisées en accordant une attention particulière à

l'identification de caractéristiques importantes telles que les tendances saisonnières, les variations cycliques, les tendances, les valeurs aberrantes, et d'autres fluctuations notables dans la série. L'analyse descriptive des données 2012 est présentée dans l'annexe D.

Selon le mode d'admission de la classification GEMSA (voir Annexe D.3), nous avons considéré les deux types de patients correspondant à des arrivées imprévues : patients de classe GEMSA2 (G2), patients de classe GEMSA4 (G4). Nous avons également étudié la série correspondant au nombre total d'arrivées au SUP notée Total. Les trois séries (G2, G4, et Total) et leurs fonctions d'auto-corrélation (ACF) correspondantes sont présentées dans la figure V-9(a) et V-9(b) respectivement. La figure V-9(a) montre que ces séries ne présentent pas de tendance à long terme, ni de saisonnalité. La stationnarité de ces séries est confirmée par le test de Phillips-Perron ( $p.value = 0,01 < 5\%$ ) (Banerjee, 1993).

En examinant la figure V-9(b), aucune périodicité apparente ne peut être observée dans les fonctions d'auto-corrélation correspondantes (ACF) des trois séries. En effet, les courbes d'ACF décroissent exponentiellement jusqu'à zéro et les décalages augmentent. On remarque la présence d'une forte dépendance à court terme dans les trois séries qui indique la structure de corrélation d'ordre inférieur d'une série, propriété du modèle ARMA. Puisque la série est stationnaire alors l'ordre de terme de différenciation dans le modèle final est de 0 ( $d = 0$ ). Cela nous conduit à proposer le modèle ARIMA ( $p, 0, q$ ) ou ARMA ( $p, q$ ).

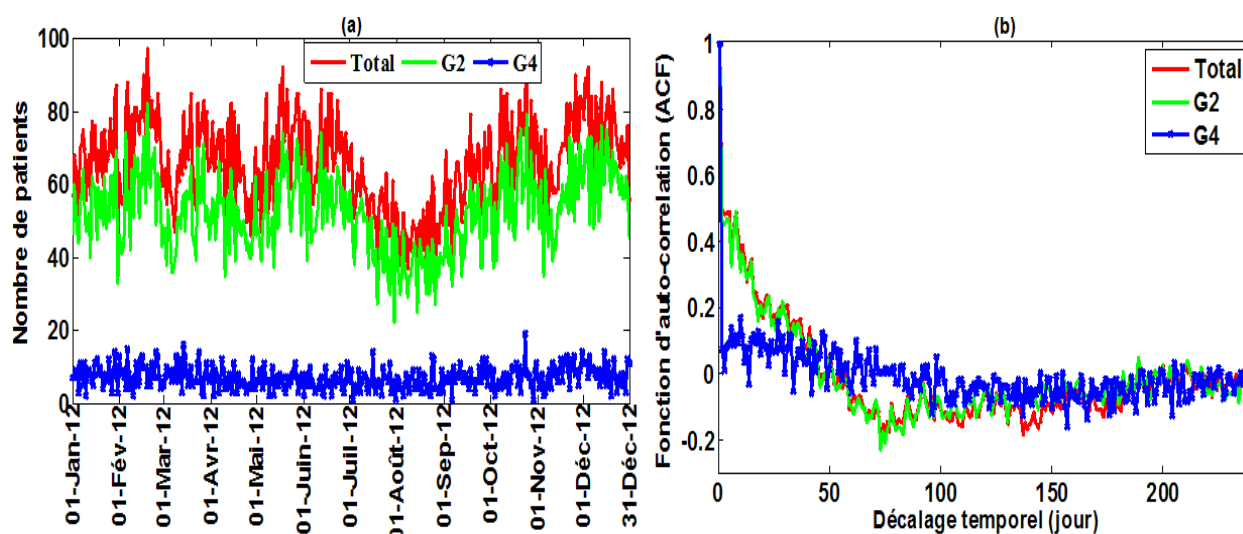


Figure V-9 : (a) Nombre d'arrivées par jour au SUP et (b) Les fonctions d'auto-corrélation des séries chronologiques (Total, G2 et G4).

### 3.2.2. Nombre d'arrivées par heure au SUP

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'étude du nombre d'arrivées des patients au SUP pendant la période épidémique (du novembre 2011 à Mars 2012). La figure V-10 montre que le nombre de patients arrivant au SUP varie considérablement en fonction de l'heure de la journée. Durant cette période, on remarque que le taux d'arrivée maximal au SUP est de 13 patients/heure, ce qui représente plus de 1 patient toutes les 5 minutes.

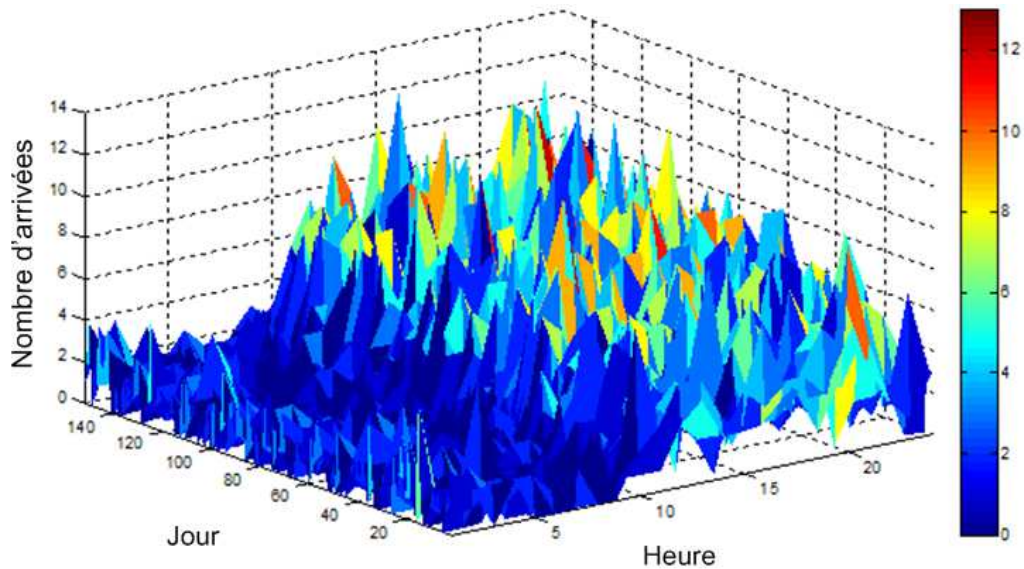


Figure V-10 : Nombre d'arrivées de patients par heure de la journée relevé pendant la période épidémique (Novembre 2011 à Mars à 2012).

Le nombre moyen d'arrivées par heure de la journée et la fonction d'auto-corrélation correspondante (ACF) sont présentés dans les figures V-11(a) et V-11(b) respectivement.

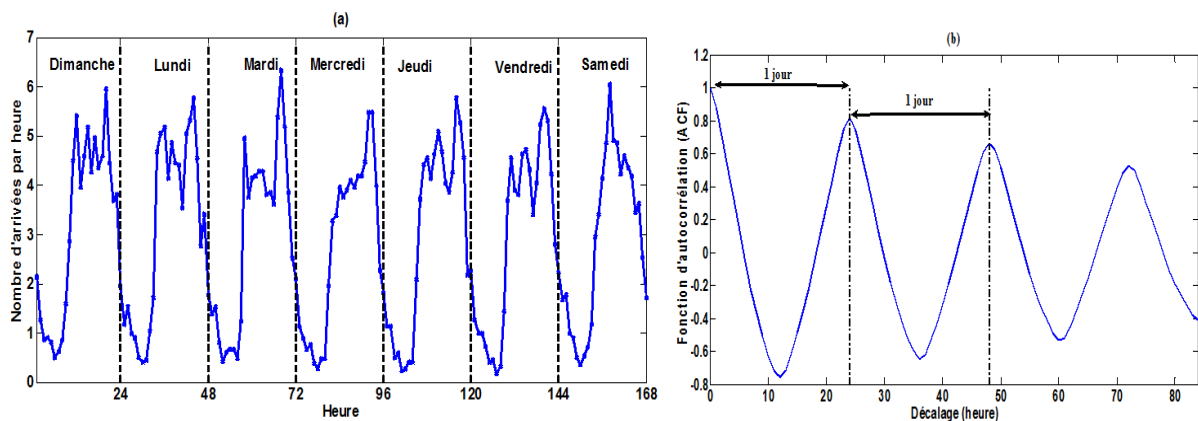


Figure V-11 : (a) Nombre de patients admis au SUP par heure sur une période de 24h, et (b) fonction d'auto-corrélation (ACF).

On constate sur la figure V-11(a), que l'allure du nombre d'arrivées des patients suit un cycle typique; les lignes pointillées verticales représentent la transition entre deux jours consécutifs. Cette figure présente la saisonnalité à intervalles réguliers de 24 heures. La figure V-11(b), montre clairement une périodicité de l'ACF de 24 heures (période entre les sommets adjacents dans l'ACF).

### 3.2.3. Nombre d'arrivée par type de données

Cette étude a été menée en utilisant l'ensemble des données extraites de la base de données de SUP du CHRU-Lille. Les données utilisées sont les variables des séries chronologiques journalières recueillies, de Janvier 2012 à Décembre 2012 (voir table V-5).

Table V-5 : Variables utilisées.

Séries	Variabes	Définition
$y_1$	Nombre d'arrivées	Nombre de patients qui arrive au SUP par jour
$y_2$	CCMU 1	Nombre de patients qui arrive au SUP par jour de type CCMU 1
$y_3$	CCMU 2	Nombre de patients qui arrive au SUP par jour de type CCMU 2
$y_4$	GEMSA 2	Nombre de patients qui arrive au SUP par jour de type GEMSA 2
$y_5$	Biologie	Nombre de patients par jour ayant passé un examen de biologie
$y_6$	Radiologie	Nombre de patients par jour ayant passé un examen de radiologie
$y_7$	Scanner	Nombre de patients par jour ayant passé un scanner
$y_8$	Echographie	Nombre de patients par jour ayant passé un examen d'échographie

Certaines statistiques descriptives (minimum, médiane, 1<sup>er</sup> quartile et 3<sup>ème</sup> quartile, et maximum.) de chaque variable sont illustrées dans la figure V-12.

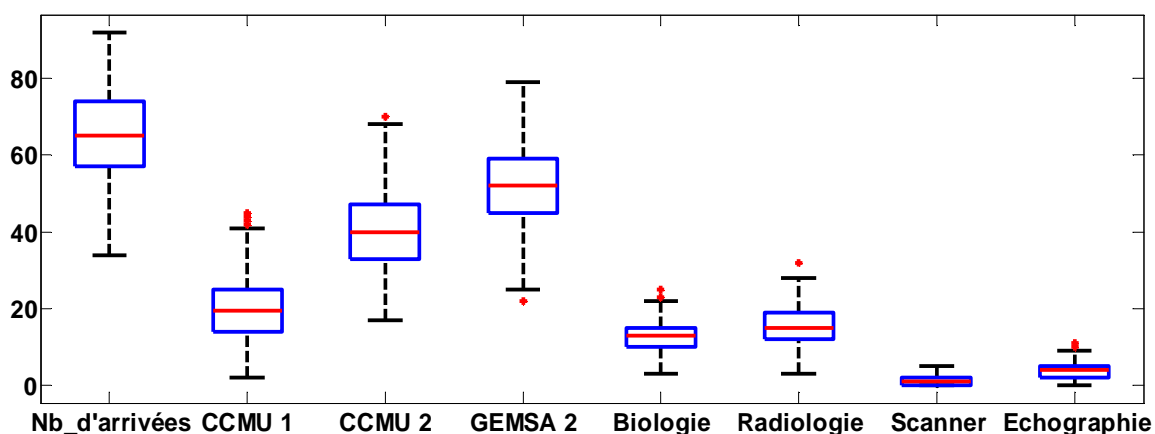


Figure V-12 : Boîte à moustache des huit variables utilisées.

## 4. Modèles développés pour le SUP

### 4.1. Modèles de prévision du nombre d'arrivées journalières au SUP

Les modèles de prévision du nombre d'arrivées journalières ont été élaborés pour les trois séries (G2, G4, et Total). Afin d'identifier les modèles, les données des trois séries sont divisées en deux ensembles : un premier ensemble constitue les données d'apprentissage utilisées pour construire le modèle, le deuxième ensemble (données de test) est utilisé pour valider le modèle final. Dans notre étude, les données d'apprentissage utilisées sont le nombre d'arrivées journalières au SUP du 01 janvier au 22 décembre 2012.



#### 4.1.1. Modèles ARMA sélectionnés

Pour trouver les meilleurs modèles ARMA, qui expliquent au mieux les données des séries utilisées, nous avons utilisé la méthodologie de Box and Jenkins, (1976) pour estimer les paramètres caractérisant chaque série de données. Les ordres (p,q) de chaque modèle sont fixés par l'analyse des fonctions d'auto-corrélations simple (ACF) et partielle (PACF) de chaque série chronologique. L'estimation des paramètres ( $a_i$  et  $b_j$ ) de chaque modèle proposé peut être réalisée par plusieurs méthodes. Dans cette étude, les paramètres des modèles ARMA ont été estimés en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance qui a comme avantage de prendre l'ensemble des données de chaque série étudiée (Shumway and Stoffer, 2011).

Nous avons établi que le meilleur modèle pour la série G4 est ARMA (1,1). Les meilleurs modèles pour la série G2 et la série Total sont des modèles ARMA (2,1). Les paramètres estimés pour chaque modèle proposé sont présentés dans la table V-6. L'équation mathématique des trois modèles ARMA pour les arrivées quotidiennes au SUP sont donnés comme suit (B est l'opérateur de retard) :

$$(1 - 0.36B - 0.07B^2)Y_t^{G2} = \mu + (1 - 0.4B)\varepsilon_t \quad (V-1)$$

$$(1 - 0.24B)Y_t^{G4} = \mu + (1 - 0.235B)\varepsilon_t \quad (V-2)$$

$$(1 - 0.22B - 0.01B^2)Y_t^{Total} = \mu + (1 - 0.23B)\varepsilon_t \quad (V-3)$$

Table V-6 : Paramètres des trois modèles proposés

Paramètres	G2, ARMA (2,1)	G4, ARMA (1,1)	Total, ARMA (2,1)
$a_1$	$0.36 \pm 0.013$	$0.24 \pm 0.016$	$0.22 \pm 0.070$
$a_2$	$0.07 \pm 0.012$	-	$0.01 \pm 0.069$
$b_1$	$0.4 \pm 0.030$	$0.235 \pm 0.031$	$0.23 \pm 0.030$

La figure V-13 montre les valeurs observées de chaque série brute (G2, G4 et Total) avec les valeurs ajustées par les modèles ARMA(2,1), ARMA(1,1) et ARMA(2,1) respectivement. Les diagrammes de dispersion des données prédites par les trois modèles ARMA proposés par rapport aux données observées et la droite de régression sont présentés dans la figure V-14. On observe que les points sont bien distribués le long de la ligne diagonale.

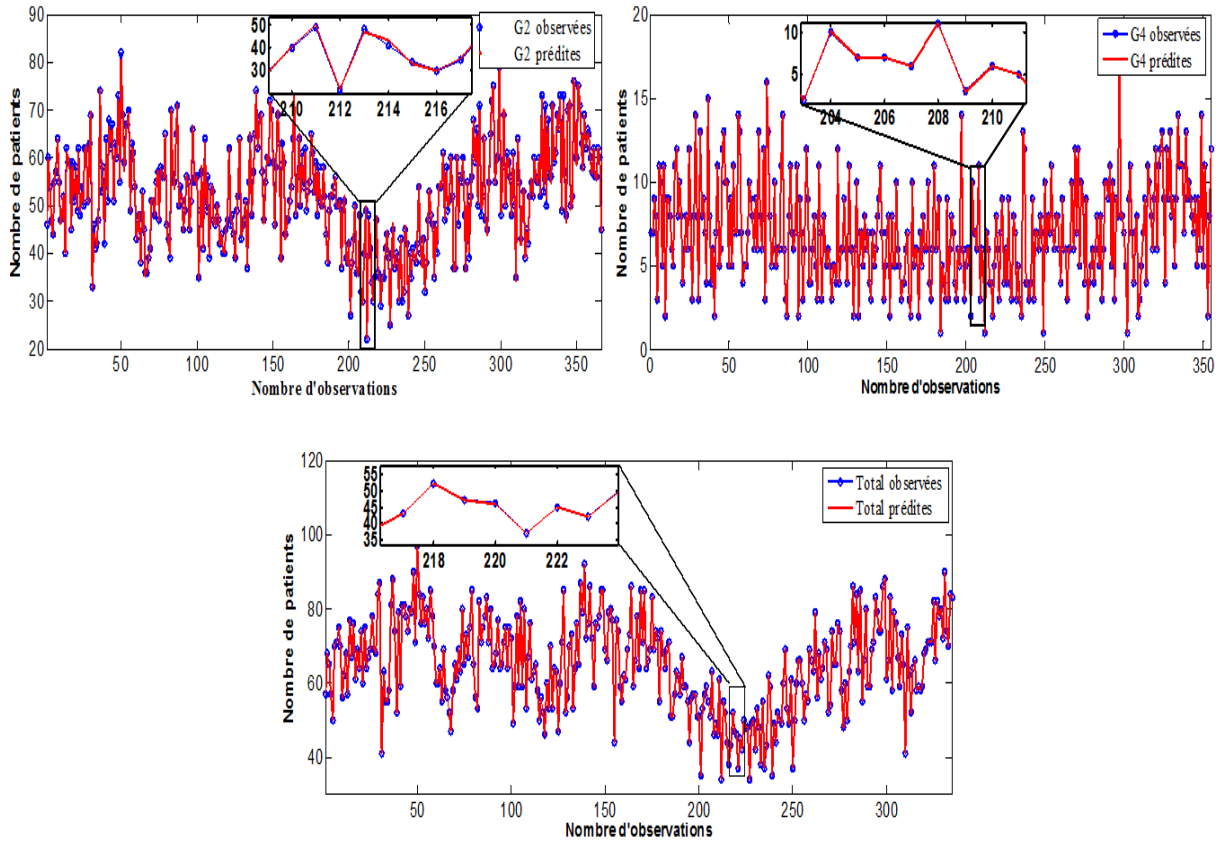


Figure V-13 : Données des séries brutes (G2, G4 et Total) et les données ajustées par les trois modèles.

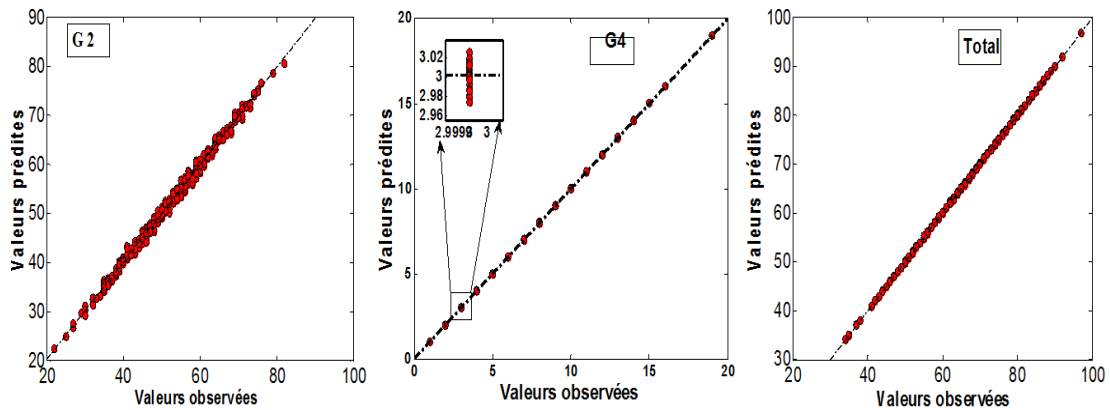


Figure V-14 : Diagrammes de dispersion des données prédites par rapport aux données observées

Les modèles prennent donc en compte les auto-corrélations significatives présentes dans les données. Par ailleurs, il n'y a aucune indication d'une courbure ou autres anomalies. Les figures V-13 et V-14 indiquent que les performances des modèles sélectionnés sont très satisfaisantes.

4.1.2. Validation des modèles

a) Capacité de prédiction d'un modèle (qualité de la prévision)

Il existe plusieurs approches dans la littérature pour évaluer la capacité de prédiction d'un modèle (voir annexe A 2.3.3). Dans cette étude, nous avons utilisé l'erreur quadratique moyenne (EQM) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ) pour évaluer les modèles sélectionnés (voir table V-7).

a.1) *Evaluation avec le critère EQM* : le critère EQM représente l'écart moyen des valeurs prédites par rapport à celles observées, il est défini comme suit :

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum(\hat{Y}-Y)^2}{n}} \tag{V-4}$$

où  $Y$  est la valeur mesurée,  $\hat{Y}$  représente la valeur prédite correspondante, et  $n$  est le nombre d'échantillons.

a.2) *Evaluation avec le critère  $R^2$*  : ce critère est défini comme suit :

$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SSY} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \tag{V-5}$$

où  $Y_i$  présente les valeurs observées,  $\hat{Y}_i$  représente les valeurs prédites obtenues à partir du modèle sélectionné et  $\bar{Y}$  est la moyenne des données observées.

SSR est la somme des carrés des résidus (somme des carrés des erreurs de prévision). SSY est le modèle théorique de référence où pour chaque réponse expérimentale (données observées) une valeur constante est calculée comme la moyenne de la réponse expérimentale.  $R^2 = 1$ , indique que le modèle s'adapte parfaitement aux données. Le degré d'ajustement, diminue au fur et à mesure que  $R^2$  se rapproche de zéro.

Table V-7 : Mesures de validation statistiques appliquées aux données des trois modèles sélectionnés pour les séries G2, G4 et Total.

Paramètres	G2, ARMA (2,1)	G4, ARMA (1,1)	Total, ARMA (2,1)
EQM	0.781	0.015	0.141
$R^2$	0.99	0.99	0.99

Comme le montre la table V-7, la grande valeur de  $R^2$  et la faible erreur quadratique moyenne (EQM) montrent que les trois modèles sélectionnés représentent bien les trois séries G2, G4 et Total.

b) Analyse des résidus

Cette étape de validation consiste à évaluer la distribution des résidus. Les résidus d'un "bon" modèle doivent posséder les propriétés de normalité, de linéarité, d'homoscédasticité et d'indépendance.

Tout d'abord il est nécessaire de vérifier si les résidus sont distribués selon une loi normale. Dans cette étude, la normalité des résidus a été vérifiée par l'analyse de la droite de Henry et de l'histogramme et illustrée par les figures V-15, V-16 et V-17 pour les séries G2, G4 et Total, respectivement. Ces figures montrent que l'hypothèse d'une distribution normale pour les résidus est satisfaisante.

L'absence d'auto-corrélation entre les résidus a également été étudiée. Si les résidus respectent cette hypothèse, alors l'ACF empirique des résidus ne recèle pas de valeurs systématiques significativement différentes de 0 pour des retards différents de 0.

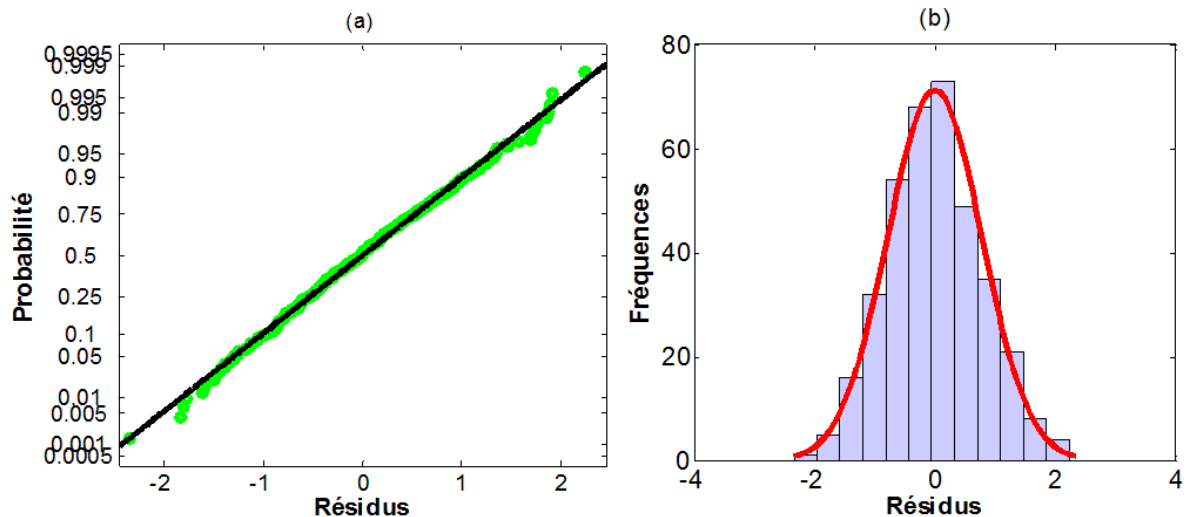


Figure V-15 : Test de distribution gaussienne a) la droite de Henry b) histogramme, G2.

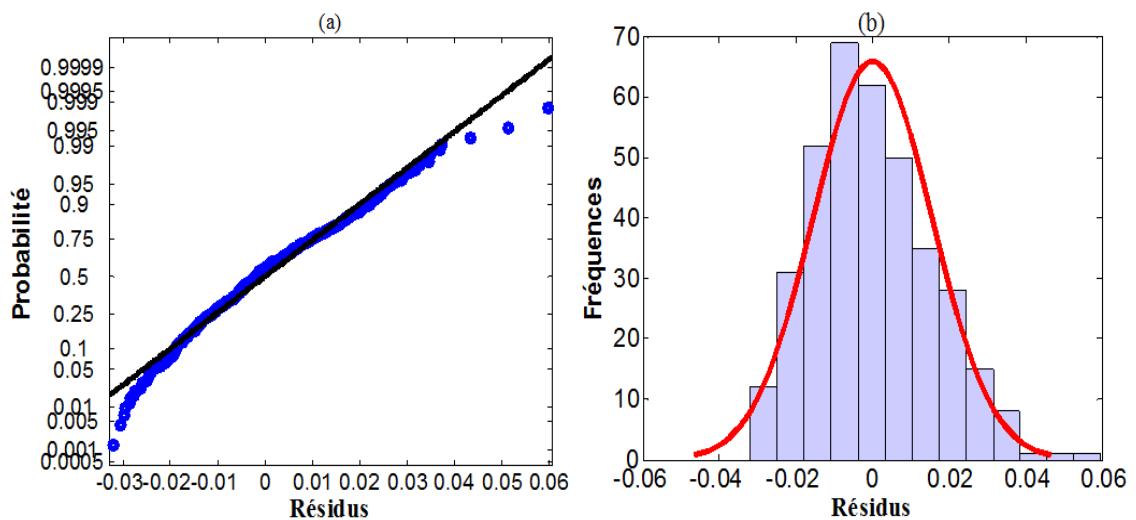


Figure V-16 : Test de distribution gaussienne a) la droite de Henry b) histogramme, G4.

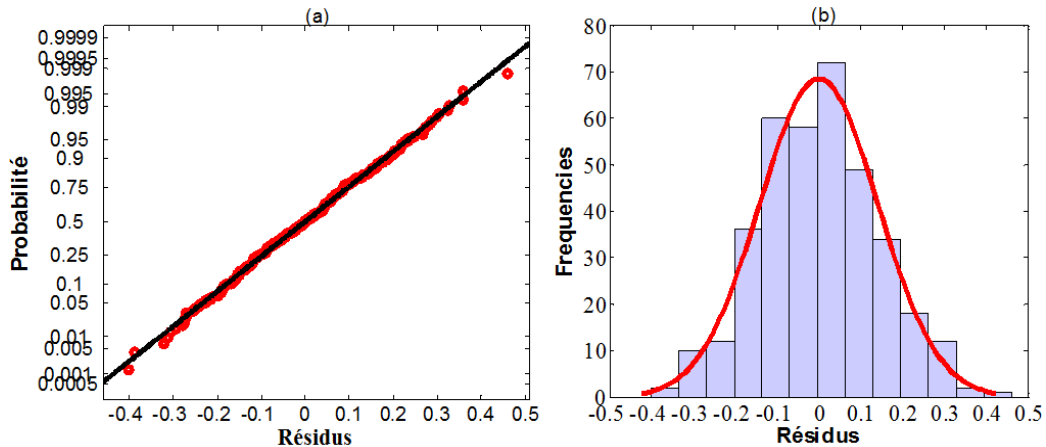


Figure V-17 : Test de distribution gaussienne a) la droite de Henry, b) histogramme de la série Total.

La figure V-18 qui présente la fonction d'auto-corrélation des erreurs résiduelles des trois modèles, montre que les résidus sont approximativement non corrélés. Comme les résidus sont normalement distribués et non corrélés, on en déduit que les trois modèles proposés correspondent à la réalité.

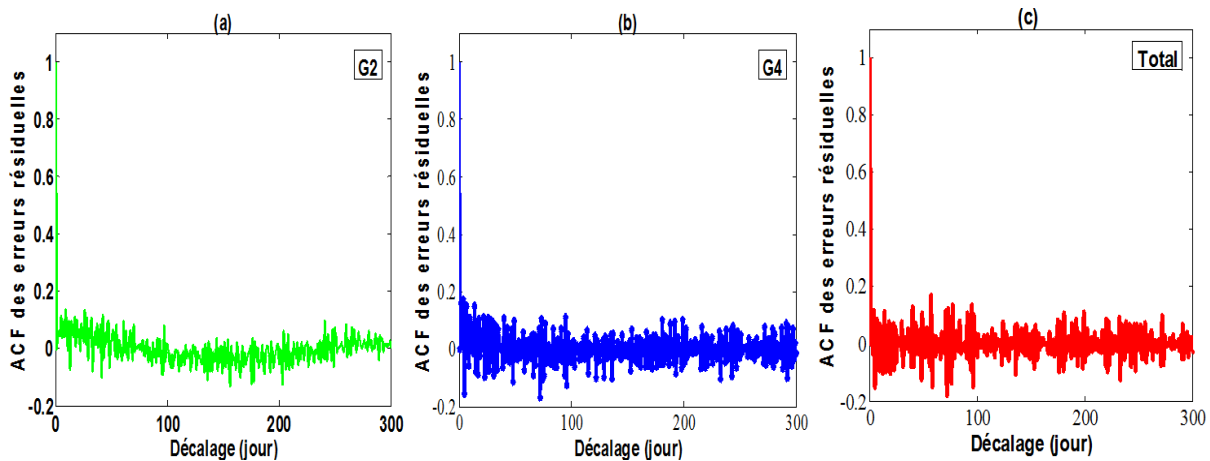


Figure V-18 : Fonction d'auto-corrélation des erreurs résiduelles a) G2 b) G4 c) Total.

Les modèles développés dans cette partie sont utilisés pour faire de la prévision du nombre d'arrivée de patients par jour au SUP. Les résultats de la prévision sont présentés dans le chapitre VI.

#### 4.2. Modèle de prévision du nombre d'arrivée par heure au SUP

En se basant sur la série chronologique présentée dans la figure V-11, on remarque que la série est stationnaire et présente une saisonnalité ( $s = 24$  heures). Cela nous a conduit à étudier un modèle Autorégressif et moyen mobile saisonnier SARMA  $(p, q) \times (P, Q)_{24}$ . Dans cette étude, les ordres du modèle SARMA  $(p, q) \times (P, Q)$  sont fixés par l'analyse des fonctions d'auto-corrélations simple (ACF) et partielle (PACF) et l'estimation des paramètres du modèle SARMA ont été estimés en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance.

#### 4.2.1. Modèle SARMA sélectionné

Le meilleur modèle estimé pour représenter le nombre d'arrivée par heure au SUP est un SARMA  $(1,1) \times (1,0)_{24}$ . En utilisant l'opérateur de retard  $B$  ( $B^m Y_t = Y_{t-m}$ ), la forme mathématique du modèle de SARMA est présentée par l'équation (V6), et les paramètres estimés sont présentés dans la table V-8.

$$(1 - 0.98B^{24})(1 - 0.77B)Y_t = (1 - 0.015B)\varepsilon_t \quad (V-6)$$

Table V-8 : Paramètres du modèle SARMA

Paramètres	$\theta$	$\varphi$	$\theta$
Valeur	0.98	0.77	0.015

#### 4.2.2. Validation du modèle SARMA

##### a) Capacité de prédiction (qualité de la prévision)

Dans cette partie, les deux tests statistiques utilisés pour évaluer la qualité du modèle SARMA construit sont : i) l'erreur absolue moyenne en pourcentage MAPE et le coefficient de détermination  $R^2$  (Annexe A.2.3.3). La table V-9 présente les mesures de validation statistiques appliquées au modèle SARMA. La valeur élevée de  $R^2$  et la faible valeur du MAPE du modèle de référence montrent que ce dernier est très représentatif de la série chronologique observée.

Table V-9 : Mesures de validation statistique appliquées du modèle SARMA

Paramètres	SARMA(1, 1) $\times$ (1, 0) <sub>24</sub>
$R^2$	0.89
MAPE	3.15%

##### b) Analyse des résidus

La vérification de normalité des résidus par l'analyse de la droite de Henry et de l'histogramme pour le modèle sélectionné SARMA sont illustrés dans la figure V-19. La figure montre que l'hypothèse d'une distribution normale pour les résidus semble raisonnable.

La fonction d'auto-corrélation (ACF) des résidus pour le modèle SARMA est présentée dans la figure V-20. Cette figure indique que les résidus ne sont pas significativement différents d'une série de bruits blancs et ne sont pas corrélés. Comme les résidus sont normalement distribués et non corrélés, on peut en déduire que le modèle s'ajuste bien aux données.

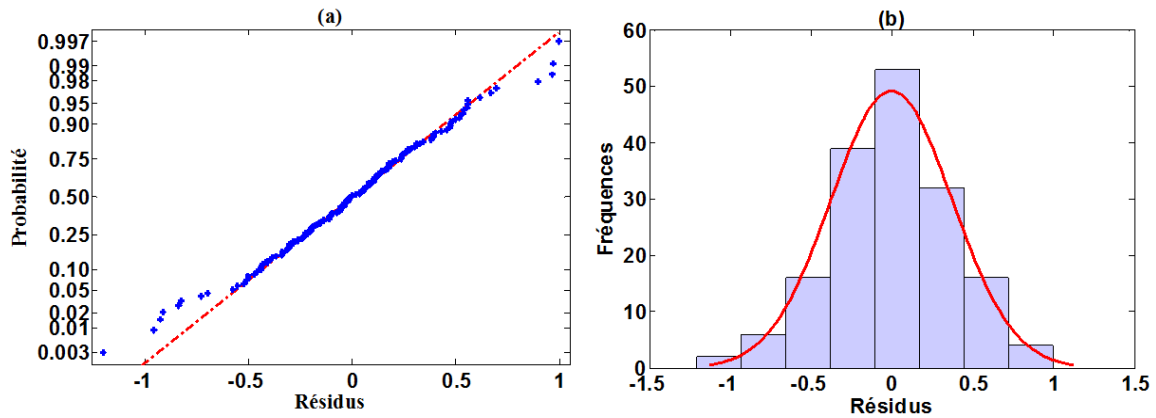


Figure V-19 : Test de distribution gaussienne a) la droite de Henry b) histogramme.

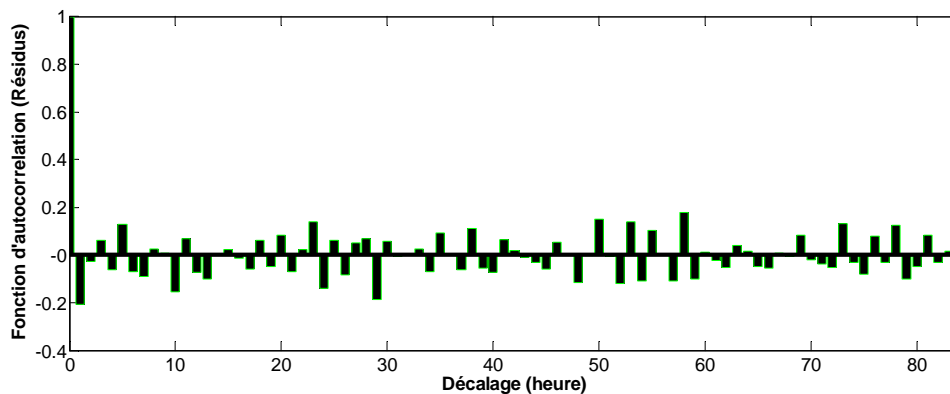


Figure V-20 : ACF des erreurs résiduelles du modèle SARMA.

Le modèle SARMA développé dans cette partie est intégré avec la carte de contrôle EWMA pour établir une méthodologie de détection précoce de l'apparition des situations de tension générées par les arrivées anormales de patients au SUP (voir figure IV-1 du chapitre IV). Les résultats sont présentés dans le chapitre VI.

#### 4.3. Modèle ACP

Dans cette partie, les valeurs moyennes des données des huit séries présentées dans la table V-3 sont utilisées comme données d'apprentissage (données nominales) représentant la situation normale (état de fonctionnement normal du SUP). Ces données sont utilisées pour construire un modèle de référence ACP du comportement nominal du SUP.

##### 4.3.1. Construction de modèle ACP

Les données utilisées comprennent huit variables chronologiques ( $m = 8$ ). Ainsi, la matrice de données (362 lignes, 8 colonnes), est utilisée pour construire le modèle ACP après la standardisation (centrer et réduire) des huit variables

L'approche ACP suppose que le sous-espace normal peut être correctement décrit par les premières composantes principales (CPs) qui capturent le plus haut niveau de l'information. La méthode de variance de pourcentage cumulatif (Cumulative Percent Variance, CPV), est utilisée pour déterminer le nombre de CPs. Dans ce cas, le seuil de la variance cumulative est

de 90%. Nous avons gardé les cinq premières CPs (44,86%, 17,33%, 12,82%, 10,08% et 7,73% des variations totales) car elles capturent 92,82% d'informations contenant dans les variances des données utilisées (figure V-21). Par conséquent, ces cinq premières CPs sont utilisés pour construire le modèle de surveillance.

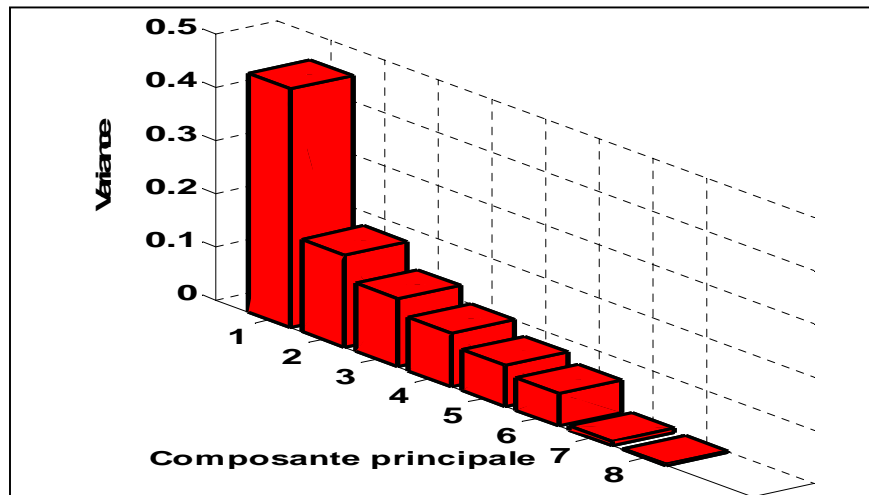


Figure V-21 : Variance capturée par chaque composante principale (CP).

#### 4.3.2. Validation du modèle ACP

##### a) Capacité de prévision

Une fois le nombre de CPs déterminé, tester la capacité de prédiction du modèle ACP est l'une des étapes les plus importantes. Pour illustrer la qualité du modèle ACP construit, une approche commune et simple consiste à effectuer une régression sur les valeurs observées versus les valeurs estimées par le modèle de référence (ou vice versa). Le diagramme de dispersion des valeurs observées versus les valeurs prédites obtenues à partir du modèle ACP sélectionné est présenté la figure V-22. Cette figure, montre que les points sont alignés suivant la diagonale. Les valeurs prédites coïncident donc avec les valeurs observées et aucune indication d'une courbure ou d'autres anomalies n'apparaissent. On peut remarquer que le modèle ACP fournit des prédictions satisfaisantes des données de SUP considérées dans l'analyse. Cependant, comme nous avons pu le constater, pour certaines variables, comme celles concernant la radiologie et le scanner les estimations sont moins bonnes que dans les autres cas.

Nous allons maintenant examiner l'effet de ces erreurs de modélisation sur la détection des situations anormales dans le SUP.



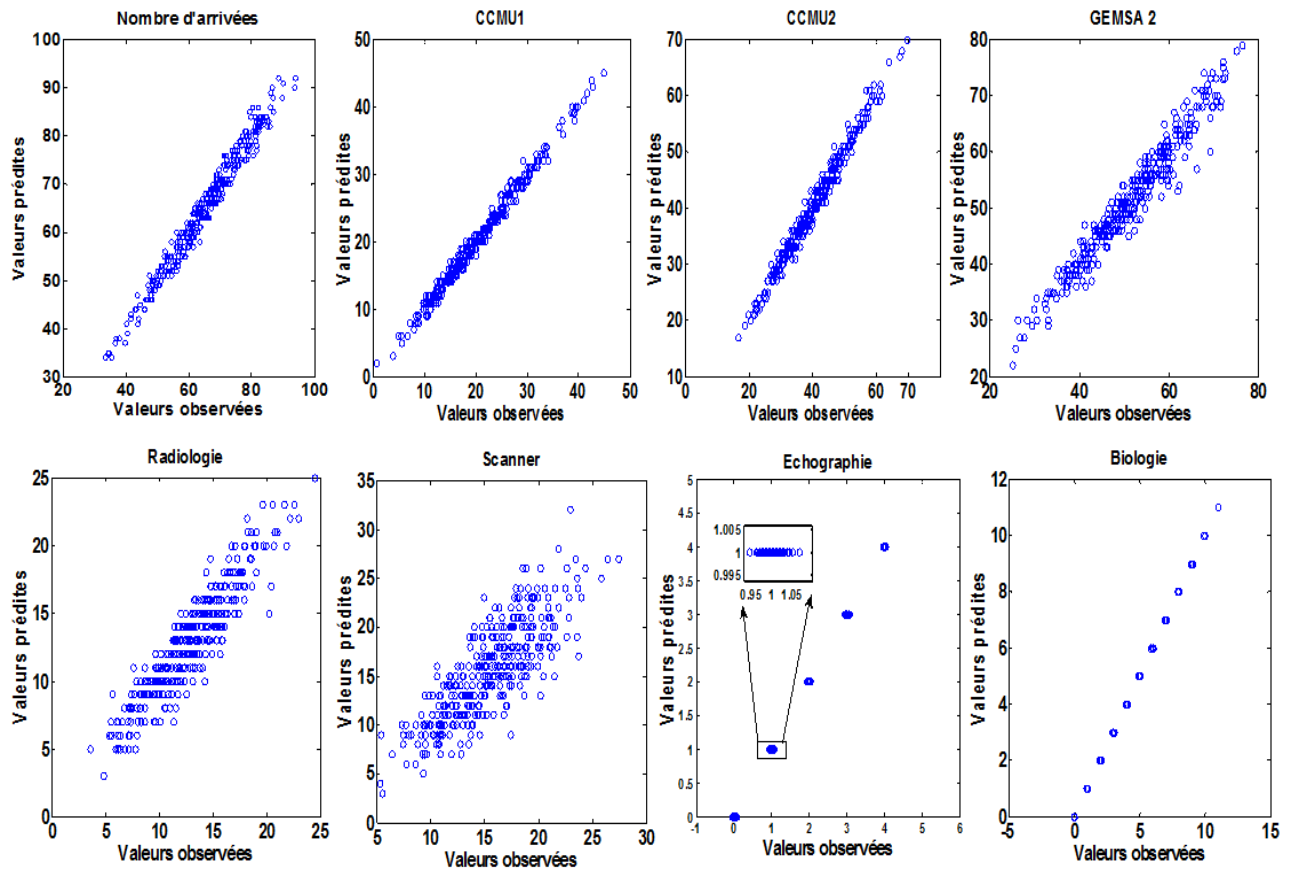


Figure V-22 : Diagramme de dispersion des valeurs observées versus les valeurs prédites obtenues à partir du modèle ACP.

*b) Analyse des résidus*

Avant d'appliquer les méthodes de détection d'anomalies basées de l'ACP, il est également nécessaire de vérifier si les résidus suivent une distribution gaussienne. Dans notre cas, les résidus qui n'ont pas été capturés par le modèle ACP (voir Annexe C.2) sont représentés par la matrice d'erreur **E**. La normalité est vérifiée : i) par le test de normalité multivariée de Mardia, (1974) indiqué table V-10, et ii) par les histogrammes des vecteurs résiduels présentés figure V-23. D'après la figure V-24, les résidus sont approximativement non-corrélés. Par conséquent, on peut conclure que les données présentent une distribution normale, et ne sont pas auto-corrélées.

Table V-10 : Test de normalité multivariée

Tests	Statistique	P-value
Skewness	0,002	0,76
Kurtosis	2,70	0,24

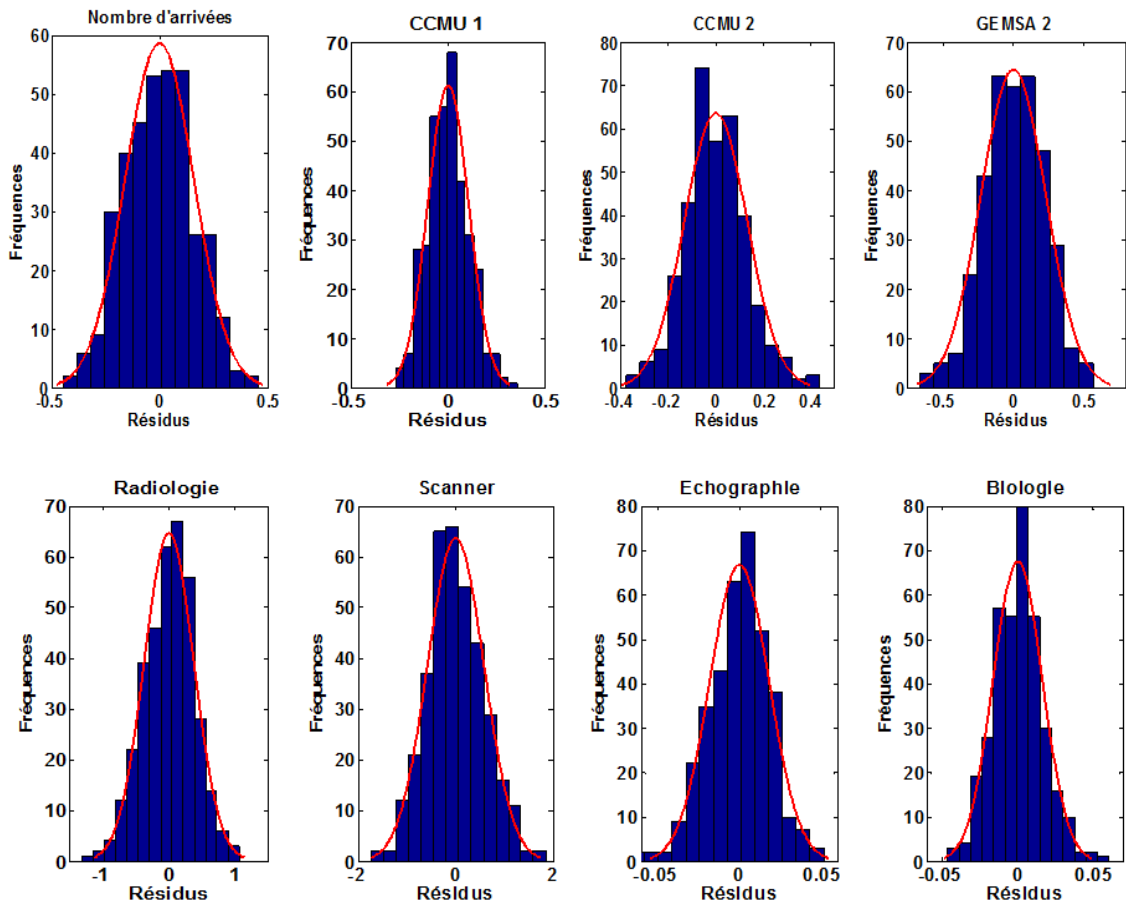


Figure V-23 : Histogramme des résidus.

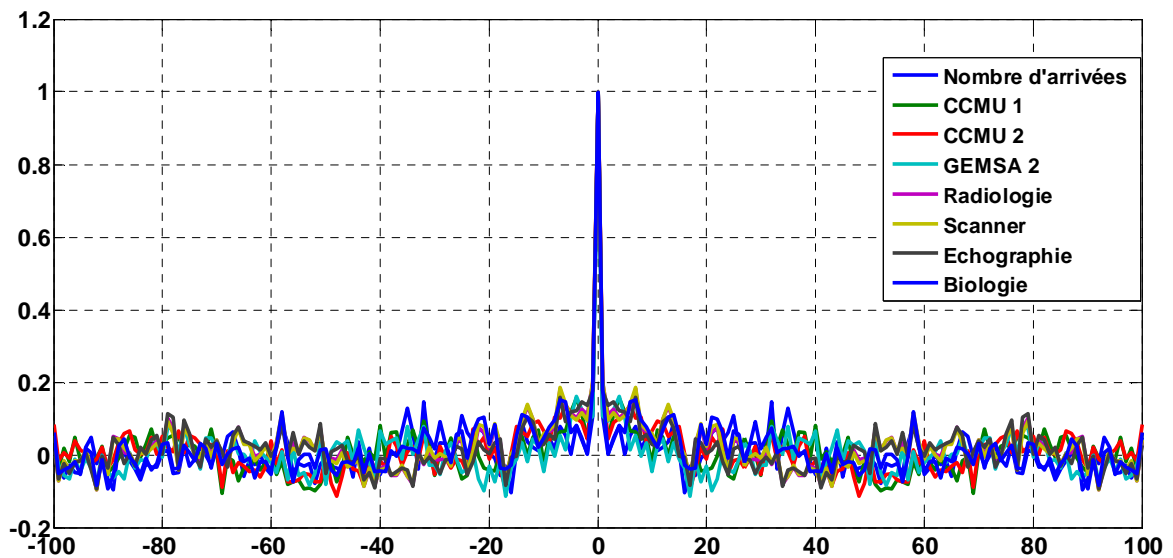


Figure V-24 : ACF des erreurs résiduelles.

Le modèle ACP développé dans cette partie est intégré avec la carte de contrôle multivariée MCUSUM pour établir une méthodologie de surveillance et de détection d'apparition de situations de tension qui peuvent être générées par les différents types de

demandes de soins au SUP (voir figure IV-2 du chapitre IV). Les résultats de la détection sont présentés dans le chapitre VI.

#### 4.4. Modèle de parcours de prise en charge des patients

La structure des processus de prise en charge des patients au niveau de SUP est illustrée figure V-2. Les informations requises pour instancier les modèles présentés chapitre IV ont été recueillies à partir de l'analyse de la base de données de SUP, des entretiens et de questionnaires menés auprès des personnels de santé du SUP. Le modèle de simulation a été implémenté avec le logiciel SIMAN ARENA.13.9.

##### 4.4.1. Patient critique Type 1

Le patient de type 1 (état critique) est pris en charge directement par l'hôtesse de SUP avant de le mettre dans la salle d'urgence vitale (figure V-25). Après les soins d'urgence vitales, La plupart des patients (80%) passent par l'unité d'hospitalisation de courte durée (UHCD) avant d'être transférés dans un autre service du CHRU-Lille ou un autre établissement. 3 % de ces patients passent plus de 23 heures en UHCD (LOS >23h).

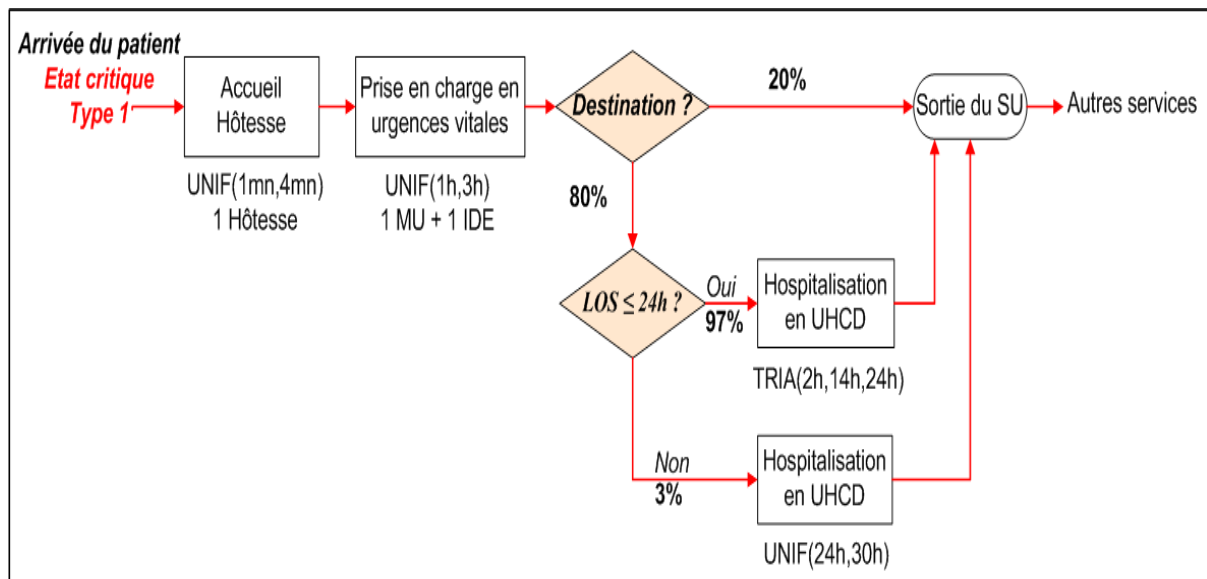


Figure V-25 : Parcours du patient type 1.

##### 4.4.2. Patient urgent de type 2

Le patient de type 2 (état urgent sans examens complémentaires) est pris en charge par l'agent administratif (accueil administratif des urgences de CHRU. L'enregistrement administratif est commun pour les urgences pédiatriques et les urgences pour adultes. Le patient est ensuite dirigé vers l'accueil du SUP où il sera pris en charge directement par l'hôtesse, puis consulté par une infirmière, puis un médecin avant d'être orienté vers une des chambres de l'unité d'hospitalisation de courte durée (UHCD) afin de surveiller ses constantes (figure V-26).

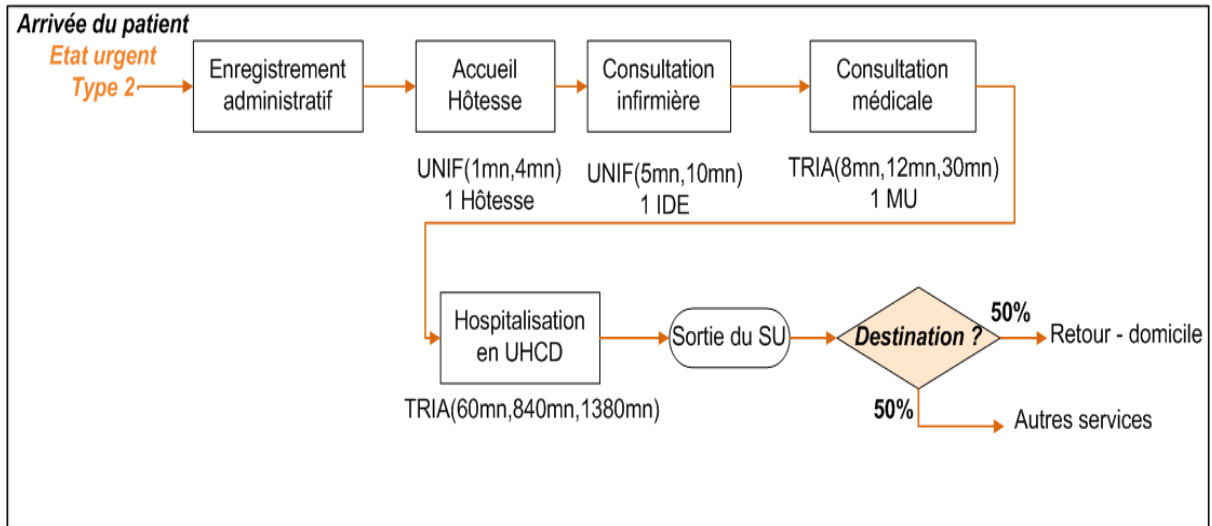


Figure V-26 : Parcours du patient type 2.

#### 4.4.3. Patient urgent de type 3

Le patient de type 3 (état urgent avec examens complémentaires) a le même parcours de prise en charge qu'un patient de type 2. En outre, le patient de type 3 peut faire un ou plusieurs examens complémentaires (figure V-27). Certains examens complémentaires sont partagés avec les urgences pour adultes, ce qui a une influence forte sur le temps de séjour de ce type de patient.

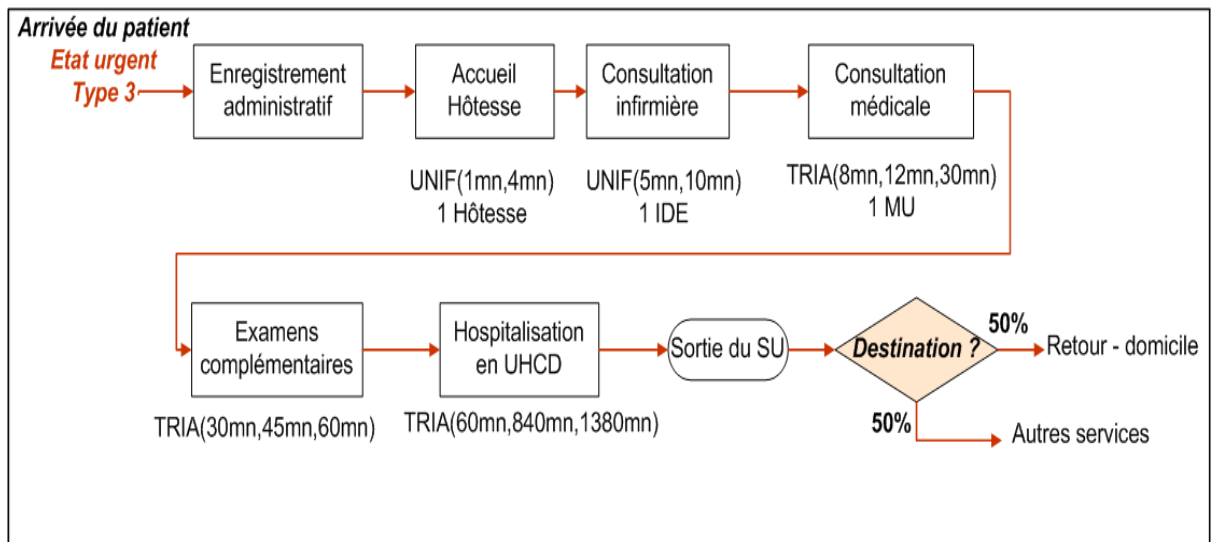


Figure V-27 : Parcours du patient type 3.

#### 4.4.4. Patient non urgent de type 4

Le patient de type 4 (état non urgent sans examens complémentaires), il est pris en charge, dès son arrivée aux urgences, par l'agent administratif. Le patient est ensuite dirigé directement vers le SUP où il sera pris par l'hôtesse d'accueil. Cette dernière le dirige vers la salle d'attente. Après la consultation infirmière, le patient revient en salle d'attente pour

attendre la consultation médicale. Dès qu'un médecin se libère, celui-ci consulte le patient avant sa sortie (Figure V-28).

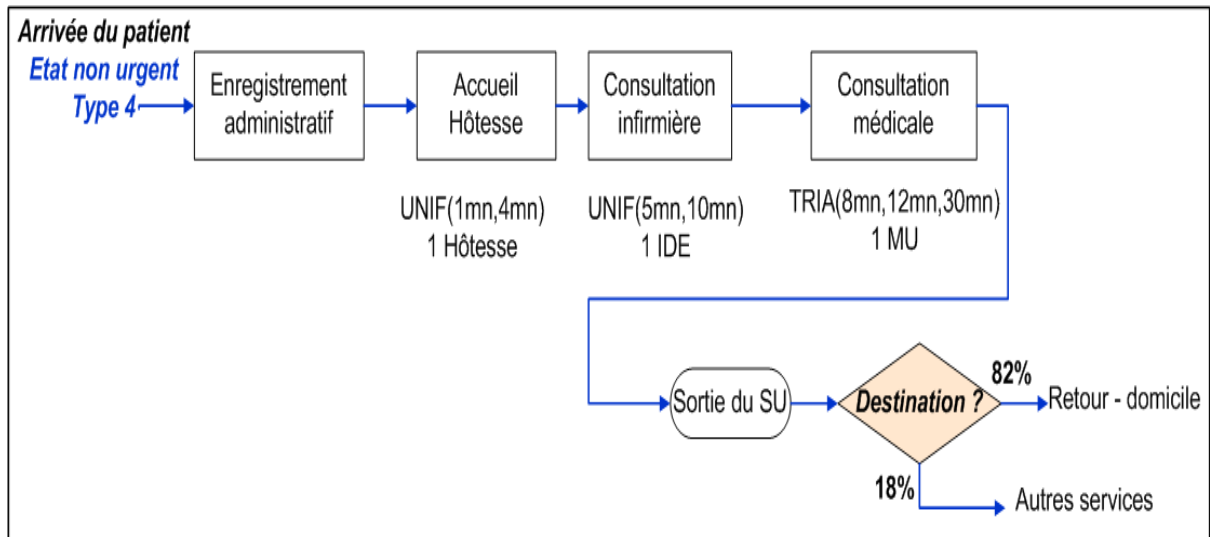


Figure V-28 : Parcours du patient type 4.

#### 4.4.5. Patient non urgent de type 5

Le patient de type 5 (état non urgent avec examens complémentaires) a le même parcours que patient de type 4, mais avec un ou plusieurs examens complémentaires. Après les examens complémentaires, ce type de patient doit attendre une deuxième consultation médicale pour un retour à domicile ou un transfert vers un autre service du CHRU-Lille ou un autre établissement hospitalier (figure V-29). Le temps de séjour des patients de type 5 est très variable étant donné qu'ils ne sont ni urgents ni prioritaires.

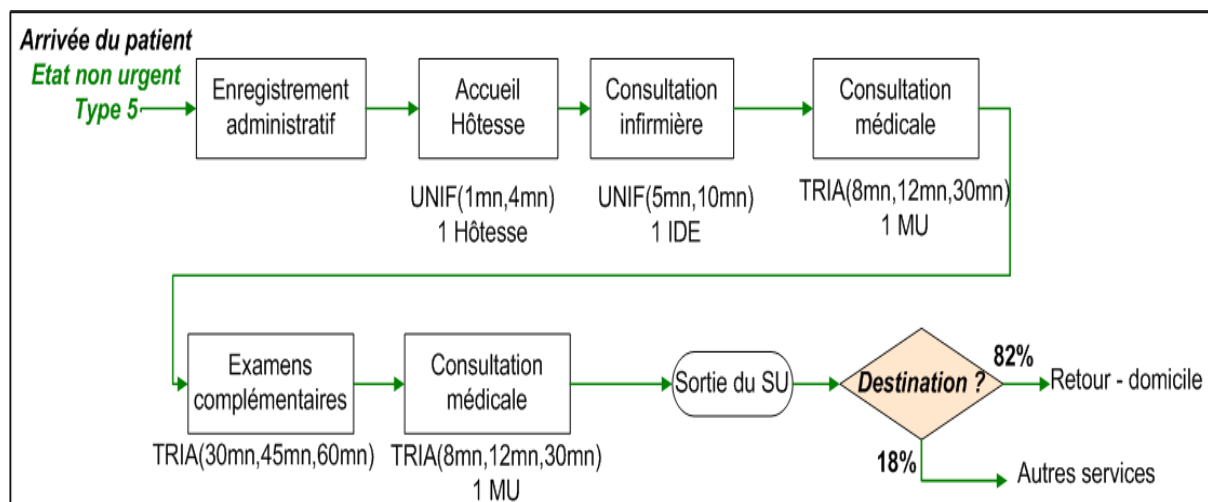


Figure V-29 : Parcours du patient type 5.

#### 4.5. Indicateurs de tension et actions de corrections possibles au niveau du SUP

##### 4.5.1. Indicateurs de tension du SUP

Les indicateurs de tension mesurables que nous avons sélectionnés et validés avec le personnel médical du service d'urgence pédiatrique (SUP) de Lille sont :

- 1) **PW** : temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et le premier examen médical
- 2) **T<sub>2</sub>** : temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et la consultation infirmière.
- 3) **N<sub>p</sub>** : nombre des patients présents au SUP à l'arrivée d'un nouveau patient
- 4) **PM** : rapport du nombre de patients présents au SUP au nombre de médecins potentiellement disponibles :

$$PM = \frac{\text{Nb patients}}{\text{Nb médecins}}$$

Le nombre de médecins changeant selon la période de la journée, PM est actualisé à chaque changement de période.

- 5) **Q<sub>s</sub>** : rapport du temps de séjour réel au SUP d'un patient en état non urgent LOS<sub>réel</sub>, au temps de séjour théorique LOS<sub>th</sub>. Le LOS<sub>th</sub> au SUP est de 210 minutes.

$$Q_s = \frac{LOS_{réel}(t)}{LOS_{th}}$$

Les valeurs seuils validées par le personnel médical sont présentées table V-11.

Table V-11 : Valeurs seuils des indicateurs sélectionnés

Indicateurs de tension	Etats du SUP		
	Normal	Dégradé	Critique
<b>PW</b> (minutes)	PW < 60	60 ≤ PW < 90	PW ≥ 90
<b>T<sub>2</sub></b> (minutes)	T <sub>2</sub> < 25	25 ≤ T <sub>2</sub> < 50	T <sub>2</sub> ≥ 50
<b>N<sub>p</sub></b> (nombre patients)	N <sub>p</sub> < 12	12 ≤ N <sub>p</sub> < 20	N <sub>p</sub> > 20
<b>PM</b>	PM < 4	4 ≤ PM < 7	PM > 7
<b>Q<sub>s</sub></b>	Q <sub>s</sub> ≤ 0,8	0,8 ≤ Q <sub>s</sub> ≤ 1,5	Q <sub>s</sub> > 1,5

##### 4.5.2. Les actions de correction au SUP

Dans le cas du service d'urgence pédiatrique de Lille, on distingue deux types d'actions possibles : sur les entrées (et donc sur le flux de charge en soins), sur les ressources (humaines et matérielles).

**a) Actions sur le flux de charge en soins (flux patients) :**

1) *Flux patients en entrée :*

- diminuer les entrées : appeler le SAMU pour diriger les patients sur d'autres structures d'urgence,
- prise en charge des patients par le service des urgences adultes.

2) *Flux patients admis dans le SU :*

- appliquer des règles de priorité afin de mieux gérer le flux patients dans le SU pour limiter les temps d'attente et le temps de séjour. Ces règles peuvent être définies en fonction de différents critères : le type de patient, son temps de séjour, l'avancement de sa prise en charge, la combinaison d'un ou de plusieurs des critères précédents,
- transférer les patients de l'UHCD dans d'autres services, (hospitalisation interne) afin de libérer de la place,
- Ajuster les soins apportés aux patients.

**b) Actions sur les ressources :**

1) Ressources humaines : on distingue :

a. *Le personnel médical :*

- en journée (de 9h à 18h) : solliciter d'autres internes (2 à 4 maximum).
- le soir (de 18h à 24h) : solliciter 1 interne (du service de réanimation pédiatrique),
- prolonger le temps de travail (1 à 2 heures supplémentaires),
- appel des médecins externes hors service SUP.

b. *Le personnel soignant :* il n'y pas d'astreinte pour le personnel infirmier. On peut cependant prolonger le temps de travail (1 à 2 heures supplémentaires).

2) Ressources matérielles : transformer une ou deux chambre UHCD en box de consultation.

#### 4.5.3. Exemple de modèle CAST

En se basant sur la valeur seuil de chaque indicateur et les actions de correction possibles au SUP présentées précédemment, la table V-12 présente un exemple de modèle CAST (voir figure III-5 du chapitre III) :

- Contexte (C) : contexte événementiel : période épidémique (Novembre à Mars), contexte temporel : période de la journée (9h-18h).
- Objectif (O) : on prend ici comme exemple l'indicateur d'attente primaire (PW), avec pour objectif de minimiser le PW.
- Variable d'état (V) : le temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et le premier examen médical.
- Seuil (S) : la valeur seuil de l'indicateur PW (60' : passage en état dégradé, 90' : passage en état critique, table V-11).

- Action (A) : représente les actions possibles concernant cet indicateur : ajout d'une infirmière ou d'un médecin ou les deux simultanément.
- Efficacité (E) : nous choisissons le temps nécessaire pour lancer l'action correctrice ( $T_L$ ) et le temps de récupération ( $T_R$ ).

Table V-12 : Exemple de modèle CAST (voir figure III-5 du chapitre III)

Contexte	Objectif	Variables d'état	Action correctives possibles	Valeurs seuils (en minutes)	Etat du SU	Actions Correctives appliquées	Efficacité (E)	
							$T_L$	$T_R$
Période épidémique (Novembre à mars) et Période de la journée (9h - 18h)	Minimiser l'attente primaire PW	Temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et l'examen médical	- Ajout d'une infirmière(s), - Ajout d'un médecin(s), - Ajout d'un médecin (s) et d'une infirmière(s)	$PW \geq 60$	Dégradé	1 infirmière	1h30	4h45
					Dégradé	1 médecin	1h30	3h00
				$PW \geq 90$	Critique	1 infirmière et 1 médecin	2h	3h30

## 5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents modèles développés pour l'aide à l'anticipation et la gestion des situations de tension au service d'urgence pédiatrique du centre hospitalier régional universitaire (CHRU) de Lille.

Les modèles de prévision et de détection ont été élaborés et validés à l'aide des données du SUP. Les modèles de simulation ont été validés par le personnel médical du SUP qui a également fourni les durées et les valeurs seuils pour chaque indicateur.

Le chapitre suivant présente et analyse les différents résultats de l'application de ces modèles et leur utilisation pour le pilotage proactif et réactif du SUP.



# Chapitre VI : Expérimentations et résultats

## 1. Introduction

Le chapitre V a décrit les modèles développés pour le service d'urgence pédiatrique du CHRU de Lille. Ce chapitre présente et analyse les différents résultats de l'application de ces modèles.

La première partie présente les résultats concernant la prévision du nombre d'arrivées quotidiennes de patients au SUP en utilisant les modèles ARMA développés pour les séries G2, G4 et Total.

La deuxième partie présente les résultats de détection d'occurrence des situations de tension en appliquant les deux méthodologies de détection proposées (modèle SARMA avec la carte de contrôle EWMA, modèle ACP et carte de contrôle multivariée MCUSUM).

Les troisième et quatrième parties illustrent les résultats obtenus pour la gestion proactive et pilotage réactif du SUP.

Dans le cas du pilotage proactif, nous avons utilisé la simulation pour déterminer l'occurrence des situations de tension sans actions de correction et l'évolution des indicateurs de tension. Dans la deuxième étape, après avoir identifié les intervalles de temps durant lesquels le seuil d'un indicateur est franchi, nous avons proposé des actions de correction et évalué leur efficacité.

Pour le pilotage réactif du SUP, nous avons suivi l'évolution des cinq indicateurs de tension afin de proposer des actions de correction efficaces. Pour ce faire, nous avons proposé trois alternatives selon la nature des actions de correction, la règle de priorité dans l'ordre de passage des patients et le temps de lancement des actions de correction.

## 2. Prévision du nombre d'arrivées journalières de patients au SUP

Dans cette partie, les modèles ARMA des séries G2, G4 et Total sont utilisés pour la prévision du nombre d'arrivées journalières de patients au SUP. Les résultats de la prévision sont ensuite comparés avec les valeurs réelles.

### 2.1. Résultats obtenus

Les prévisions du nombre d'admissions quotidiennes au SUP sur un horizon H de sept jours (H=7) sont présentées figures VI-1, VI-2 et VI-3. La comparaison entre les données prédites et les données observées est présentée dans la table VI-1.

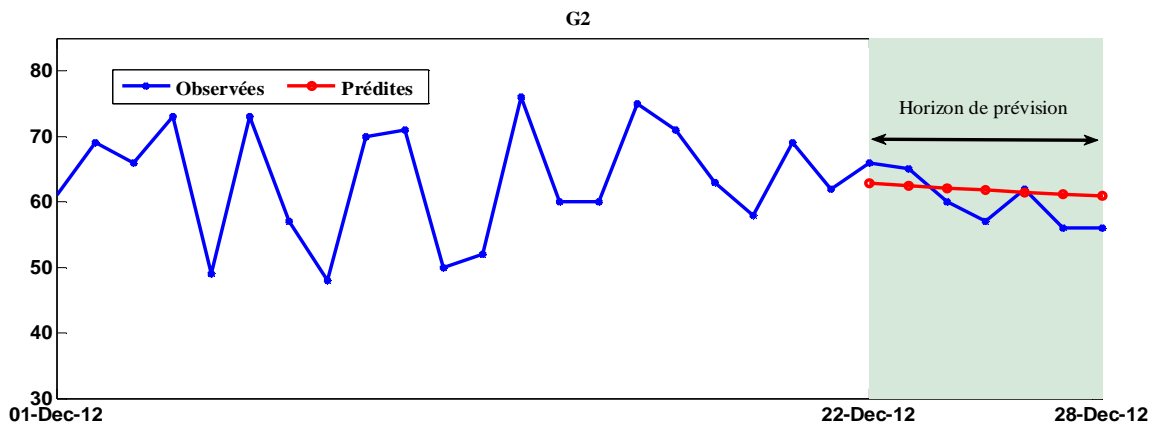


Figure VI-1 : Prédiction sur un horizon  $H = 7$  jours, série G2.

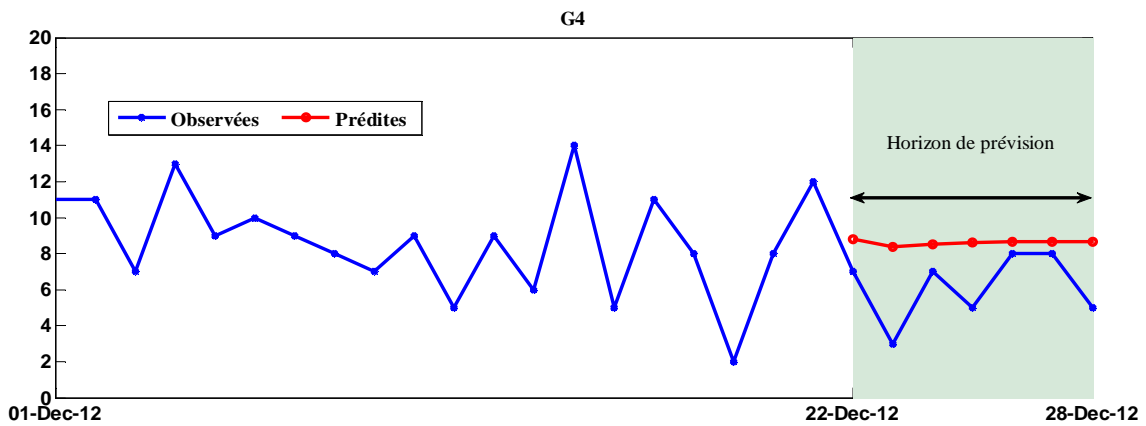


Figure VI-2 : Prédiction sur un horizon  $H = 7$  jours, série G4.

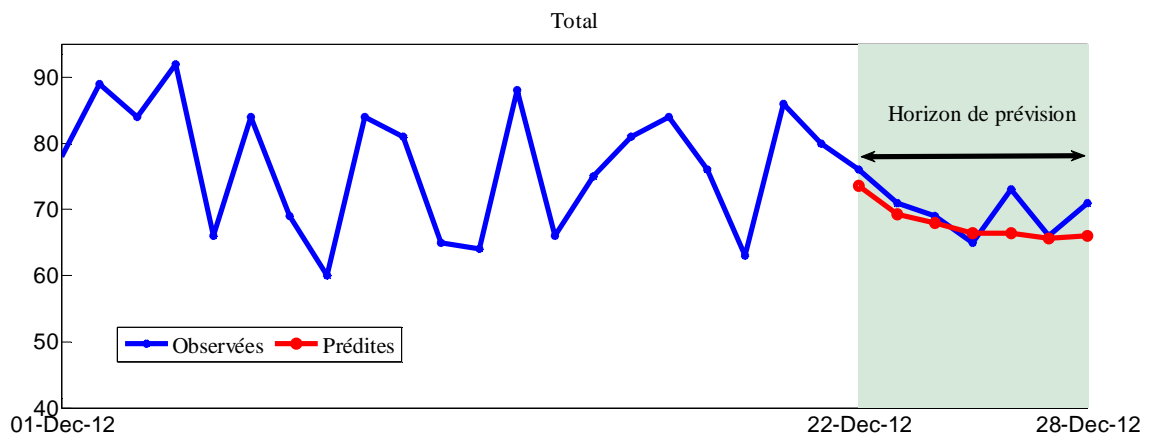


Figure VI-3 : Prédiction à un horizon  $H = 7$  jours, série Total.

La table VI-1 montre que l'erreur moyenne de la série G2 est de 3,32, avec un taux d'erreur de prévision de 5,5% (4 patients). Le taux d'erreur maximal enregistré pour cette catégorie est 9,26%. Dans le cas de la série G4, le nombre moyen d'arrivées journalières au SUP est de 8 patients, 50% du nombre d'arrivées se situent entre 6 et 9 patients (voir table VI-2). Les résultats obtenus avec ce modèle restent acceptables, le nombre de patients prévus est

supérieur ou égal au nombre réel moyen des arrivées de patients. Enfin, l'erreur moyenne de la prévision de la série G4 est de 2,05 (2 patients), avec un taux d'erreur de prévision de 31%. Cela est dû à la divergence de certaines valeurs des données réelles par rapport à la moyenne. Enfin, on peut noter que l'erreur moyenne de la prévision pour la série Total est de 2,66 (3 patients), avec un taux de 3,79% pour l'erreur de prévision. Le taux d'erreur maximum est de 9,03% pour l'horizon H = 5.

Table VI-1 : Comparaison réel/estimé du nombre d'arrivées journalières

Horizon H	Série G2 Nbre d'arrivées réel	Série G2 Nbre d'arrivées estimé	Erreur série G2	Série G4 Nbre d'arrivées réel	Série G4 Nbre d'arrivées estimé	Erreur série G4	Série Total Nbre d'arrivées réel	Série Total Nbre d'arrivées estimé	Série Total Erreur
1	66	62,80	3,19	7	8,82	1,82	76	73,52	2,47
2	65	62,41	2,58	6	8,39	2,39	71	69,28	1,71
3	60	62,09	2,09	7	8,53	1,53	69	67,93	1,06
4	57	61,77	4,77	5	8,62	3,63	65	66,41	1,41
5	62	61,47	0,52	8	8,65	0,65	73	66,41	6,58
6	56	61,18	5,18	8	8,65	0,65	66	65,64	0,35
7	56	60,90	4,90	5	8,65	3,65	71	65,98	5,01

Table VI-2 : Statistiques des deux séries G2 et G4.

Statistiques	Série G2	Série G4	Série Total
Moyenne	53	8	66
Médiane	52	7	65
Ecart type	10,88	3,10	12,52
Maximum	82	19	97
Minimum	22	1	34
Premier quartile	45	5	57
Troisième quartile	60	9	57

L'écart-type des erreurs de prévision est donné pour les trois modèles ARMA dans la table VI-3. Selon cette table, les valeurs maximales de ces écarts-types sont inférieures à 3 pour la série Total et inférieures à 2 pour les séries G2 et G4.

Table VI-3 : Les écarts-types d'erreurs de prévisions (de 22 au 28 décembre, 2012)

Séries	Ecart type des erreurs de prévision
G2	1.73
G4	1.78
Total	2.28

## 2.2. Discussion

Les résultats indiquent que les modèles des séries (G2, G4 et Total) proposés offrent une description et une performance de prévision acceptable des arrivées quotidiennes au SUP de CHRU de Lille. Ces modèles, en permettant d'estimer les arrivées futures de patients au SUP, procurent au responsable du SUP des informations utiles pour mieux organiser le service en planifiant les ressources, pour mieux gérer les patients et leur offrir ainsi un meilleur accueil au sein du SUP.

Cette étude appelle plusieurs remarques concernant les séries de données :

- la prévision des arrivées de patients au SUP sur une échelle de temps plus fine, comme les arrivées par heure, semble très intéressante. Mais une détection précise des arrivées anormales est nécessaire pour permettre aux responsables du SUP de réagir rapidement,
- l'utilisation de données supplémentaires pour prévoir l'occupation des ressources (personnel médical et boxes de consultation), les durées d'attente des patients, etc. A l'heure actuelle, nous ne disposons pas des données relatives à ces indicateurs nous permettant de proposer des modèles de prévision,
- les modèles de prévision multivariés peuvent être complétés par exemple, pour la prévision du nombre d'arrivées de patients, en utilisant d'autres variables explicatives comme les données des événements épidémiques et météorologiques (température, pollution, ...).

## 3. Détection d'occurrence des situations de tension au SUP

### 3.1. Détection univariée des arrivées anormales de patients au SUP

Dans cette partie, nous avons évalué la première méthodologie de détection univariée (combinaison du modèle SARMA et de la carte de contrôle univariée EWMA).

En absence de données de test contenant des anomalies réelles, deux anomalies ont été simulées :

- une anomalie brusque (cas A) correspondant à une augmentation soudaine des arrivées de patients et une situation anormale apparaît instantanément,
- une anomalie progressive (cas B) : le nombre d'arrivées de patients augmente progressivement et la situation anormale se développe lentement.

Les deux types d'anomalies sont représentés dans la table VI-4. Dans les deux cas, nous avons supposé une variation linéaire du nombre d'arrivées.

Notations :

- $y'_t$  désigne la valeur modifiée de  $y_t$  pendant la période durant laquelle l'anomalie est introduite,
- $k$  est le nombre d'échantillons à l'instant  $t$ ,  $k_s$  le nombre d'échantillons à l'instant où l'anomalie est injectée.

Table VI-4 : Les deux types d'anomalies simulées

Cas	Type d'anomalie	Modèle	Paramètres
Cas A	Anomalie brusque	$y'_t = y_t(1+b)$	b: taux d'augmentation de $y_t$
Cas B	Anomalie progressive	$y'_t = y_t + s(k - k_s)$	s : pente de la droite $y'_t$

### 3.1.1. Cas A : Anomalie brusque

Une anomalie a été introduite durant une période située entre les instants correspondant à un nombre d'échantillons  $k = 112$  et  $k = 120$  (soit une durée de 8 heures). Nous avons utilisé deux cas d'étude décrits table VI-5.

Table VI-5 : Arrivées anormales brusques des patients

Cas A	Description des anomalies
Cas $A_1$	Le taux d'augmentation est de 70% ( $b = 0,7, y'_t = 1,7y_t$ )
Cas $A_2$	Le taux d'augmentation est de 30% ( $b = 0,3, y'_t = 1,3y_t$ )

- a) **Cas A<sub>1</sub>** : la figure VI-4 présente les résultats de détection avec un paramètre de lissage de la carte EWMA,  $\lambda = 0,3$ . La zone ombrée en bleu représente la période durant laquelle les arrivées anormales simulées se produisent. La figure VI-4 montre clairement la violation des limites de contrôle, indiquée par les dépassements du seuil LCS. L'approche proposée permet donc de détecter correctement ce type d'anomalies sans fausses alarmes.

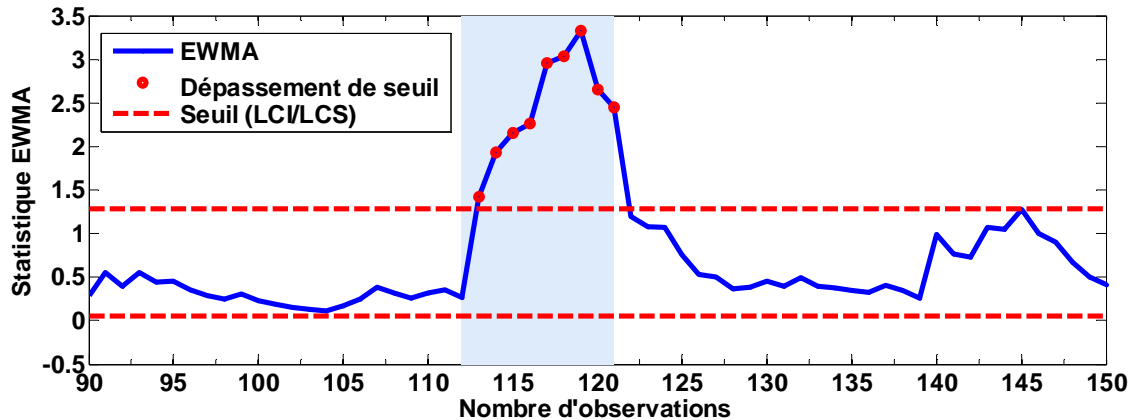


Figure VI-4 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une situation anormale (cas A<sub>1</sub>).

Les résultats de la stratégie de détection combinant la carte CUSUM et le modèle SARMA présentés dans la figure VI-5 montrent clairement la violation des limites de contrôle et donc la capacité de cette approche à détecter correctement un comportement anormal. La carte de contrôle CUSUM ne retrouve pas son état initial immédiatement après la fin de l'anomalie (nombre d'observations > 120), comme dans le cas précédent.

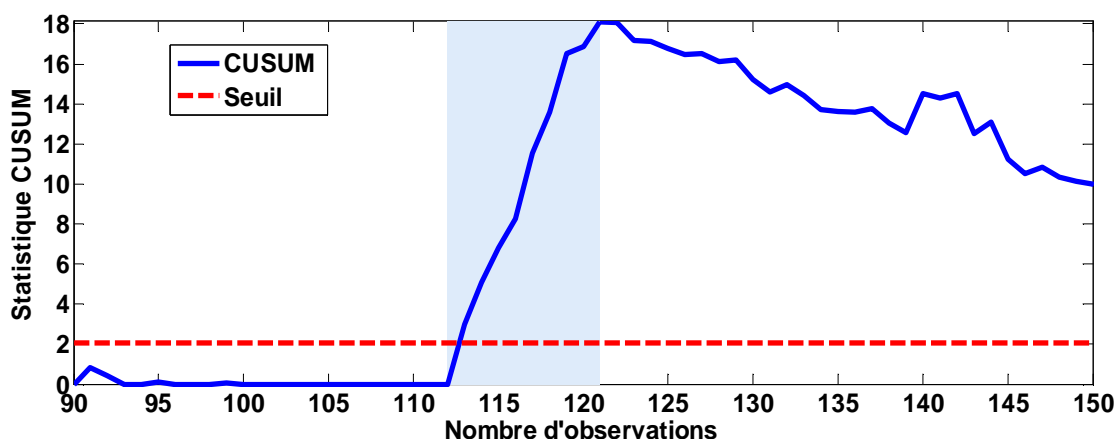


Figure VI-5 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte CUSUM en présence d'une situation anormale (cas A<sub>1</sub>).

La statistique de la carte de Shewhart type I-chart est présentée figure VI-6. En comparaison, on constate que les limites de contrôle de la carte ont été dépassées et une anomalie a été détectée, mais partiellement.

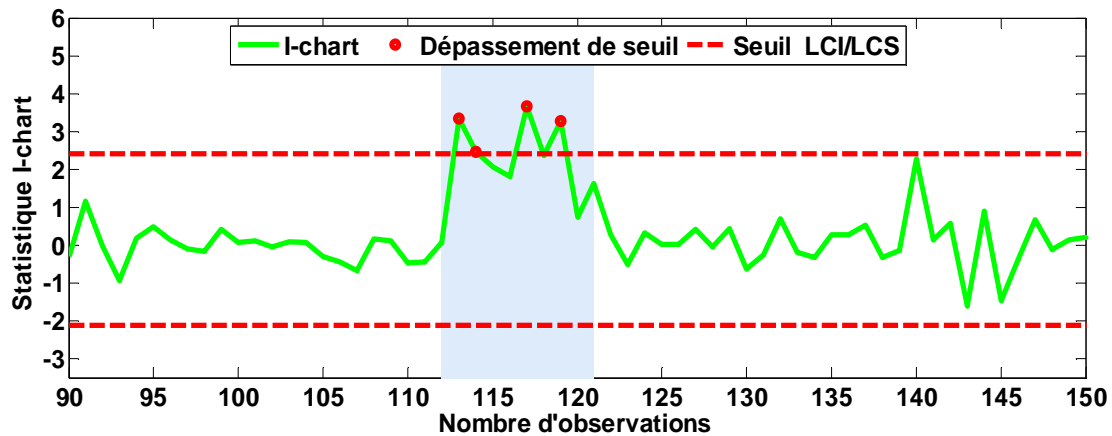


Figure VI-6 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte de Shewhart type I-chart en présence d'une situation anormale (cas  $A_1$ ).

- b. **Cas  $A_2$**  : la figure VI-7 présente les résultats de la détection suivant la stratégie de détection combinant une carte de contrôle EWMA et le modèle SARMA. Cette figure montre que la stratégie proposée est en mesure de détecter de manière satisfaisante le comportement anormal sans fausses alarmes. Le paramètre de lissage et le paramètre de contrôle choisis pour la carte EWMA sont  $\lambda = 0,25$  et  $L = 3$ , respectivement.

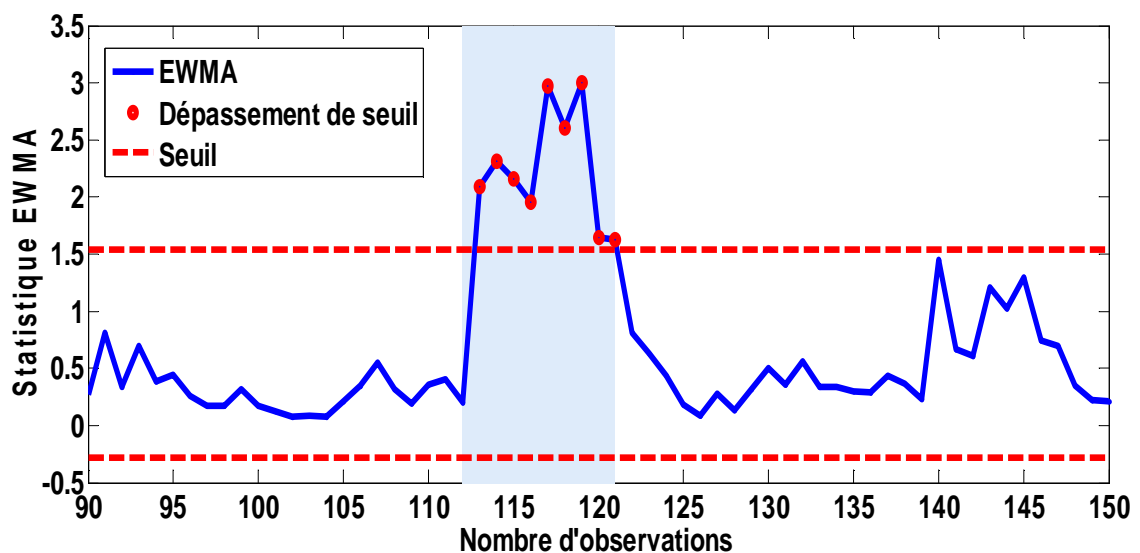


Figure VI-7 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une situation anormale (cas  $A_2$ ).

La figure VI-8 montre que la statistique de la carte CUSUM est également capable de détecter avec succès cette anomalie. Par contre, on constate, figure VI-9, que la statistique de la carte de Shewhart type I-chart ne permet pas de détecter l'anomalie. Ce résultat est dû au fait que le test de cette carte utilise les dernières informations recueillies, ce qui rend cette métrique inopérante pour la détection des changements faibles ou progressifs.

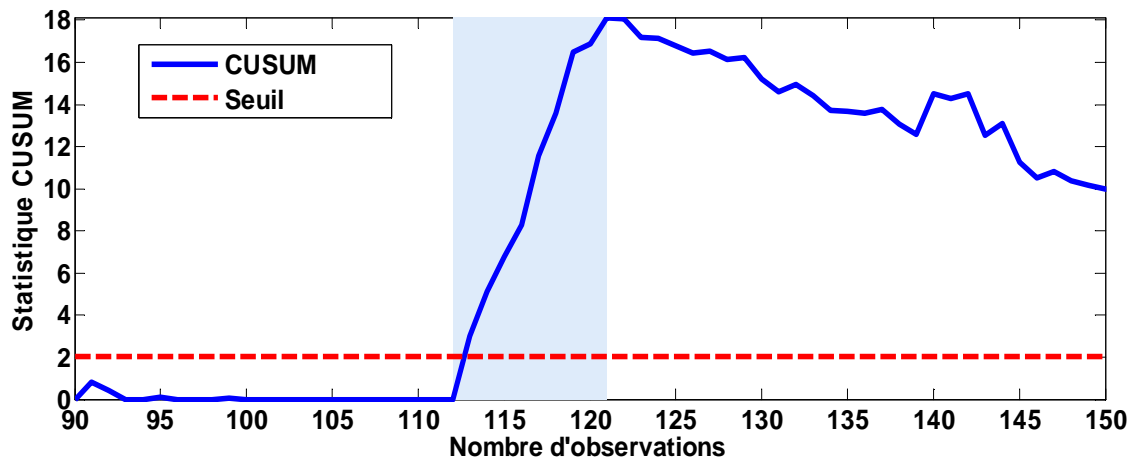


Figure VI-8 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte CUSUM en présence d'une situation anormale (cas  $A_2$ ).

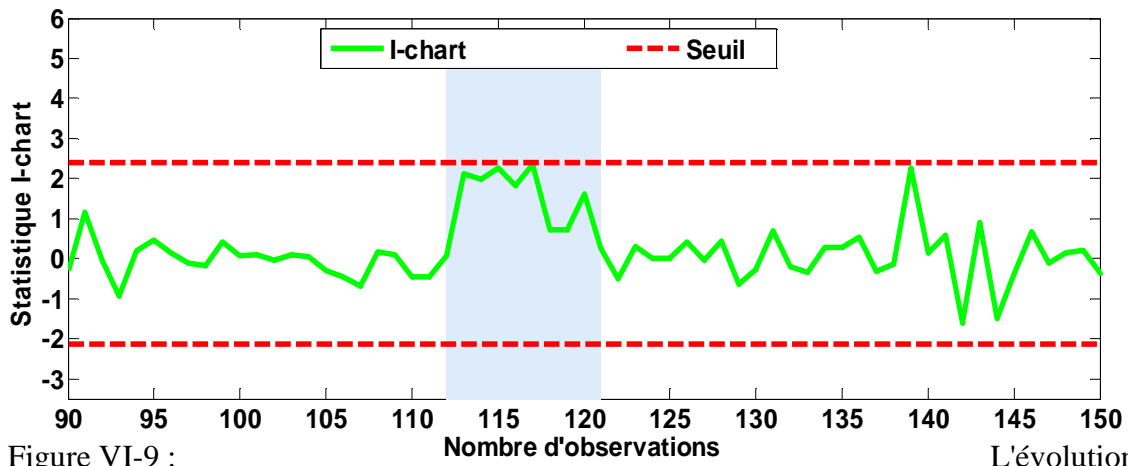


Figure VI-9 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte I-chart en présence d'une situation anormale (cas  $A_2$ )

### 3.1.2. Cas B : Anomalie progressive

Dans le cas B, nous avons augmenté le nombre d'arrivées  $y_t$  entre les instants correspondants à un nombre d'échantillons  $k_s = 85$  et  $k = 95$ , soit  $y'_t = y_t + 0,1(k - 85)$ . Les résultats de la statistique de la carte EWMA sont présentés dans la figure VI-10. Cette figure montre que l'approche proposée détecte avec succès cette situation anormale. La statistique de la carte EWMA augmente progressivement en fonction de l'augmentation du nombre d'arrivées des patients au SUP. Elle franchit les limites de contrôle lorsque la situation anormale au franchissement du seuil de passage à l'état dégradé.



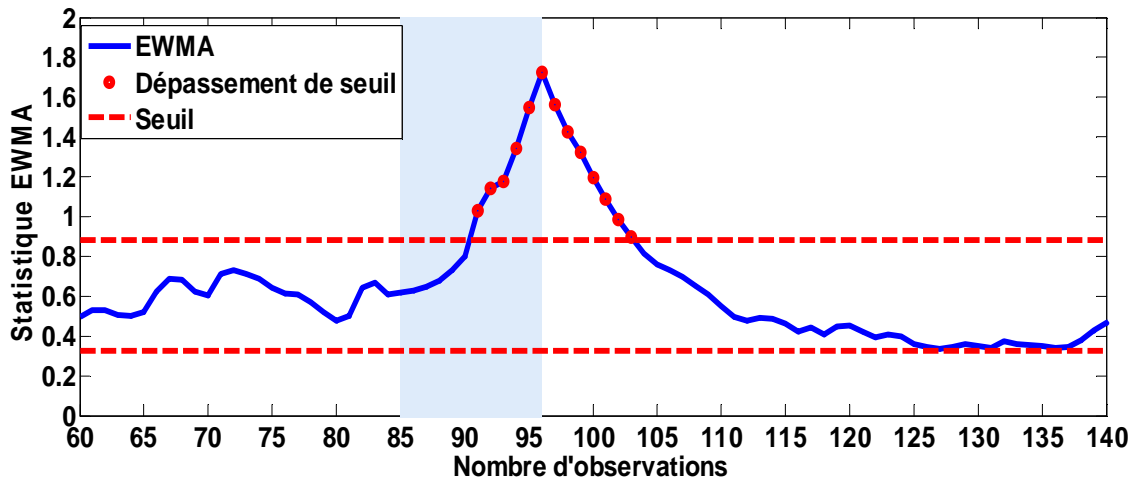


Figure VI-10 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une situation anormale progressive (cas B).

Les résultats de la statistique de la carte CUSUM représentés figure VI-11, indiquent clairement la capacité de cette carte à détecter une anomalie progressive, mais en créant plusieurs fausses alarmes.

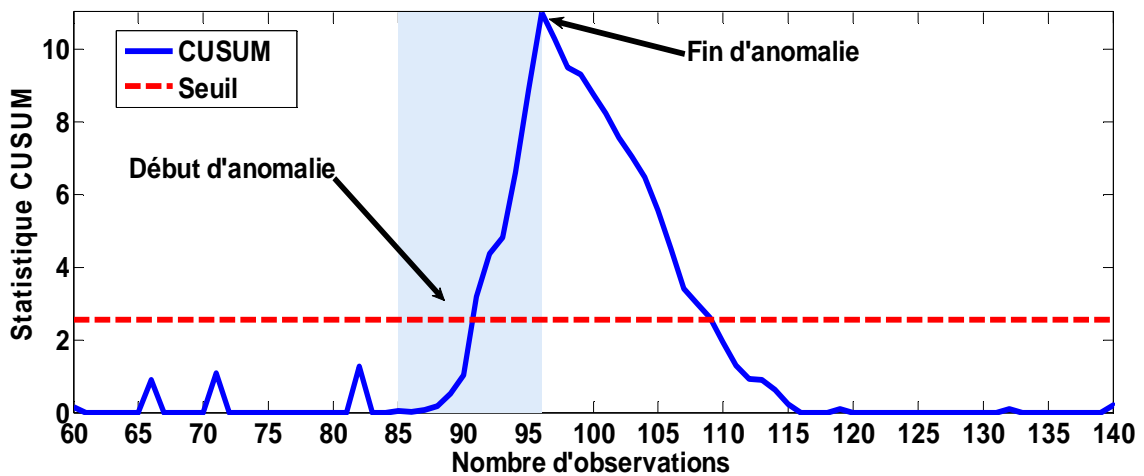


Figure VI-11 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte CUSUM en présence d'une situation anormale progressive (cas B).

Les résultats de la statistique de la carte I-chart sont représentés dans la figure VI-12. Selon cette figure, il n'y a aucune anomalie. Par conséquent, le comportement anormal simulé est resté indétectable avec cette carte.

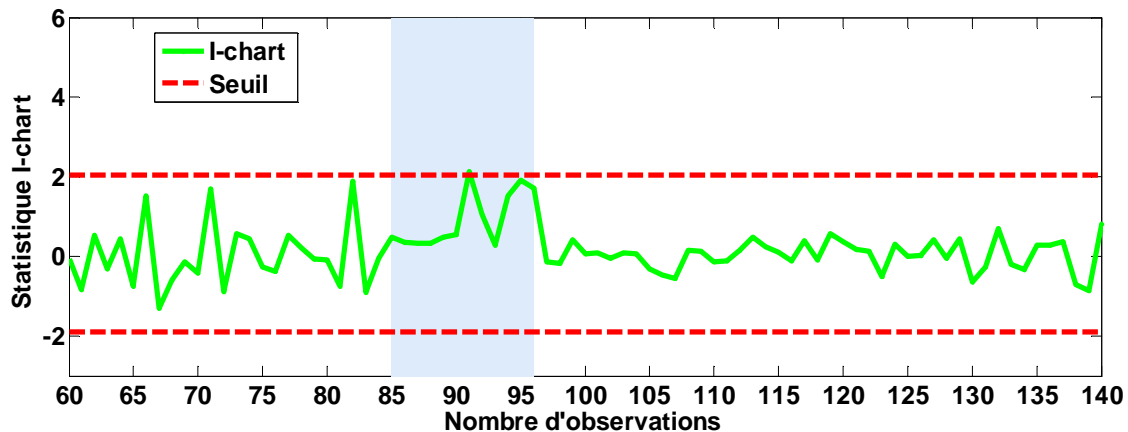


Figure VI-12 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte I-chart en présence d'une situation anormale progressive.

### 3.1.3. Discussion

La performance de la méthodologie de détection d'anomalie à base de modèle (carte EWMA et modèle SARMA) pour la détection des arrivées anormales des patients par heure au SUP est satisfaisante par rapport aux cartes de contrôle CUSUM et Shewhart. Les résultats des deux cas d'études simulés (cas A et B) montrent un avantage net pour l'approche carte EWMA et-modèle SARMA en présence d'anomalies brusques ou progressives.

La méthode de détection d'anomalies basée sur la carte de contrôle EWMA est facile à interpréter et les limites de contrôle sont faciles à obtenir ce qui convient pour la surveillance en ligne d'occurrence des situations de tension au sein du SUP. L'intégration de la méthodologie (carte EWMA et modèle SARMA) dans le module de prévision-détection du système SAGEST sera une étape vers la surveillance en temps réel du comportement SUP visant à détecter l'occurrence des situations de tension qui peuvent être générées par l'afflux des patients.

## 3.2. Détection multivariée des demandes de soins au SUP

Dans cette partie, le modèle ACP développé dans la chapitre V est couplé à la carte de contrôle multivariée MCUSUM pour la détection multivariée de l'apparition de situations de tension apparaissant au SUP. Les capacités de détection de la méthodologie MCUSUM et ACP ont été évaluées et les résultats sont comparés avec les statistiques  $T^2$  et  $Q$  (Annexe C.3).

Comme dans la détection univariée, nous avons simulé deux types d'anomalies pour évaluer la performance de la stratégie de détection proposée. Avant l'étape de prétraitement des données, nous avons injecté des anomalies additives dans les données brutes. Ensuite, nous avons simulé deux cas d'anomalies : i) les anomalies brusques (cas A) et ii) les anomalies progressives (cas B).

### 3.2.1. Cas A : Anomalie brusque

Dans ce cas, nous avons considéré une présence d'anomalies durant plusieurs jours. Pour cela, une anomalie additive est introduite à partir de l'échantillon N°141 jusqu'à l'échantillon N°147. Cette dernière est représentée par une augmentation de 25% de la variation totale de  $y_1(t)$ .

Les performances de la statistique de la carte  $Q$  sont présentées dans la figure VI-13. Les résultats montrent que la carte  $Q$  est incapable de détecter cette anomalie car sa métrique n'est pas très appropriée pour la détection de changements de faible amplitude.

Les résultats de la statistique de la carte  $T^2$  sont donnés figure VI-14 et montrent qu'aucune anomalie n'est apparue. Ainsi, ce comportement anormal est resté indétectable avec la carte  $T^2$ .

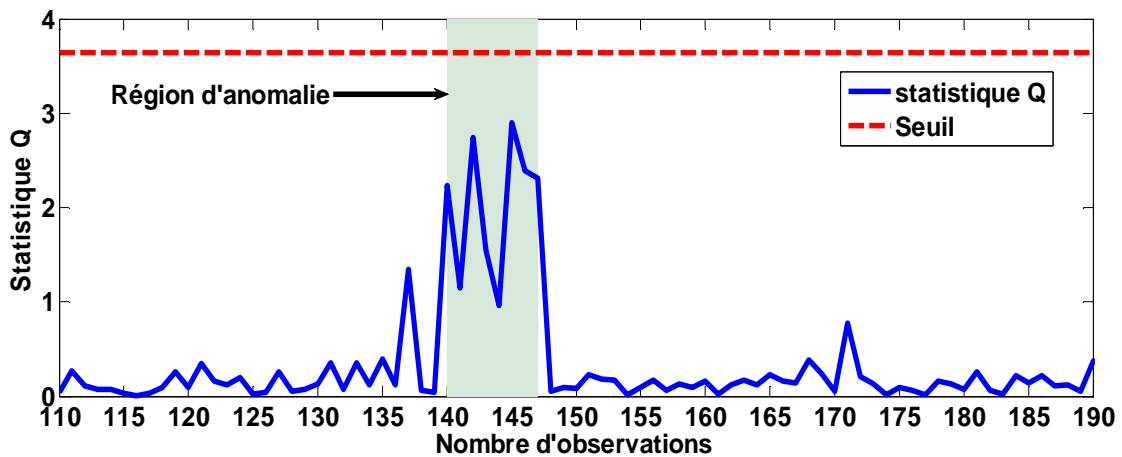
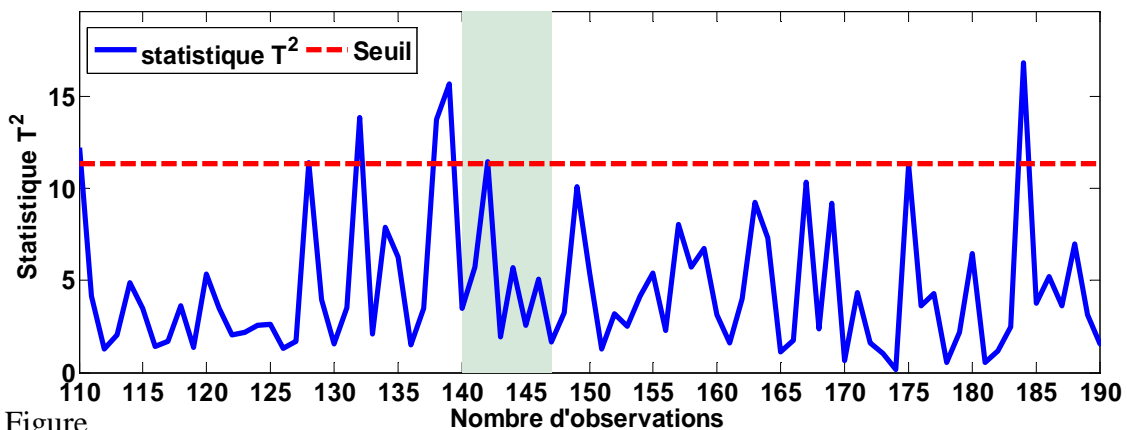


Figure VI-13 : L'évolution temporelle de la statistique  $Q$  en présence d'anomalies sur plusieurs jours (cas A).



Figure

VI-14 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte  $T^2$  en présence d'anomalies sur plusieurs jours (cas A).

La figure VI-15 présente les résultats de la statistique de la carte MCUSUM. Cette figure montre clairement la violation des limites de contrôle. On peut remarquer que l'approche de détection proposée (carte MCUSUM et ACP) est supérieure à celle de détection d'anomalie classique utilisant uniquement l'ACP.

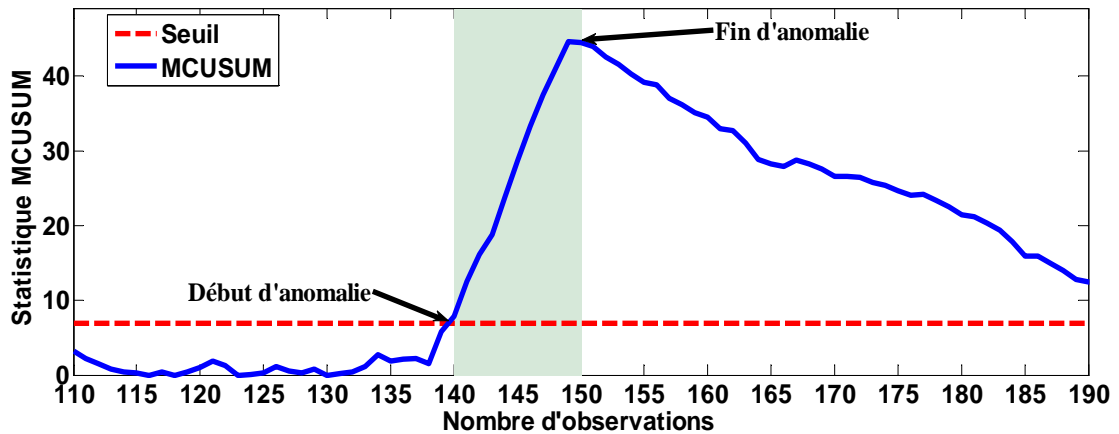


Figure VI-15 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte MCUSUM en présence d'anomalies sur plusieurs jours (cas A).

### 3.2.2. Cas B : Anomalie progressive

Dans ce cas, nous avons augmenté progressivement le nombre d'entrées  $y_t$  de façon linéaire à partir de l'échantillon N° 300 en ajoutant une pente de 10% à la valeur de  $y_t$ .

Les résultats des statistiques des cartes  $Q$  et  $T^2$  sont présentées dans les figures VI-16 et VI-17, respectivement. Ces figures montrent que l'anomalie n'a pas été détectée.

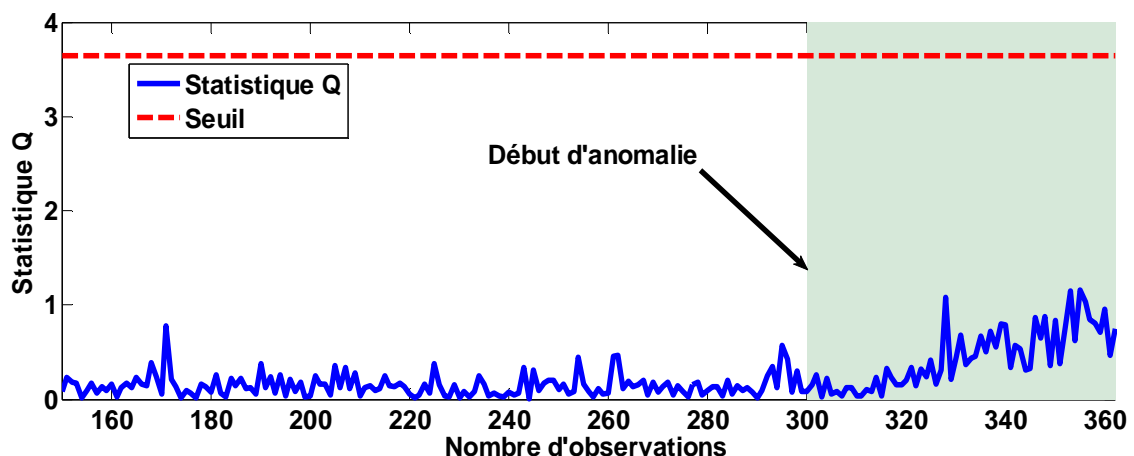


Figure VI-16 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte  $Q$  en présence d'une anomalie graduelle (cas B).

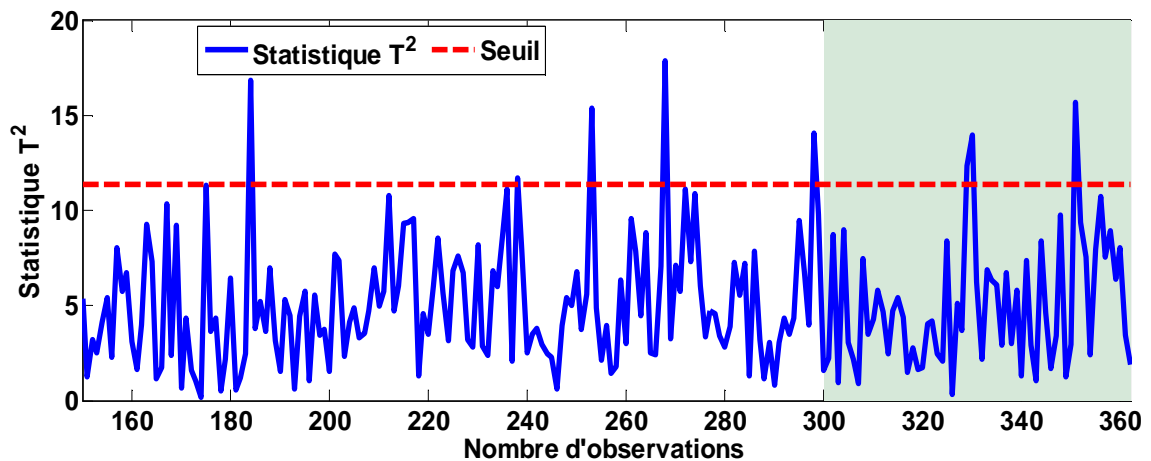


Figure VI-17 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte  $T^2$  en présence d'une anomalie graduelle (cas B).

Les résultats de la statistique de la carte MCUSUM, figure VI-18, montrent que la méthode de détection d'anomalie proposée (MCUSUM et ACP) détecte parfaitement toutes les anomalies simulées. Dans ce cas, le taux de fausse alarme, la valeur de référence et la limite de décision sont choisis comme suit :  $\alpha = 0,5\%$ ,  $k = 0,5$ , et  $h = 6,885$ .

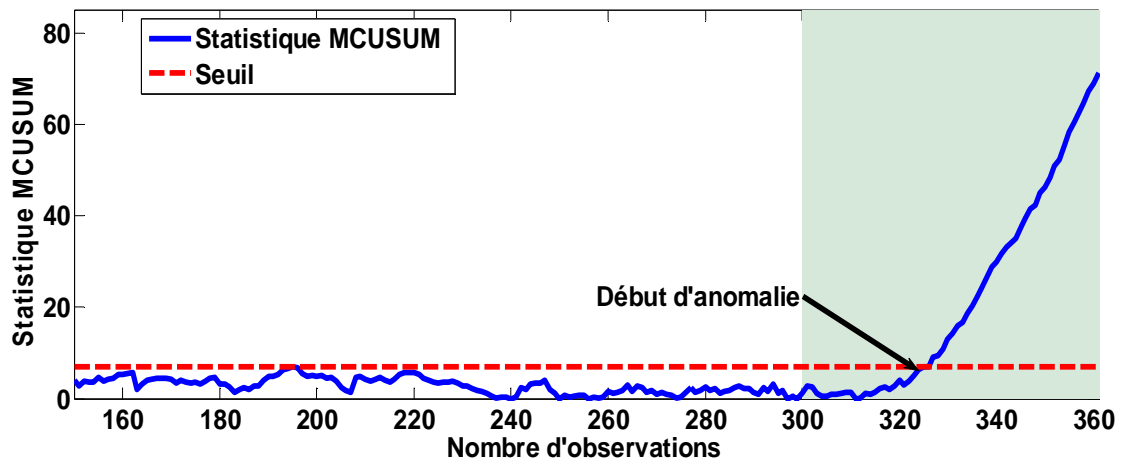


Figure VI-18 : L'évolution temporelle de la statistique de la carte MCUSUM d'une anomalie graduelle (cas B).

### 3.2.3. Discussion

La performance de la deuxième méthodologie de détection d'anomalie proposée (carte MCUSUM et ACP) est satisfaisante. Les résultats de détection ont été comparés à ceux obtenus en utilisant les cartes de contrôle multivariées classiques  $T^2$  et  $Q$ . Les résultats montrent l'efficacité de cette méthodologie dans les deux cas d'études (A et B). Les résultats indiquent qu'elle peut être utilisée pour détecter l'occurrence des situations de tension dans les services d'urgence.

Cette méthodologie de détection multivariée peut être améliorée, d'une part, en utilisant des variables décrivant mieux les indicateurs de tension et, d'autre part, en intégrant la localisation de la situation de tension dans le SU. Dans notre cas, il s'agit de localiser le sous-service du SU affecté par l'anomalie détectée responsable de la situation de tension.

#### 4. Pilotage proactif du SUP

Nous avons évalué le comportement du SUP et l'évolution des variables d'état de deux indicateurs de tension après apparition d'une perturbation (augmentation du nombre d'arrivées de patients) sans application d'une action de correction et après application d'une action de correction.

Les indicateurs de tension choisis pour les expérimentations sont :

- **PW**: temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et le premier examen médical (indicateur 1 de la table II-3)
- **T<sub>2</sub>** : temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et la consultation infirmière. (indicateur 2 de la table II-3)

##### 4.1. Cas d'une augmentation du nombre d'arrivées de patients

Selon le personnel médical du SUP, le flux de patients augmente entre 11h et 14h et entre 16h et 20h pour une journée donnée. La figure VI-19 montre le nombre réel des arrivées quotidiennes au cours de la période hivernale (de Janvier à Mars 2012).

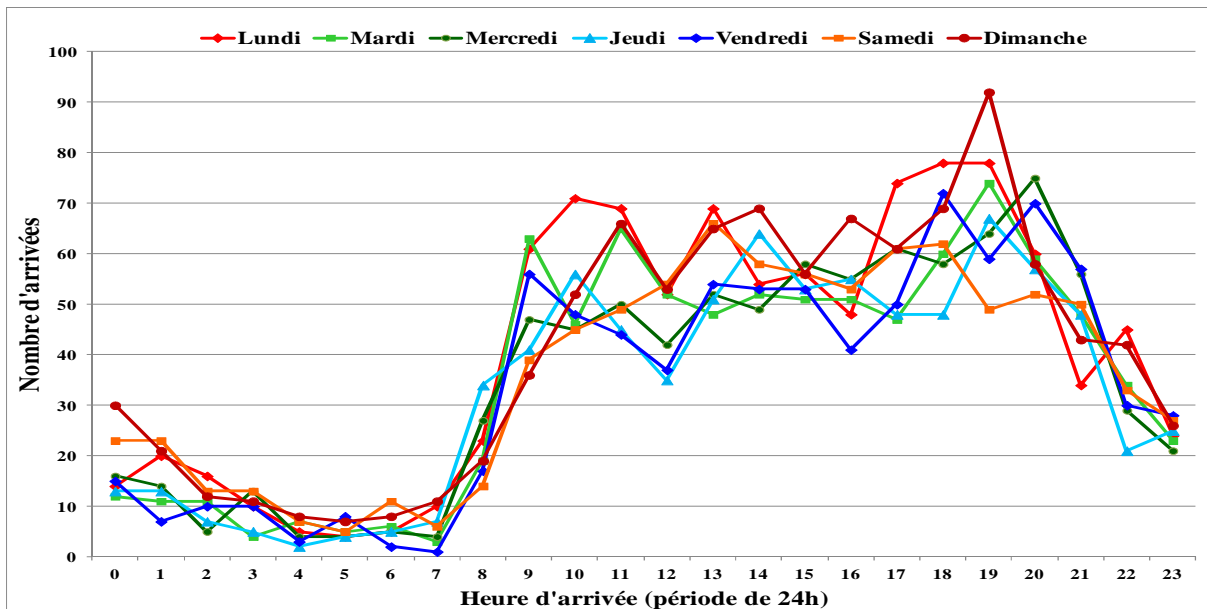


Figure VI-19 : Nombre d'arrivées de patients par heure en fonction du jour de la semaine (Janvier à Mars 2012).

On observe que le flux de patients est relativement faible avant 9 heures, mais il augmente après 10 heures et diminue après 21 heures ce qui confirme les observations du personnel du SUP.

On peut remarquer également que le dimanche, le lundi et le samedi sont les journées les plus chargées de la semaine. Le personnel du SUP étant réduit durant les weekends, nous avons choisi le dimanche pour étudier l'apparition d'éventuelles situations de tension et évaluer les effets des actions de correction. Pour tenir compte de la période de "warm-up" dans les simulations nous avons considéré une période de 3 jours : samedi, dimanche et lundi.

#### 4.2. Comportement du SUP sans actions de correction

L'évolution des deux indicateurs de tension PW et  $T_2$  est présentée figures VI-20 et VI-21 respectivement.

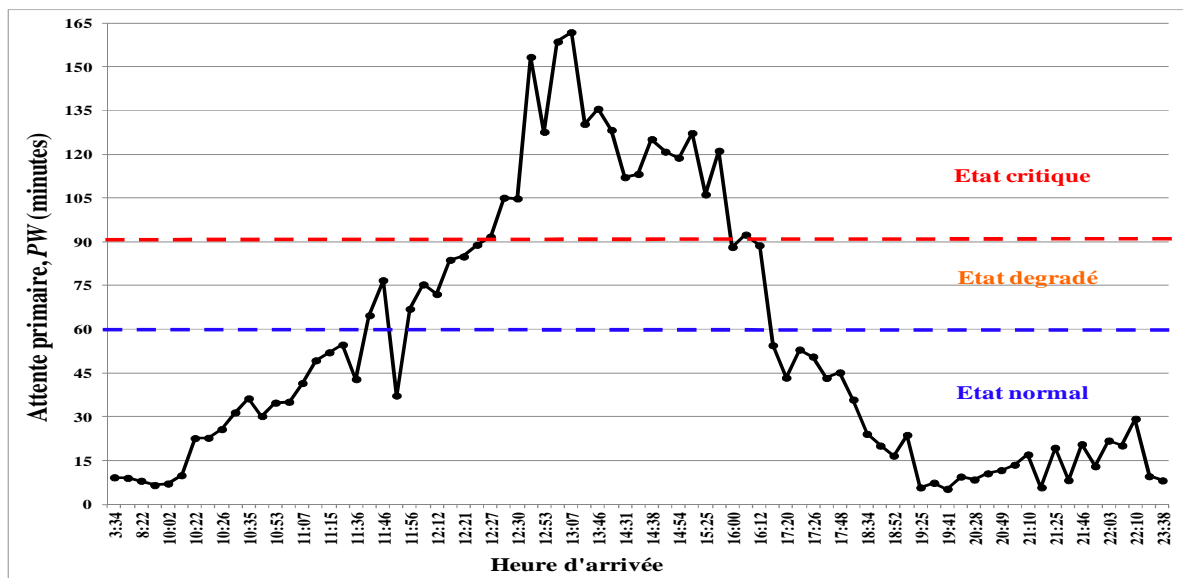


Figure VI-20 : Evolution de l'indicateur PW.

Nous avons indiqué précédemment que le nombre d'arrivées au SUP augmente considérablement entre 11h et 13h. Cette augmentation produit un effet différé sur le temps d'attente sur la consultation médicale (PW) et presque immédiat sur le temps d'attente des patients pour la consultation infirmière ( $T_2$ ).

On constate également que les seuils  $V_{Mo}$  (passage à l'état dégradé) et  $V_{Cr}$  (passage à l'état critique) ont été dépassés durant les périodes [12 h - 17 h] et [11 h - 14 h] pour les deux indicateurs PW et  $T_2$  respectivement. Par conséquent, pour réduire ces dépassements, nous avons appliqué deux types d'actions de correction : ajout de ressources humaines et transformation d'une chambre UHCD en box de consultation.

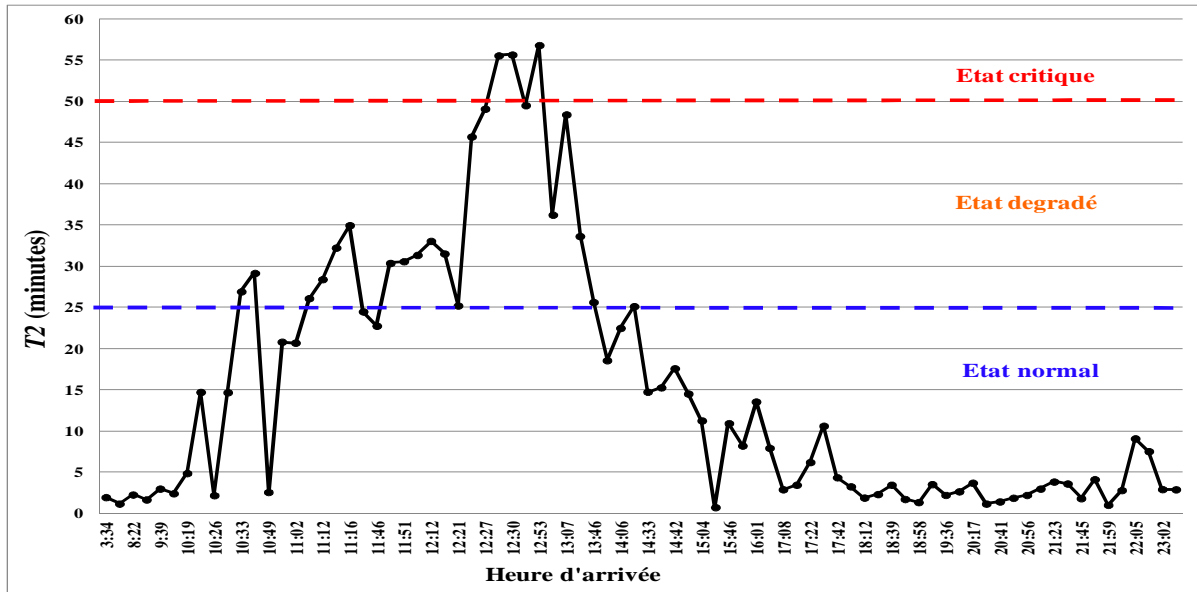


Figure VI-21 : Evolution de l'indicateur  $T_2$ .

#### 4.3. Comportement du SUP avec actions de correction

a) **Actions sur les ressources humaines - Alternative A** : dans cette alternative, seules les ressources humaines sont modifiées. Nous avons considéré trois types de scénarios :

- **Scénarios type  $A_1$**  : l'objectif est de trouver l'intervalle de temps optimal qui permet de réduire PW à un niveau acceptable ( $PW < 60$  mn) tout en ajoutant un nombre minimum de médecins. Nous avons testé l'effet de l'ajout d'un et/ou de plusieurs médecins avant l'apparition de la situation de tension et/ou dans l'intervalle de temps [12 h - 17 h] durant lequel les seuils de PW sont dépassés. Les résultats obtenus montrent que l'ajout d'un médecin entre 11h et 14h constitue le meilleur scénario.
- **Scénarios type  $A_2$**  : l'objectif est de trouver l'intervalle de temps optimal qui permet de réduire  $T_2$  à un niveau acceptable ( $T_2 < 25$  mn) tout en ajoutant un nombre minimum d'infirmières. Pour cela nous avons analysé l'impact de l'ajout d'une et/ou plusieurs infirmière(s) dans l'intervalle de temps [11h -14 h] durant lequel les seuils pour  $T_2$  sont dépassés ( $T_2 > 25$  mn). Nous avons établi que le meilleur scénario est l'ajout d'une infirmière entre 11 heures et 13 heures].
- **Scénarios type  $A_3$**  : l'objectif est de trouver l'intervalle de temps optimal qui permet la réduction simultanée de PW et  $T_2$  à un niveau acceptable ( $T_2 < 25$  mn,  $PW < 60$  mn) tout en agissant simultanément sur les deux types de ressources (infirmières et médecins). Le meilleur scénario obtenu est l'ajout d'une infirmière entre 11 heures et 13 heures et d'un médecin entre 11 heures et 14 heures.



La table VI-6 présente les meilleurs scénarios de l'alternative A pour l'indicateur PW. La figure VI-22 montre l'évolution de l'indicateur PW pour chaque meilleur scénario de l'alternative A.

Table VI-6 : Meilleurs scénarios dans le cas de l'alternative A.

Alternative A	Ressources humaines supplémentaires	
Scénarios	Infirmière	Médecin
Scénario A <sub>1</sub>	-	1 médecin [11h– 14h.]
Scénario A <sub>2</sub>	1 infirmière [11h –13h]	-
Scénario A <sub>3</sub>	1 infirmière [11h –13h]	1 médecin [11h– 14h.]

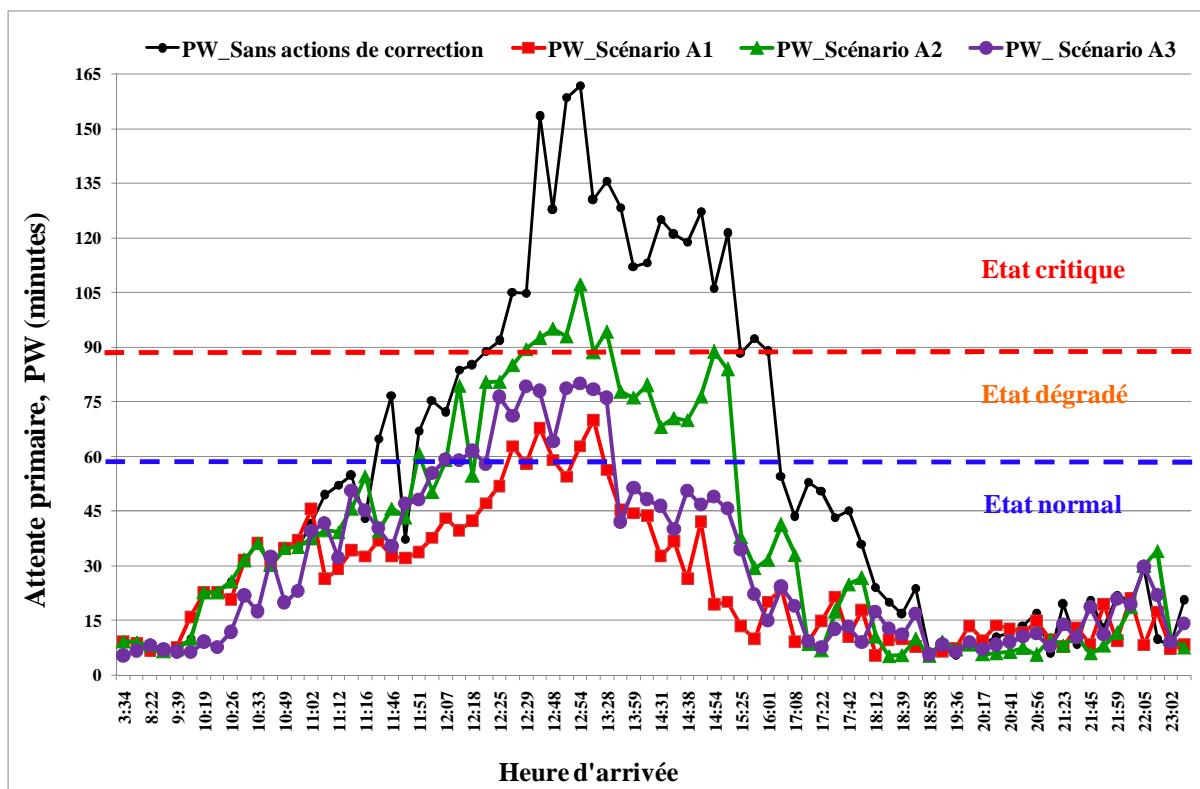


Figure VI-22 : Evolution de l'indicateur PW dans le cas de l'alternative A.

On peut observer que les scénarios A<sub>1</sub> et A<sub>3</sub> contribuent sensiblement à la réduction du temps d'attente primaire (PW) des patients au SUP. PW diminue de 96 minutes (valeur de PW sans action corrective) à 39 minutes et à 51 minutes dans le cas des scénarios A<sub>1</sub> et A<sub>3</sub> respectivement. On note que le scénario A<sub>1</sub> est la meilleure alternative car PW est réduit à un niveau acceptable (PW < 60 minutes) et il ne nécessite qu'une seule ressource complémentaire (1 médecin durant la période [11 h - 14 h]). L'ajout d'une infirmière (scénario A<sub>2</sub>) a une influence positive sur PW, mais insuffisante pour revenir à l'état normal.

Le scénario A<sub>3</sub> n'a pas donné de meilleurs résultats que le scénario A<sub>1</sub>. Cela est sans doute dû au manque de box de consultation. Le SUP a la possibilité de transformer une ou plusieurs chambre(s) de l'UHCD en box de consultation. Cette action de correction est analysée dans l'alternative B.

**b) Actions sur les ressources humaines et matérielles - Alternative B :** dans cette seconde alternative nous avons agi sur les deux ressources : transformation d'une ou plusieurs chambres UHCD en box de consultation et l'ajout de ressources humaines (personnel infirmier et médical). Les scénarios proposés dans cette alternative sont les suivants (table VI-8) :

- **Scénario B<sub>1</sub>** : une chambre de l'UHCD est transformée en box de consultation.
- **Scénario B<sub>2</sub>** : une chambre de l'UHCD est transformée en box de consultation et une infirmière est ajoutée dans l'intervalle du temps où le seuil de T<sub>2</sub> est dépassé.
- **Scénario B<sub>3</sub>** : une chambre de l'UHCD est transformée en box de consultation et 1 médecin est ajouté dans l'intervalle de temps où le seuil de PW est dépassé.
- **Scénario B<sub>4</sub>** : une chambre de l'UHCD est transformée en box de consultation, 1 infirmière et 1 médecin sont ajoutés dans l'intervalle de temps où le seuil de PW est dépassé.

Table VI-7 : Actions de correction dans le cas de l'alternative B

Alternative B	Ressources humaines		Ressources matérielles
	Infirmière	Médecin	Box de consultation
Scénario B1	-	-	1 box [11h-17h]
Scénario B2	1 infirmière [11h-14h]	-	1 box [11h-17h]
Scénario B3	-	1 médecin [11h - 14h]	1 box [11h - 17h]
Scénario B4	1 infirmière [11h- 13h]	1 médecin [10h - 15h]	1 box [11h -17h]

La figure VI-23 résume les résultats des actions de correction pour chaque scénario de l'alternative B pour l'indicateur PW.

On remarque que durant la période de tension entre 11h et 17h, le temps moyen d'attente primaire (PW) a diminué de 97 minutes (valeur de PW sans action de correction) à 88 minutes, 79 minutes, 19 minutes, et 14 minutes dans le cas des scénarios B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> et B<sub>4</sub> respectivement.

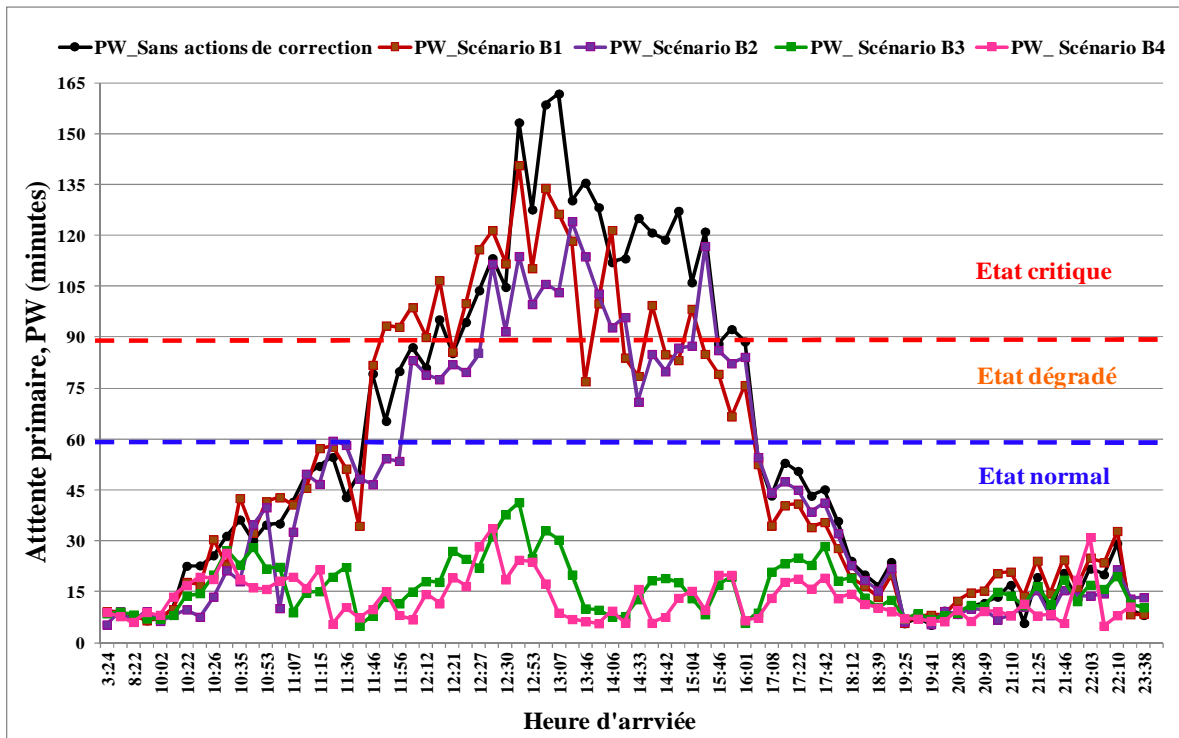


Figure VI-23 : Evolution de l'indicateur PW dans le cas de l'alternative B.

Les scénarios B<sub>3</sub> et B<sub>4</sub> représentent les meilleures alternatives car ils permettent de réduire le PW à un niveau acceptable (PW < 60 minutes). La figure VI-24, montre que le scénario B<sub>3</sub> est économiquement plus intéressant car il ne nécessite qu'un médecin supplémentaire entre [11h - 14 h] et la réaffectation d'une seule chambre UHCD en box de consultation durant la période [11h - 17h].

#### 4.4. Performances du SUP en fonction des actions de correction

Nous avons choisi comme critère de performance : le temps de récupération  $T_R$  et la résilience  $R$ . L'indicateur de performance retenu est PW.

##### 4.4.1. Expression de la performance

La performance s'exprime alors par :

$$Q(t) = f(P, A, C_p, t) \text{ (voir équation II-1)}$$

$P$  = augmentation du nombre d'entrées,  $A = [A_1, B_3]$  :  $A_1$  : ajout d'un médecin,  $B_3$  : ajout d'un médecin et d'un box de consultation, et  $C_p = [T_R, R]$ .

#### 4.4.2. Temps de récupération $T_R$

Les temps de récupération pour les deux meilleurs scénarios  $A_1$  (ajout d'un médecin, période [11h– 14h.] et  $B_3$  (ajout d'un médecin, période [11h - 14h] et d'un box durant la période [11h -17h] sont présentés figure VI-24.

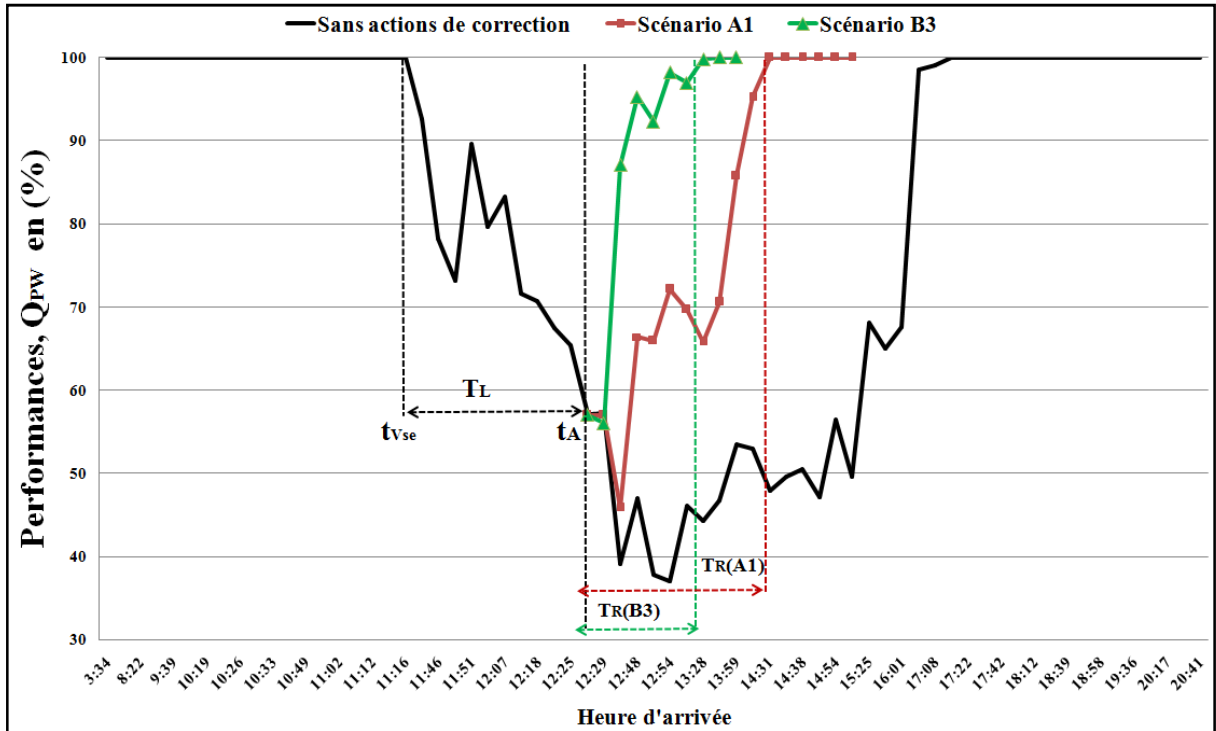


Figure VI-24 : Evolution de la performance  $Q_{PW}$  (%) pour les deux meilleurs scénarios  $A_1$  et  $B_3$ .

Sans action de correction, après l'occurrence de la perturbation, l'état du SUP est passé de l'état normal à l'état dégradé à  $t_{Vse} = 11h16$ . Le niveau de performance du SUP, noté  $Q_{PW}$ , baisse progressivement jusqu'à la valeur  $Q_{PW} = 37.1$  %. Le SUP regagne son état de performance normal à la date  $t_F = 17h20$ .

Pour analyser l'impact des actions de correction sur le temps de récupération, nous avons appliqué les actions de correction pour les scénarios  $A_1$  et  $B_3$  à  $t_A = 12h30$ , avec un temps de lancement des actions de correction,  $T_L = 1h14$  (nous supposons que les temps de détection  $T_D$  et le temps de choix d'une action après détection  $T_C$  sont nuls). Dans le cas du scénario  $A_2$ , le temps de récupération,  $T_R(A_1) = 2h01$ ; le temps de recouvrement,  $T_{REC}(A_1) = 3h15$ . Dans le cas du scénario  $B_3$ ,  $T_R(B_3) = 1h16$ ; le temps de recouvrement  $T_{REC}(B_3) = 2h01$  minutes.

#### 4.4.3. Résilience

La résilience est calculée suivant l'expression II-2 :

$$R_{TR} = \int_{t_A}^{t_F} [100 - Q_{PW}(t)] dt$$

Pour le calcul de la résilience, nous avons modélisé l'évolution de  $Q(t)$  par un modèle parabolique dans le cas sans action de correction et par un modèle linéaire pour les scénarios ( $A_1$  et  $B_3$ ).

- **Sans actions de correction** :  $T_R = 290$  min,  $t_A = 750$  mn ;  $t_F = 1040$  mn;

$$R_{T_R}(Q_{PW}) = \int_{t_A}^{t_F} [100 - Q_{PW}(t)] dt = 10\,682.$$

- **Scénario  $A_1$**  :  $T_R = 121$  min,  $t_A = 750$  mn ;  $t_F = 871$  mn;

$$R_{T_R}(A_1) = \int_{t_A}^{t_F} [100 - Q_{PW}(t)] dt = 1525.$$

- **Scénario  $B_3$**  :  $T_R = 76$  min,  $t_A = 750$  mn ;  $t_F = 826$  mn;

$$R_{T_R}(B_3) = \int_{t_A}^{t_F} [100 - Q_{PW}(t)] dt = 1035.$$

#### 4.5. Modèle CAST

Le modèle CAST correspondant est présenté table VI-8.

Table VI-8 : Modèle CAST pour les scénarios  $A_1$  et  $B_3$

Contexte	Objectif	Variables d'état	Action correctives possibles	Valeurs seuils	Etat du SU	Actions Correctives appliquées	Efficacité (E)
							$T_R$
Période épidémique et weekend	Minimiser l'attente primaire PW	Temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et l'examen médical	Actions de l'alternative A ( $A_1, A_2, A_3$ )	$PW \geq 60$	Dégradé	Action du scénario $A_1$	2h01 mn
			Actions de l'alternative B ( $B_1, B_2, B_3, B_4$ )			Actions du scénario $B_3$	1h16 mn

### 5. Pilotage réactif du SUP

L'objectif est de définir les actions de correction pour le pilotage réactif du SUP. Nous avons procédé selon la démarche suivante :

- Observation de l'évolution du (ou les) indicateur(s) de tension,
- Si à un instant donné, noté  $t_0$ , l'indicateur dépasse la valeur seuil  $V_{M_0}$  (passage à l'état dégradé), nous continuons à observer l'indicateur pendant une durée  $\Delta t$ . Trois cas peuvent se présenter :
  - l'indicateur continue à évoluer et dépasse ( $V_{M_0} + \Delta V_{M_0}$ ), alors une action de correction est lancée,

- à l'instant ( $t_0 + \Delta t$ ) l'indicateur est toujours supérieur à  $V_{M_0}$ , alors une action de correction est lancée,
- Si à l'instant ( $t_0 + \Delta t$ ) l'indicateur est inférieur à  $V_{M_0}$ , alors pas de lancement de l'action de correction.
- Si à un instant donné, noté  $t_0$ , l'indicateur dépasse la valeur seuil  $V_{Cr}$  (passage à l'état critique) alors une action de correction est lancée.

Pour respecter les actions possibles propres au SUP présentées dans la partie 4.5.2 du chapitre V, nous proposons pour les ressources humaines une durée d'application des actions de correction (ajout d'une IDE ou d'un MU) égale à deux heures. L'action sur les ressources matérielles consiste en l'ajout d'un box.

Nous avons procédé de la même manière que précédemment et nous avons donc choisi un dimanche de la période hivernale et réalisé des simulations sur une période de trois jours : samedi, dimanche et lundi. Les statistiques présentées sont donc celles correspondant au dimanche.

### 5.1. Observation des indicateurs de tension

Les différents indicateurs de performances (PW, T2, le nombre de patients dans le SU ( $N_p$ ), nombre de patients par médecin (PM), le temps de séjour réel/temps de séjour théorique ( $Q_s$ ) sont regroupés dans un tableau de bord (figure VI-25) réalisé en utilisant l'outil «Arena Visual Designer ».

Pour les expérimentations,  $\Delta V_{M_0}$  et  $\Delta t$  ont été fixés à 10% et 15 minutes respectivement. Pour réduire ces dépassements, nous avons défini différents types d'actions de correction décrites dans le paragraphe suivant.

On constate que les indicateurs ( $T_2$ , PW,  $N_p$ , PM et  $Q_s$ ) ont dépassé les seuils  $V_{M_0}$  (passage à l'état dégradé) vers la deuxième journée (en un temps inférieur à 50 h). Par exemple le PW a dépassé les 60 minutes après 20h00 le deuxième jour. La figure VI-26 montre plus précisément l'évolution de l'indicateur PW.

### 5.2. Définition des actions de correction

Les actions de correction ont été définies selon deux classes :

- a) **Actions sur le flux patients admis dans le SUP** : 4 règles de priorité simples ont été définies afin de gérer le flux de patients dans le SUP :
  - 1) **Règle 0** : par ordre croissant d'arrivée des patients. C'est la règle classique du FIFO (First In First Out).
  - 2) **Règle 1** : par ordre croissant du type de patient. Les patients les plus urgents : type 1 (état critique) puis type 2 et 3) sont prioritaires.

- 3) **Règle 2** : par ordre décroissant du temps déjà passé dans le système. On relève les temps de séjour patient en temps réel. Les patients ayant le plus grand temps de séjour sont prioritaires.
- 4) **Règle 3** : dans l'ordre croissant de leur avancement dans le processus de prise en charge. Les patients en début de leur processus de prise en charge sont prioritaires.

**b) Actions sur les ressources :**

- 1) Ressources humaines : ajouter une infirmière et/ou un médecin pendant une durée donnée (ici deux heures)
- 2) Ressources matérielles : transformer une chambre UHCD en box de consultations (figure V-1).

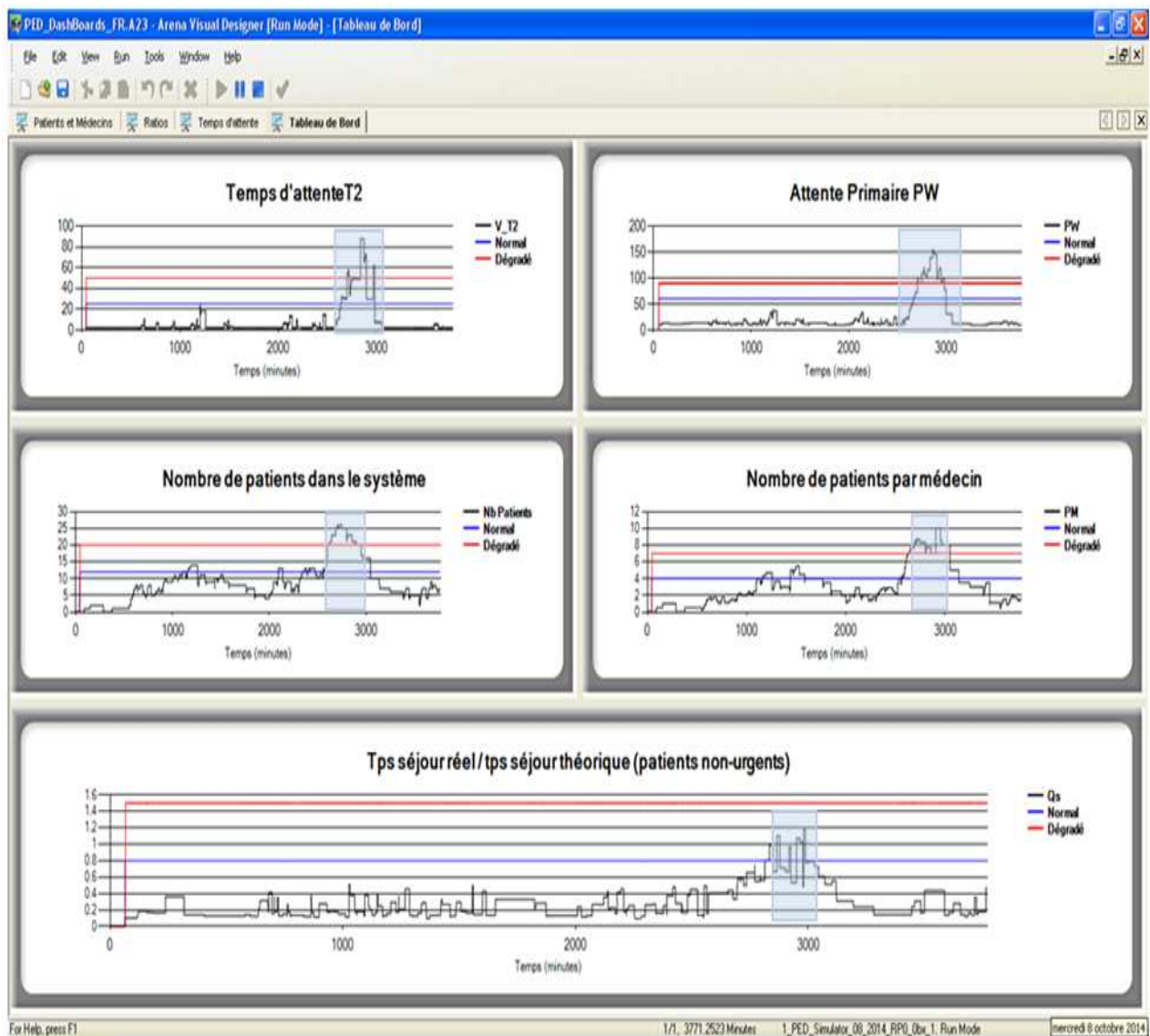


Figure VI-25 : Tableau de bord pour l'observation des indicateurs de tension.

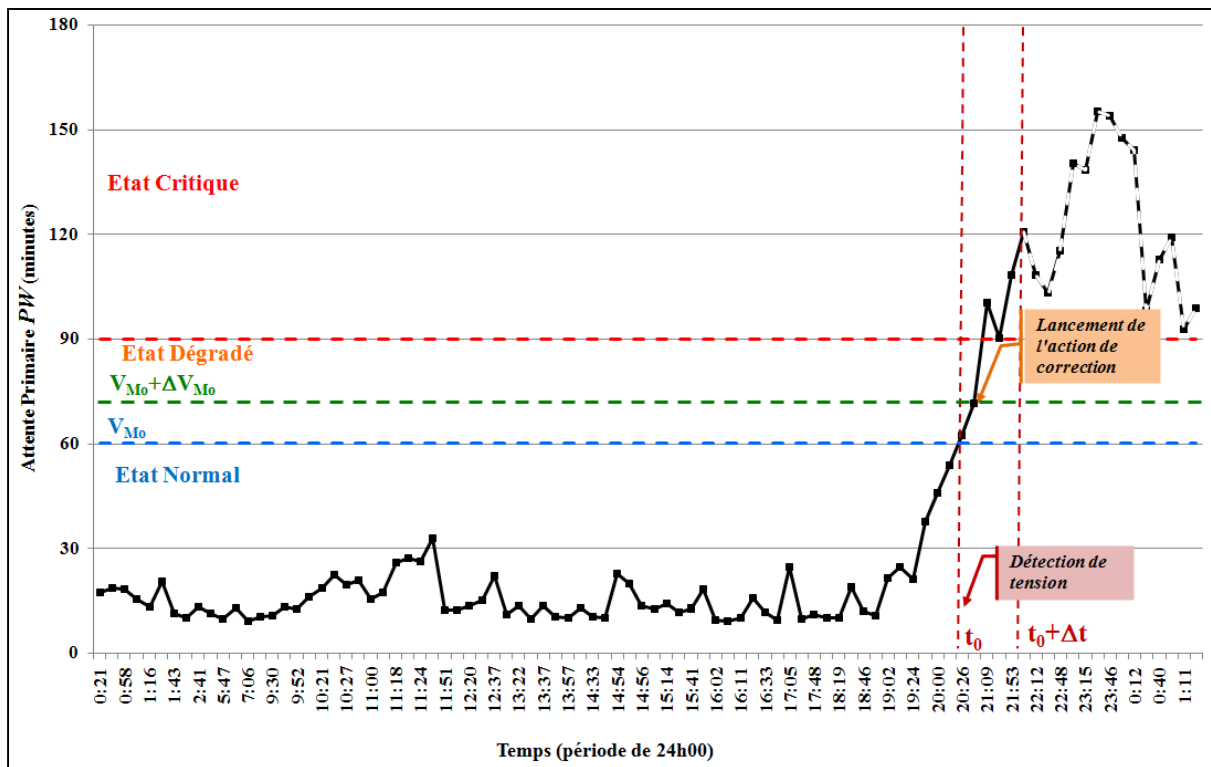


Figure VI-26 : Evolution de l'indicateur PW.

Trois alternatives ont été définies selon le temps de lancement de l'action ( $T_L$ ). La table VI-9 résume les différentes caractéristiques des actions de correction.

Table VI-9 : Définition des scénarios et alternatives composant les actions de corrections

Scénarios	Ressources humaines		Ressources matérielles	Règles de priorité	Temps de lancement $T_L$
	Infirmière	Médecin	Box de consultation		
Scénario i	0 ou 1	0 ou 1	0 ou 1	Règle 0 ou règle 1 ou règle 2 ou règle 3	$T_L = 0$ mn (Alternative A) $T_L = 60$ mn (Alternative B) $T_L = 90$ mn (Alternative C)

31 scénarios ont été définis et évalués pour chaque alternative A, B, et C (voir annexe E). Les résultats des différents scénarios ont été comparés principalement par rapport aux deux indicateurs PW et  $N_p$  (voir la table V-11).



### 5.3. Résultats

Les résultats ci-dessous sont donnés pour l'indicateur PW et établis selon quatre scénarios à titre d'illustration.

#### a) Actions sur les ressources humaines : impact de l'ajout d'une infirmière

Nous présentons les résultats des scénarios suivants (figure VI-27) :

- $A_0$  : scénario initial sans actions de correction,
- $A_1$  : ajout seulement d'une infirmière avec  $T_L = 0$  minute, le reste des paramètres sont égaux à 0.
- $B_1$  : ajout seulement d'une infirmière avec  $T_L = 60$  minutes, le reste des paramètres sont égaux à 0.
- $C_1$  : ajout seulement d'une infirmière avec  $T_L = 90$  minutes, le reste des paramètres sont égaux à 0.

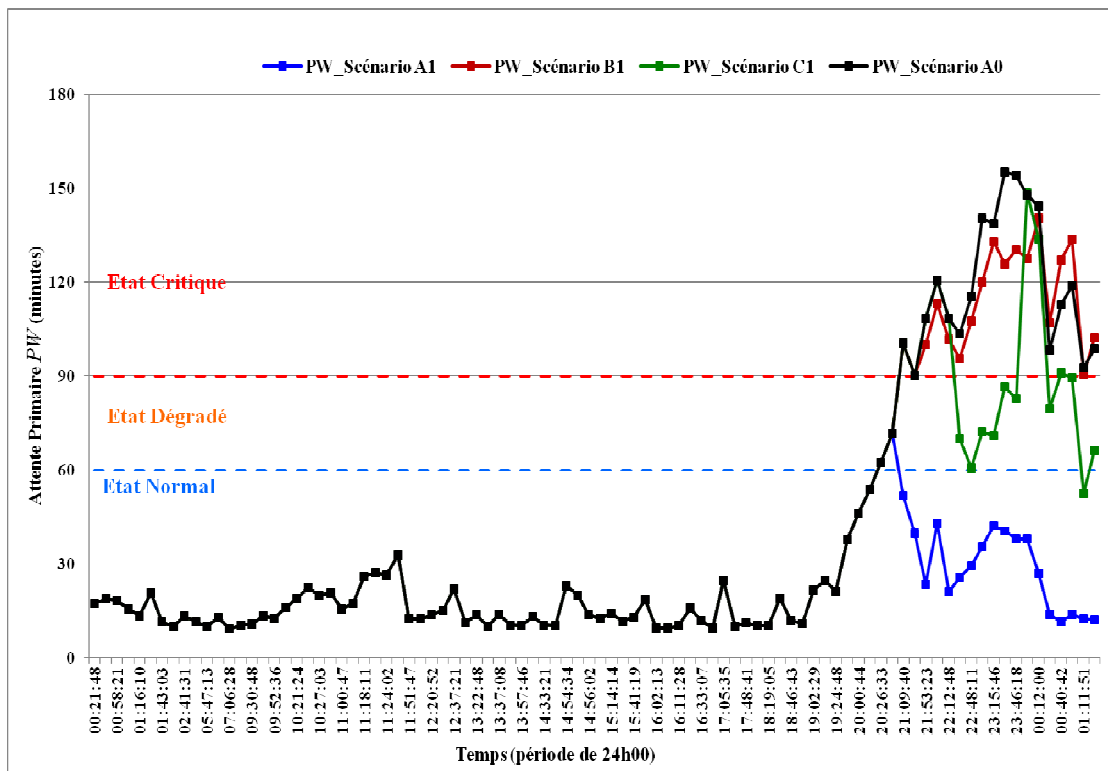


Figure VI-27 : Impact de l'ajout d'une infirmière.

On peut observer que seul le scénario  $A_1$  (ajout d'une IDE et  $T_L = 0$ ) contribue à la réduction du temps d'attente primaire (PW). Ceci s'explique par l'influence de la consultation infirmière sur la valeur de l'attente  $T_2$  incluse dans PW. Les scénarios  $B_1$  et  $C_1$  n'ont pas d'impact positif sur la valeur de PW.

On peut en conclure que l'ajout d'IDE ne pourrait être intéressant que si une IDE est disponible immédiatement à tout moment de la journée, ce qui est difficile à mettre en place dans un cas réel.

**b) Actions sur les ressources humaines : impact de l'ajout d'un médecin**

Nous présentons les résultats des scénarios suivants (figure VI-28) :

- A0 : scénario initial sans actions de correction,
- A2 : ajout seulement d'un médecin avec  $T_L = 0$  minute, le reste des paramètres sont égaux à 0.
- B<sub>2</sub> : ajout seulement d'un médecin avec  $T_L = 60$  minutes, le reste des paramètres sont égaux à 0.
- C<sub>2</sub> : ajout seulement d'un médecin avec  $T_L = 90$  minutes, le reste des paramètres sont égaux à 0.

On peut observer que l'ajout d'un médecin contribue à la réduction du temps d'attente primaire (PW) des patients au SUP dans tous les cas. Une durée de lancement  $T_L = 90$  minutes donne les meilleurs résultats. On peut en conclure que l'ajout d'un médecin est toujours intéressant quel que soit le temps de lancement.

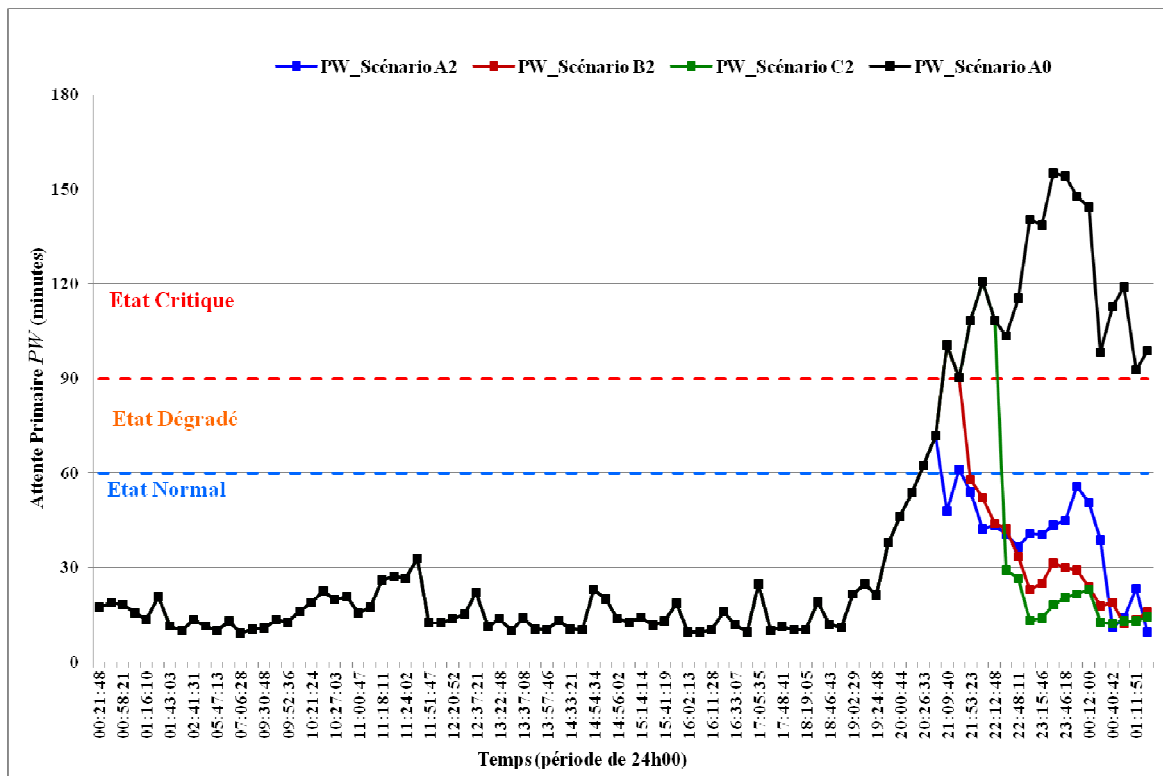


Figure VI-28 : Impact de l'ajout d'un médecin.

**c) Actions sur les ressources matérielles : impact de l'ajout d'un box**

Nous donnons les résultats des scénarios suivants (figure VI-29) :

- $A_0$  : scénario initial sans actions de correction,
- $A_3$  : transformer une chambre UHCD en un box de consultation avec  $T_L = 0$  minute, le reste des paramètres sont égaux à 0.
- $B_3$  : transformer une chambre UHCD en un box de consultation avec  $T_L = 60$  minutes, le reste des paramètres sont égaux à 0.
- $C_3$  : transformer une chambre UHCD en un box de consultation avec  $T_L = 90$  minutes, le reste des paramètres sont égaux à 0.

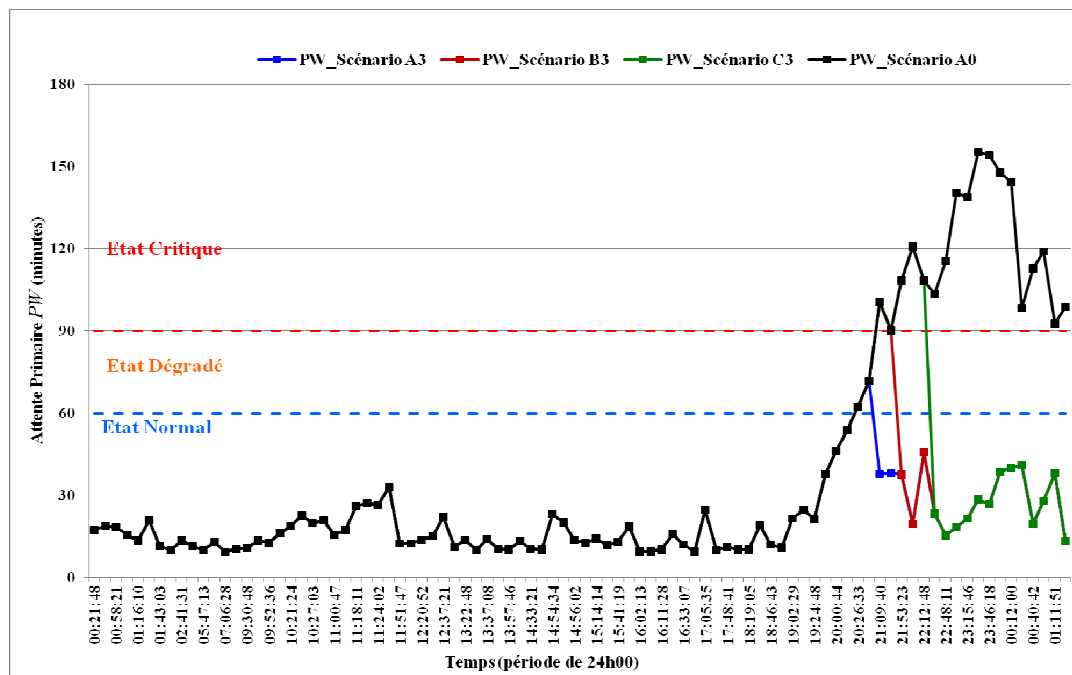


Figure VI-29 : Impact de l'ajout d'un box.

On constate que l'ajout d'un box de consultation par la transformation d'une chambre UHCD contribue dans tous les cas à la réduction du temps d'attente primaire (PW) des patients au SUP. Le lancement immédiat de cette action ( $T_L = 0$ ) donne les meilleurs résultats et évite au système d'atteindre l'état critique pour cet indicateur (PW = 90 minutes). On peut en conclure que l'ajout d'un box supplémentaire, action déjà utilisée dans le SUP est toujours une solution intéressante.

**d) Actions sur le flux patients à l'intérieur du SUP : impact de l'application d'une règle de priorité**

Cette action est nouvelle par rapport aux alternatives testées dans le pilotage proactif. On a souhaité observer le comportement du SUP lorsque l'on applique des règles autres qu'une simple règle de type FIFO (§5.2).

Pour cette série nous avons utilisé les scénarios de l'alternative A ( $T_L = 0$ ) suivants :

- $A_0$  : application de la règle 0, scénario initial sans actions de correction,
- $A_8$  : application de la règle 1 (ordre croissant du niveau d'urgence du patient) avec  $T_L = 0$  minute, le reste des paramètres sont égaux à 0.
- $A_{16}$  : application de la règle 2 (ordre décroissant du temps déjà passé dans le système) avec  $T_L = 0$  minute, le reste des paramètres sont égaux à 0.
- $A_{24}$  : application de la règle 3 (l'ordre croissant de leur avancement dans le processus de prise en charge). avec  $T_L = 0$  minute, le reste des paramètres sont égaux à 0.
- Les résultats des scénarios suivants sont présentés (figure VI-30).

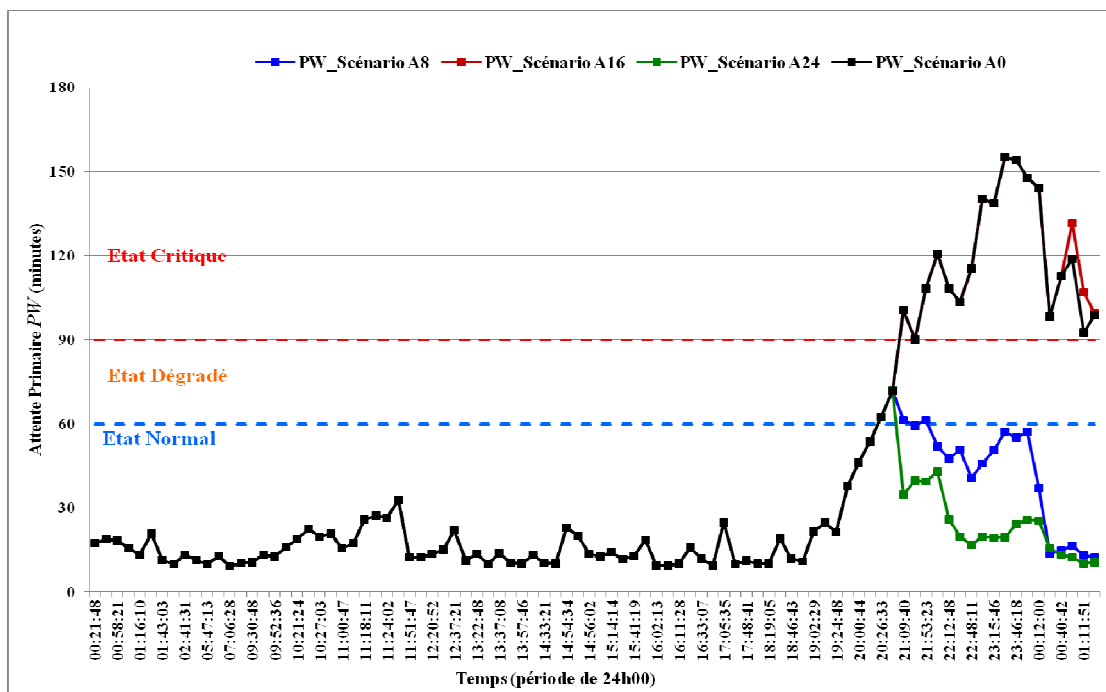


Figure VI-30 : Impact des règles de priorité.

On observe un impact important du choix de la règle de priorité sur les valeurs de PW. Ceci nous amène à conclure que l'évitement des tensions ne passe pas seulement par l'augmentation des moyens mais aussi par une réflexion sur l'impact de l'organisation interne du SUP.

Appliquer uniquement des règles simples devrait permettre de mieux gérer les situations de tension. On constate que la règle 1 (priorité aux patients urgents) et la règle 3 (priorité aux patients en début du processus) ont un impact positif sur les valeurs de PW. La règle 2 donnant la priorité aux patients qui ont un temps de séjour élevé n'a pas donné de bons résultats. Le temps séjour n'apparaît donc pas comme un paramètre de priorité.

e) Scénarios combinant différentes actions

Dans cette partie, nous présentons les résultats de scénarios combinant plusieurs actions. Les scénarios sélectionnés sont (figure VI-31) :

- A<sub>0</sub> : scénario initial sans actions de correction,
- A<sub>31</sub> : 1IDE, 1 médecin, 1 box supplémentaire, règle 3, avec un T<sub>L</sub> = 0 minute,
- B<sub>31</sub> : 1IDE, 1 médecin, 1 box supplémentaire, règle 3, avec un T<sub>L</sub> = 60 minutes,
- C<sub>31</sub> : 1IDE, 1 médecin, 1 box supplémentaire, règle 3, avec un T<sub>L</sub> = 90 minutes.

On remarque ici que la combinaison d'actions de corrections (ressources humaines et matérielles) et des règles de priorité a permis de réduire l'attente primaire PW.

Le modèle CAST correspondant aux scénarios A<sub>31</sub>, B<sub>31</sub> et C<sub>31</sub> des trois alternatives A, B et C respectivement, est présenté dans la table VI-10.

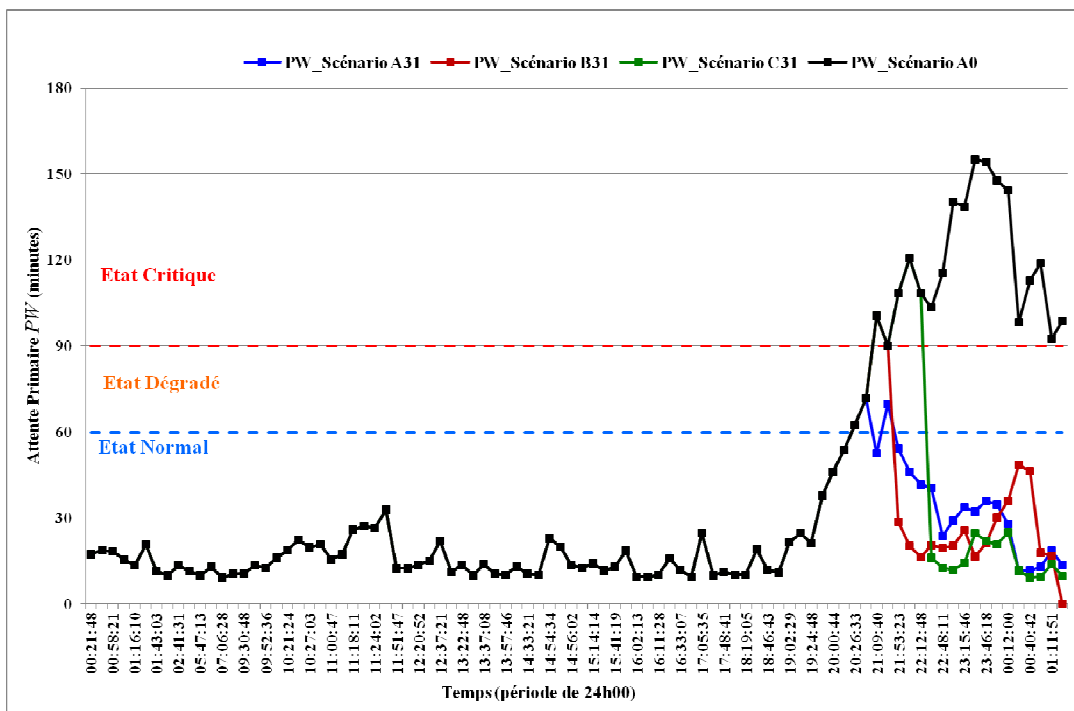


Figure VI-31 : Combinaison de plusieurs actions de correction.

Table VI-10 : Modèle CAST pour les scénarios A<sub>31</sub>, B<sub>31</sub> et C<sub>31</sub>

Contexte	Objectif	Variables d'état	Action correctives possibles	Valeurs seuils	Etat du SU	Actions Correctives appliquées	Efficacité (E)	
							T <sub>L</sub>	T <sub>R</sub>
Période épidémique et soir	Minimiser l'attente primaire PW	Temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et l'examen médical	Actions des alternatives A, B, et C	PW ≥ 60	Dégradé	A <sub>31</sub>	0	1h 24 mn
				PW ≥ 90	Critique	B <sub>31</sub>	60	1h 18 mn
				PW ≥ 90	Critique	C <sub>31</sub>	90	1h 22 mn

#### 5.4. Discussion

Au vu des résultats présentés précédemment, on a pu observer l'impact des différentes actions sur le comportement du SUP. Le temps de lancement des actions joue un rôle primordial dans certains cas notamment dans le cas de l'ajout d'une IDE.

Nous avons également étudié les scénarios combinant différents types d'actions de corrections. Les résultats obtenus montrent que certaines combinaisons permettent d'améliorer simultanément plusieurs indicateurs de tension (Annexe E).

Certains résultats étaient attendus, mais leur confirmation et leur quantification à l'aide des modèles proposés sont importantes.

La série des expérimentations menées sur les règles de priorité appliquées au flux patients ont montré leur intérêt. Elles sont ainsi à prendre en compte pour améliorer les actions classiques consistant à augmenter les moyens mis à disposition du gestionnaire du SUP. En effet, ceci nous a permis de montrer qu'une modification de la gestion des files d'attente a notamment un impact positif sur l'indicateur PW. Cette piste est très prometteuse. Elle va nous inciter à travailler sur le développement d'un algorithme de gestion de flux patients plus sophistiqué. Cet algorithme doit prendre en considération des différentes caractéristiques du flux patients. Ces caractéristiques peuvent être de deux catégories :

- relatives au patient : motif d'admission, type de diagnostic, ...
- relatives au système : nombre de patients présents dans le système, nombre de médecins, séjour prévisionnel, temps d'attente prévisionnel, ...

Il est à noter que nous avons testé tous les scénarios possibles. Il est évident qu'il faut retenir les scénarios les plus prometteurs, mais également ceux qui peuvent être mis en œuvre par la suite dans le système réel en tenant compte de l'organisation des ressources humaines, de la réglementation et de l'aspect économique.

## **6. Conclusion**

Ce chapitre a présenté et analysé les principaux résultats de l'application des principales fonctions du système d'aide à la décision « SAGEST » sur le fonctionnement du service d'urgence pédiatrique (SUP) du CHRU de Lille.

Les expérimentations de ce chapitre ont été réparties en quatre catégories :

- la prévision des situations de tension à l'aide des modèles de séries chronologiques,
- la détection d'occurrences des situations de tension au niveau du SUP en utilisant les méthodes de détections univariées et multivariées,
- le pilotage proactif du SUP qui permet d'anticiper, voire éviter les situations de tension en utilisant la simulation,
- le pilotage réactif du SUP qui permet de gérer l'occurrence des situations de tension en temps réel.

La partie suivante présente les conclusions et perspectives de cette thèse.

# **Conclusion générale et perspectives**

## **Conclusion générale**

L'objectif de cette thèse est de contribuer à l'amélioration de la gestion des situations de tension qui peuvent se produire dans un service d'urgence en proposant un système d'aide à la décision, SAGEST (Système d'Aide à la décision pour la **GE**stion des **S**ituations de **T**ensions), permettant d'anticiper et de gérer ces situations. L'objectif essentiel de ce système est double : améliorer l'accueil des patients au sein du SUP et faciliter la tâche des personnels du SUP.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté le contexte du travail de thèse, les systèmes sociotechniques et leurs caractéristiques ainsi que la notion de perturbations en précisant les différentes facettes liées à la résilience des systèmes sociotechniques. Nous avons ensuite décrit les caractéristiques des services d'urgence et les problématiques auxquelles le personnel d'un service d'urgence doit faire face. La revue de littérature a montré que les situations de tension et la résilience des services d'urgence ont fait l'objet de très peu d'études spécifiques en termes de définition et de modélisation. Le premier chapitre a mis en évidence la nécessité d'un système d'aide à la décision pour anticiper et/ou limiter ces situations et établir des propositions pour éviter et réduire leur impact.

Dans le deuxième chapitre, nous avons défini et caractérisé la situation de tension dans un service d'urgence, ainsi que les indicateurs de tension et les actions de corrections associées. Nous avons ensuite proposé un ensemble d'indicateurs de tension nécessaires à l'anticipation et à la gestion des situations de tension en précisant leur structure et les types d'actions correctives pouvant être appliquées pour prévenir ou réduire l'effet dû à une situation de tension. Enfin, dans une dernière partie, nous avons proposé une définition de la résilience d'un SU en considérant la notion de performance du SU et une méthodologie d'évaluation de la résilience d'un SU basée sur la simulation.

Dans le troisième chapitre, en nous référant aux typologies des décisions et de systèmes d'aide à la décision existantes, nous avons proposé une architecture d'un système d'aide à la décision (SAGEST) pour la gestion des situations de tension d'un service d'urgence.

Nous avons, dans le quatrième chapitre, présenté les méthodologies et les outils utilisés dans la construction des principales fonctions du système SAGEST, ainsi que la formalisation des règles de gestion de la base de connaissances. Nous avons proposé deux méthodologies de détection des situations de tension dans un SU. Dans la deuxième partie, nous avons décrit les principales étapes de prise en charge des patients et une méthode pour le pilotage réactif du SAGEST fondée sur la simulation des actions de correction.

Dans le cinquième chapitre, nous avons présenté l'application des différents modèles du système d'aide à la décision pour la gestion des situations de tension (SAGEST) pour le service d'urgence pédiatrique (SUP) du centre hospitalier régional universitaire de Lille.



Dans le sixième chapitre, les principaux résultats de l'application des différents modèles proposés dans le cas du SUP du CHRU de Lille ont été exposés et commentés.

L'ensemble des résultats obtenus montre l'intérêt, pour les responsables d'un SU, de disposer d'un système de gestion assurant le pilotage proactif et réactif du SUP pour mieux adapter son organisation, en termes de ressources humaines et matérielles. Ce système permet d'éviter l'apparition de situations de tension et de limiter leur impact si elles se produisent.

Le travail en cours dans le cadre du projet ANR HOST devrait permettre d'améliorer, de tester et de valider les méthodes et outils proposés. Une évaluation sur site par les personnels du SUP de Lille est ainsi une des tâches du projet.

En termes de recherche, nous avons identifié de nombreuses perspectives pour l'amélioration de la modélisation des situations de tension, de leur prévision et de la détection et leur gestion et la mise en œuvre de SAGEST.

## **Perspectives**

La suite des travaux de recherche que nous envisageons concerne ainsi les thèmes suivants :

- l'amélioration des modèles de prévision et de détection des situations de tension en utilisant les approches multicritère et multivariées. L'exploration d'autres approches de modélisation comme les méthodes d'ondelettes et les séries de Fourier est également envisagée. Une étude sera menée afin de comparer ces différentes techniques et leurs combinaisons éventuelles pour identifier les mieux adaptées.
- l'utilisation des méthodes de seuillage dynamique (méthodes probabilistes et logique floue) pour améliorer la définition des seuils proposés pour chaque indicateur de tension et trouver les probabilités de transition entre les états d'un SU proposés dans le chapitre II.
- l'utilisation des techniques de fouille de données ou Datamining. Les données produites par les services d'urgence ne cessent d'augmenter. Les dossiers informatisés et les bases de données du SUP contiennent beaucoup de connaissances et d'informations utiles à la modélisation des situations de tension. Pour extraire ces informations, les techniques de fouille de données apparaissent les mieux adaptées (Benbelkacem et al., 2014). Ces techniques peuvent notamment être utilisées pour i) l'identification des nouveaux indicateurs de tension et de leurs relations, l'identification des parcours patients, ii) la classification des temps de séjour de chaque patient selon les caractéristiques de son parcours au sein du SU (pathologie, âge, sexe, moyen d'arrivée...),
- une perspective qui nous paraît également importante est l'élaboration d'algorithmes multicritère établissant la priorité de la prise en charge des patients selon les paramètres suivants :
  - le degré de gravité du patient,
  - la pathologie,

- l'évolution du temps d'attente d'un patient donné dès son arrivée au SUP,
  - le temps de séjour du patient,
  - le niveau de stress des accompagnants de l'enfant.
- un autre thème que nous souhaitons aborder est la possibilité de mettre en place un pilotage réactif basé sur la simulation en ligne pour l'aide à la décision. Il s'agit d'une étude de la pertinence et de la faisabilité de la simulation en ligne du processus de prise en charge des patients. Le pilotage réactif doit permettre de réagir en temps réel par rapport à l'occurrence d'une situation de tension imprévue. Par conséquent, il est important de disposer en particulier :
- d'un modèle de simulation suffisamment proche de la réalité et comportant des variables associées à l'état du SU réel permettant la cohérence entre le modèle de simulation et le SU réel,
  - de l'instrumentation nécessaire pour la connexion entre le modèle de simulation et le système physique du SU,
  - d'un simulateur à vitesse capable d'une vitesse d'exécution élevée pour améliorer la rapidité de la prise de décision,
  - de la disponibilité de données précises et de qualité.
- plus globalement, il nous semble important de mener une réflexion sur la démarche à mettre en œuvre pour que le SU soit effectivement une organisation à haute fiabilité (HRO - High Reliability Organisation). Ce problème conduira à formaliser plus précisément la notion de résilience d'un SU et de proposer une méthodologie d'évaluation des indicateurs de la résilience d'un SU. Cette approche devra prendre en compte la nécessité de la proactivité et de la réactivité, mais également de l'apprentissage. En outre, les facteurs humains dans la prise en charge des patients constituent un fondamental de la résilience de ces systèmes. L'impact du stress du personnel médical constituera un paramètre clé dans la détermination de la résilience d'un SU.
- un autre objectif est, dans le cadre du projet HOST, en collaboration avec les équipes du projet et les personnels du SUP, de développer le système SAGEST sur plusieurs points et notamment :
- améliorer le modèle de processus décisionnel du système SAGEST,
  - enrichir la base de connaissances et développer un système de raisonnement à base de cas,
  - améliorer et adapter l'interface utilisateur du système SAGEST,
- des objectifs plus opérationnels seront également à considérer, en particulier l'instrumentation du SU afin de disposer en temps réel des données nécessaires à la gestion des situations de tension.

## Liste des acronymes

- ACF** : Fonction d'auto-corrélation
- ACI** : Analyse en Composantes Indépendantes
- ACP**: Analyse en Composante Principale, PCA (Principal Component Analysis)
- AMDEC** : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
- ANAES** : Agence Nationale d'Accréditation et d'Evaluation en Santé
- ANR** : Agence Nationale de la Recherche ([www.agence-nationale-recherche.fr](http://www.agence-nationale-recherche.fr))
- AR** : Autorégressif
- ARMA** : Auto-Regressive Moving Average (Auto-Régressif Moyenne mobile)
- ARMAX** : Auto-Régressif Moyenne Mobile avec variable exogène
- AS** : Aide-soignant(e)
- ATMO** : Indice quotidien de la qualité de l'air ([www.atmo-france.org](http://www.atmo-france.org))
- AUTRID** : Analyse de l'urgence en temps réel des indicateurs de demande
- AVC** : Analyse de Variable Canonique,
- CAST** : Cas de Situation de Tension
- CCMU**: Classification Clinique des Malades aux Urgences
- C<sub>M</sub>** : Gestion courante d'un service d'urgence
- CH** : Centre Hospitalier
- CHU** : Centre Hospitalier Universitaire
- CP** : Composante Principale
- CPV**: Variance de Pourcentage Cumulatif (Cumulative Percent Variance)
- CUSUM** : Cumulative Sum Chart
- DHOS** : Direction de l'Hospitalisation et de l'Organisation des Soins ([www.sante.gouv.fr](http://www.sante.gouv.fr))
- DREES** : Direction de la Recherche, des Etudes, de l'évaluation et des Statistiques ([www.drees.sante.gouv.fr](http://www.drees.sante.gouv.fr))
- EC** : Etat critique
- ED** : Etat dégradé
- EDWIN**: Emergency Department Work Index
- E<sub>M</sub>** : Gestion d'urgence d'un service d'urgence
- EN** : Etat normal
- EQM** : Erreur Quadratique Moyenne
- EWMA** : Exponentially Weighted Moving Averages chart
- IAO** : Infirmier(e) d'Accueil et d'Orientation
- IDE** : Infirmier(e) Diplômé(é) d'Etat
- ITSU** : Indice de Travail du Service d'Urgence
- IENESU** : Indice de l'échelle nationale de l'encombrement des services d'urgence
- Kurtosis** : Coefficient d'aplatissement ou coefficient d'aplatissement de Pearson
- MA** : Moyenne mobile
- MAPE** : Erreur absolue moyenne en pourcentage (Mean Absolute Percentage Error)
- MCUSUM** : Multivariate Cumulative Sum chart
- MEAH** : Mission Nationale d'Expertise et d'Audit Hospitaliers

**MEWMA**: Multivariate Exponentially Weighted Moving Averages chart  
**MSP** : Maitrise Statistiques des Processus (Statistical Process Control – SPC)  
**MSPM** : Maitrise Statistiques des Processus Multivariés  
**MU** : Médecin urgentiste  
**ORL** : Oto-Rhino-Laryngologie  
**READI** : Demand Value of the Real-time Emergency Analysis of Demand Indicators  
**SAD** : Système d'Aide à la Décision  
**SADG** : Système d'Aide à la Décision de Groupe  
**SADM** : Système d'Aide à la Décision Médical  
**SAMU** : Service d'Aide Médicale Urgente ([www.samu-de-france.fr](http://www.samu-de-france.fr))  
**SARIMA** : Seasonnal AutoRegressive Integrated Moving Average  
**SAUV** : Salle d'Accueil d'Urgence Vitale  
**SC** : Séries chronologiques  
**SIG** : Système d'Information de Gestion  
**SID** : Système d'Information décisionnel  
**SIAD** : Système Interactifs d'Aide à la Décision  
**SFMU** : Société Francophone de Médecine d'Urgence ([www.sfmu.org](http://www.sfmu.org))  
**S<sub>M</sub>** : Gestion spécifique  
**Skewness** : Coefficient de dissymétrie  
**SSC** : Système Sociotechnique Complexe  
**SSR** : Somme des carrés des résidus  
**SSY** : Somme des carrés de la différence entre la valeur théorique et la valeur moyenne  
**STSU** : Score du Travail au Service d'Urgence, (Work Score)  
**SU** : Service d'Urgence  
**SUP** : Service d'Urgence Pédiatrique  
**UHCD** : Unité d'Hospitalisation de Courte Durée  
**VAR** : Auto-Régression Vectorielle

## Références bibliographiques

- Abdel-Aal, R.E., Mangoud, A.M., 1998. Modeling and forecasting monthly patient volume at a primary health care clinic using univariate time-series analysis. *Comput. Methods Programs Biomed.* 56, 235–247.
- Abdolhamidzadeh, B., 2013. Decision Support Systems for Preventing Domino Effects - Domino Effects in the Process Industries, in: *Domino Effects in the Process Industries Modelling, Prevention and Managing*.
- Aboueljinnane, L., Sahin, E., Jemai, Z., Marty, J., 2014. A simulation study to improve the performance of an emergency medical service: Application to the French Val-de-Marne department. *Simul. Model. Pract. Theory* 47, 46–59.
- ACEP, 2006. Crowding. *Ann. Emerg. Med.* 47, 585.
- Adeli, H., 2003. *Expert Systems in Construction and Structural Engineering*. CRC Press.
- Adger, W.N., 2000. Social and ecological resilience: are they related? *Prog. Hum. Geogr.* 24, 347–364.
- Adya, M., J., E., 2012. Designing Effective Forecasting Decision Support Systems: Aligning Task Complexity and Technology Support, in: Jao, C. (Ed.), *Decision Support Systems*. InTech.
- Ahmed, M.A., Alkhamis, T.M., 2009. Simulation optimization for an emergency department healthcare unit in Kuwait. *Eur. J. Oper. Res.* 198, 936–942.
- Aini, M., Fakhurul-Razi, A., 2010. Development of socio-technical disaster model. *Saf. Sci.* 48, 1286–1295.
- Akharraz, A., 2004. Acceptabilité de la décision et risque décisionnel : Un système explicatif de fusion d'informations par l'intégrale de Choquet. Université de Savoie.
- Albers, W., 2011. Risk-Adjusted Control Charts for Health Care Monitoring. *Int. J. Math. Math. Sci.* 2011, 1–17.
- Al-Refaie, A., Fouad, R.H., Li, M.-H., Shurrab, M., 2014. Applying simulation and DEA to improve performance of emergency department in a Jordanian hospital. *Simul. Model. Pract. Theory* 41, 59–72.
- Alvear, D., Abreu, O., Cuesta, A., Alonso, V., 2013. Decision support system for emergency management: Road tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 34, 13–21.
- Amaral, T.M., Costa, A.P.C., 2014. Improving decision-making and management of hospital resources: An application of the PROMETHEE II method in an Emergency Department. *Oper. Res. Health Care* 3, 1–6.
- Andersson, T., Värbrand, P., 2007. Decision support tools for ambulance dispatch and relocation. *J. Oper. Res. Soc.* 195–2001.
- Anders, S., Woods, D., Wears, R., Perry, S., Patterson, E., 2006. Limits on adaptation: modeling resilience and brittleness in hospital emergency departments. Presented at the 2nd Symposium on Resilience Engineering, Juan-les-Pins, France.
- Anneveld, M., Linden, C. van der, Grootendorst, D., Galli-Leslie, M., 2013. Measuring emergency department crowding in an inner city hospital in The Netherlands. *Int. J. Emerg. Med.* 6, 21.

- Babai, M.Z., Ali, M.M., Boylan, J.E., Syntetos, A.A., 2013. Forecasting and inventory performance in a two-stage supply chain with ARIMA(0,1,1) demand: Theory and empirical analysis. *Int. J. Prod. Econ., Focusing on Inventories: Research and Applications* 143, 463–471.
- Babin, P.D., Greenwood, A.G., 2011. Discretely evaluating complex systems: simulation is a valuable tool for lean Six Sigma. *Ind. Eng. Manag.* 43, 34–38.
- Balasko, B., Banko, Z., Abonyi, J., 2007. Analyzing trends by symbolic episode representation and sequence alignment, in: *Mediterranean Conference on Control Automation, 2007. MED '07*. Presented at the Mediterranean Conference on Control Automation, 2007. MED '07, pp. 1–6.
- Banerjee, A., 1993. *Co-integration, Error Correction, and the Econometric Analysis of Non-stationary Data*. Oxford University Press.
- Basseville, M., Nikiforov, I.V., 1993. *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- Baubeau, D., Deville, A., Joubert, M., 2000. Les passages aux urgences de 1990 à 1998 : une demande croissante de soins non programmés (No. 72).
- Beaulieu, H., Ferland, J.A., Gendron, B., Michelon, P., 2000. A mathematical programming approach for scheduling physicians in the emergency room. *Health Care Manag. Sci.* 3, 193–200.
- Békaert, J., Masclet, G., Caron, R., 2011. Les instruments de mesure de la résilience chez les adolescents ayant été confrontés à un traumatisme : une revue de la littérature. *Ann. Méd.-Psychol. Rev. Psychiatr.* 169, 510–516.
- Belaidi, A., Besombes, B., Marcon, E., 2007. Réorganisation d'un service d'urgences et aide au pilotage des flux de patients : apport de la modélisation d'entreprise et de la simulation de flux. *Logistique Manag.* 15, 61–73.
- Benaïcha, A., Guerfel, M., Bouguila, N., Benothman, K., 2010. New PCA-based methodology for sensor fault detection and localization, in: *MOSIM'10. Hammamet - Tunisia*, pp. 1–8.
- Benbelkacem, S., Kadri, F., Chaabane, S., Atmani, B., 2014. A data mining-based approach to predict strain situations in hospital emergency department systems, in: *10<sup>th</sup> International Conference of Modeling and Simulation - MOSIM'14, Nancy - France*, pp. 1–8.
- Benchekrone, H., Bourgeois, F., Hubault, F., 2002. Comment aider l'encadrement de proximité à faire des arbitrages face à des situations à risques. Présenté au 37<sup>em</sup> Congrès de la SELF, Toulouse, pp. 377–385.
- Berchet, C., 2000. *Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel*. Université de Grenoble, INPG.
- Bergs, J., Heerinckx, P., Verelst, S., 2014. Knowing what to expect, forecasting monthly emergency department visits: A time-series analysis. *Int. Emerg. Nurs.* 22, 112–115.
- Bernstein, S.L., Verghese, V., Leung, W., Lunney, A.T., Perez, I., 2003. Development and validation of a new index to measure emergency department crowding. *Acad. Emerg. Med. Off. J. Soc. Acad. Emerg. Med.* 10, 938–942.
- Bhowal, P., Sarkar, D., Mukhopadhyay, S., Basu, A., 2007. Fault diagnosis in discrete time hybrid systems – A case study. *Inf. Sci., Including: The 3rd International Workshop on Computational Intelligence in Economics and Finance (CIEF'2003)* 177, 1290–1308.
- Biau, D., Dessolle, L., Porcher, R., 2011. Applications and Experiences of Quality Control to Surgical and Interventional Procedures, in: *Ivanov, O. (Ed.), Applications and Experiences of Quality Control*. InTech.

- Boin, A., McConnell, A., Hart, P., 2008. *Governing after Crisis: The Politics of Investigation, Accountability and Learning*, Édition : 1. ed. Cambridge University Press, Cambridge; New York.
- Bond, K., Ospina, M.B., Blitz, S., Afilalo, M., Campbell, S.G., Bullard, M., Innes, G., Holroyd, B., Curry, G., Schull, M., Rowe, B.H., 2007. Frequency, determinants and impact of overcrowding in emergency departments in Canada: a national survey. *Healthc. Q. Tor. Ont* 10, 32–40.
- Bouamrane, K., Tahon, C., 2005. Decision making system for regulation of a bimodal urban transportation network, associating a classical and a multi-agent approaches. *Informatica* 16, 473–502.
- Boumane, A., 2007. Développement d'une méthodologie de gestion des compétences. Valenciennes et de Hainaut Combrésis.
- Bourcart, L., 2011. Les multiples sens de la résilience : du renouvellement des méthodes de gestion de crise à l'intégration du risque de catastrophe comme critère de développement.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., 1976. *Time series analysis: forecasting and control*. Holden-Day.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., 2008. *Time series analysis: forecasting and control*, 4 th. ed. John Wiley, Hoboken, N.J.
- Boyle, A., Beniuk, K., Higginson, I., Atkinson, P., 2012. Emergency Department Crowding: Time for Interventions and Policy Evaluations. *Emerg. Med. Int.* 2012.
- Brans, J., Vincke, P., 1985. A preference ranking organisation method (the promethee method for multiple criteria decision-making). *Manag. Sci.* 31, 647–656.
- Brémond, M., Mick, S.S., Robert, D., Pascal, C., Claveranne, J.-P., 2013. Crises et tensions au sein de l'hôpital public : changer la donne ou donner le change ? *Trib. Santé* n° 38, 77–94.
- Brenner, S., Zeng, Z., Liu, Y., Wang, J., Li, J., Howard, P.K., 2010. Modeling and Analysis of the Emergency Department at University of Kentucky Chandler Hospital Using Simulations. *J. Emerg. Nurs.* 36, 303–310.
- Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A., von Winterfeldt, D., 2003. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthq. Spectra* 19, 733–752.
- Cabrera, E., Taboada, M., Iglesias, M.L., Epelde, F., Luque, E., 2011. Optimization of Healthcare Emergency Departments by Agent-Based Simulation. *Procedia Comput. Sci.* 4, 1880–1889.
- Cabrera, E., Taboada, M., Iglesias, M.L., Epelde, F., Luque, E., 2012. Simulation Optimization for Healthcare Emergency Departments. *Procedia Comput. Sci.* 9, 1464–1473.
- Cardin, O., 2007. Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production. Application à un système flexible de production. Université de Nantes.
- Carey, R.G., Lloyd, R.C., 2001. *Measuring quality improvement in healthcare: a guide to statistical process control applications*, Amer Society for Quality; 1st edition. ed. Quality Resources, New York.
- Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J.M., Abel, N., 2001. From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems* 4, 765–781.
- Cash, E., Cash, R., Ducassé, J., Hault, C., Marthieu, F., Richard, T., 2013. Enquête qualitative préalable à la définition d'une enquête nationale sur les urgences hospitalières », (Document de travail n° 125, Série études et recherche, DREES.).

- Cassadou, S., Ricoux, C., Gourier-Fréry, C., Schwœbel, V., Guinard, A., 2003. Conséquences sanitaires de l'explosion survenue à l'usine "AZF" de Toulouse le 21 Septembre 2001 (Conséquences des expositions environnementales). Institut de veille sanitaire.
- Cegarra, J., Wezel, W. van, 2012. Revisiting Decision Support Systems for Cognitive Readiness: A Contribution to Unstructured and Complex Scheduling Situations. *J. Cogn. Eng. Decis. Mak.* 305-527.
- Champion, R., Kinsman, L.D., Lee, G.A., Masman, K.A., May, E.A., Mills, T.M., Taylor, M.D., Thomas, P.R., Williams, R.J., 2007. Forecasting emergency department presentations. *Aust. Health Rev. Publ. Aust. Hosp. Assoc.* 31, 83–90.
- Chang, K.-T., Wan, S., Lei, T.-C., 2010. Development of a spatial decision support system for monitoring earthquake-induced landslides based on aerial photographs and the finite element method. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation, Geospatial Technologies for Disaster Management* 12, 448–456.
- Charpy, G., 1901. Note sur l'essai des métaux à la flexion par choc de barreaux entaillés, *Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils.* ed.
- Chen, C.-F., Ho, W.-H., Chou, H.-Y., Yang, S.-M., Chen, I.-T., Shi, H.-Y., 2011. Long-Term Prediction of Emergency Department Revenue and Visitor Volume Using Autoregressive Integrated Moving Average Model. *Comput. Math. Methods Med.* 2011, 1-7.
- Chen, C.-M., Lin, C.-W., Chen, Y.-C., 2007. Adaptive error-resilience transcoding using prioritized intra-refresh for video multicast over wireless networks. *Signal Process. Image Commun.* 22, 277–297.
- Cherry, G.A., Qin, S.J., 2006. Multiblock principal component analysis based on a combined index for semiconductor fault detection and diagnosis. *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* 19, 159–172.
- Chiang, L., Russell, E.L., Braatz, R., 2001. *Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems, Advanced Textbooks in Control and Signal Processing.* ed. Softcover reprint of the original 1st ed.
- CIHI, 2005. Understanding Emergency Department waiting times. Who is using Emergency Departments and how long are they waiting?. Canadian Institute for Health Information, p.54
- Cimellaro, G., Fumo, C., Reinhorn, A., Bruneau, M., 2008. Seismic resilience of health care facilities, in: *World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*, pp. 12–17.
- Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M., Bruneau, M., 2010. Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Eng. Struct.* 32, 3639–3649.
- Cimellaro, G., Reinhorn, A., Bruneau, M., 2006. Quantification of seismic resilience, in: *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, USA*, p. 10.
- Combacau, M., 1991. *Commande et surveillance des systèmes à événements discrets complexes: application aux ateliers flexibles.*
- Coriat, P., Braun, F., Genet, J., Goldstein, P., Nazac, A., Pol, B., Remond, J., 2008. Propositions sur la composition, les missions et le champ d'action du Conseil national de l'urgence et de la permanence des soins (rapport public). *Ministre de la santé, de la jeunesse, des sports et de la vie associative.*
- Cox, A., Prager, F., Rose, A., 2011. Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics. *Transp. Policy* 18, 307–317.
- Crosier, R., 1988. Multivariate Generalisation of Cumulative Sum Quality-Control Schemes. *Technometrics* 30, 291–303.



- Cryer, J.D., Chan, K., 2009. Time series analysis with applications in R, 2 nd. ed. Springer, New York.
- Dai, X., Gao, Z., 2013. From Model, Signal to Knowledge: A Data-Driven Perspective of Fault Detection and Diagnosis. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 9, 2226–2238.
- Dautel, M., Montserrat, X., De Rezende, P., 2002. Etude comparée de l'organisation des services d'urgence dans dix pays européens. Paris : MSSPS (éditeur), 290 pages.
- Devanandham, H., Ramired-Marquez, J., 2012. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 99, 114–122.
- DHOS, 2006. Plan blanc et gestion de crise. Guide d'aide à l'élaboration des plans blancs élargis et plans blancs des établissements de santé.
- Diefenbach, M., Kozan, E., 2008. Hospital emergency department simulation for resource analysis *Industrial Engineering & Management Systems*,7(2), 133-142.
- Dowland, K.A., 1998. Nurse scheduling with tabu search and strategic oscillation. *Eur. J. Oper. Res.* 106, 393–407.
- Doyle, S.L., Kingsnorth, J., Guzzetta, C.E., Jahnke, S.A., McKenna, J.C., Brown, K., 2012. Outcomes of implementing rapid triage in the pediatric emergency department. *J. Emerg. Nurs.* 38, 30–35.
- Drummond, A., 2002. No room at the inn: overcrowding in Ontario's emergency departments. *Can. J. Emerg. Med.* 4, 91–97.
- Duguay, C., Chetouane, F., 2007. Modeling and Improving Emergency Department Systems using Discrete Event Simulation. *SIMULATION* 83, 311–320.
- Duncan, A.J., 1956. The Economic Design of barX Charts used to Maintain Current Control of a Process. *J. Am. Stat. Assoc.* 51, 228–242.
- Durduran, S.S., 2010. A decision making system to automatic recognize of traffic accidents on the basis of a GIS platform. *Expert Syst. Appl.* 37, 7729–7736.
- Earnest, A., Chen, M.I., Ng, D., Sin, L.Y., 2005. Using autoregressive integrated moving average (ARIMA) models to predict and monitor the number of beds occupied during a SARS outbreak in a tertiary hospital in Singapore. *BMC Health Serv. Res.* 5, 36.
- Ediger, V.Ş., Akar, S., 2007. ARIMA forecasting of primary energy demand by fuel in Turkey. *Energy Policy* 35, 1701–1708.
- Ediger, V.Ş., Akar, S., Uğurlu, B., 2006. Forecasting production of fossil fuel sources in Turkey using a comparative regression and ARIMA model. *Energy Policy* 34, 3836–3846.
- Endsley, M., Kaber, D., 1999. Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in dynamic control task. *Ergonomics* 42, 462–492.
- Fagel, M.J., 2013. Crisis Management and Emergency Planning: Preparing for Today's Challenges. CRC Press, 550 pages.
- Fatovich, D.M., Nagree, Y., Sprivulis, P., 2005. Access block causes emergency department overcrowding and ambulance diversion in Perth, Western Australia. *Emerg. Med. J. EMJ* 22, 351–354.
- Fee, C., Weber, E.J., Bacchetti, P., Maak, C.A., 2011. Effect of emergency department crowding on pneumonia admission care components. *Am. J. Manag. Care* 17, 269–278.

- Feenstra, P.J., Mosterman, P.J., Biswas, G., Breedveld, P.C., 2001. Bond Graph Modeling Procedures for Fault Detection and Isolation of Complex Flow Processes, in: Proc. ICBGM'01, Simulation Series, vol. 33, no. 1, pp. 77–82.
- Feigenbaum, A.V., 1983. Total quality control: Engineering and Management, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
- Fiksel, J., 2003. Designing resilient, sustainable systems. *Environ. Sci. Technol.* 37, 5330–5339.
- Fischer, G., Herrmann, T., 2011. Socio-Technical Systems: A Meta-Design Perspective. *Int. J. Sociotechnology Knowl. Dev.* 3, 1–33.
- Flynn, P., Curran, K., Lunney, T., 2002. A Decision Support System for Telecommunications. *Int J Netw Manag* 12, 69–80.
- Fogli, D., Guida, G., 2013. Knowledge-centered design of decision support systems for emergency management. *Decis. Support Syst.* 55, 336–347.
- GAO, 2003. Hospital Emergency Departments: Crowded conditions vary among hospitals and communities (GAO-03-460). Washington, DC: National Academies Press.
- Geldermann, J., Bertsch, V., Treitz, M., French, S., Papamichail, K.N., Hämäläinen, R.P., 2009. Multi-criteria decision support and evaluation of strategies for nuclear remediation management. *Omega* 37, 238–251.
- George, J.P., Chen, D.Z., Shaw, P., 2009. Fault Detection of Drinking Water Treatment Process Using PCA and Hotelling's T2 Chart. *Eng. Technol.* 50, 970–975.
- Gertler, J., 1998. Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems. CRC Press.
- Gertler, J., Li, W., Huang, Y., McAvoy, T., 1999. Isolation enhanced principal component analysis. *AIChE J.* 45, 323–334.
- Goldman, M.C., 2003. How one power grid kept lights on Toronto Star,.
- Gonzalez, C.J., Gonzalez, M., Ríos, N.M., 1997. Improving the quality of service in an emergency room using simulation-animation and total quality management. *Comput Ind Eng* 33, 97–100.
- Gooijer, J.G.D., Hyndman, R.J. 2006, 25 years of time series forecasting. *Int. J. Forecast.* 22, 443–473.
- Goussé, V., 2008. Apport de la génétique dans les études sur la résilience : l'exemple de l'autisme. *Ann. Méd.-Psychol. Rev. Psychiatr.* 166, 523–527.
- Grewal, M.S., Andrews, A.P., 2011. Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB. John Wiley & Sons.
- GTEUC, 2004. Rapport final sur la panne du 14 août 2003 dans le nord-est des États-Unis et au Canada. États-Unis–Canada.
- Hafez, H.A.A., EIDahshan, K., 2010. Data Driven DSS in telecommunications industry, in: 2010 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA). Presented at the 2010 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), pp. 720–723.
- Hansson, S.O., 2005. Decision Theory: A Brief Introduction. R. Inst. Technol. KTH – Dep. Philos. Hist. Technol. Stockh. 2005 94.
- Harkat, M.-F., Djelal, S., Doghmane, N., Benouaret, M., 2007. Sensor fault detection, isolation and reconstruction using nonlinear principal component analysis. *Int. J. Autom. Comput.* 4, 149–155.

- Harmouche, J., Delpha, C., Diallo, D., 2014. Incipient fault detection and diagnosis based on Kullback–Leibler divergence using Principal Component Analysis: Part I. *Signal Process.* 94, 278–287.
- Harrald, J., 2007. restoring the national respos suystems. *Transp. Res. Board Natl. Acad.* 9–13.
- Harrou, F., Nounou, M., Nounou, H., 2013. A statistical fault detection strategy using PCA based EWMA control schemes, in: *Control Conference (ASCC), 2013 9th Asian*, pp. 1–4.
- HAS, 2010. Etude des systèmes d’aide à la décision médicale. Livre I: synthèse, version 1, 12 pages.
- Hassan, J., 2014. ARIMA and regression models for prediction of daily and monthly clearness index. *Renew. Energy* 68, 421–427.
- Hawkins, D.M., 1991. Multivariate Quality Control Based on Regression-adjusted Variables. *Technometrics* 33, 61–75.
- Hawkins, D.M., Olwell, D.H., 1998. *Cumulative Sum Charts and Charting for Quality Improvement*. Springer.
- Hazards, T.N., Tierney, K., Bruneau, M., n.d. *Conceptualizing and Measuring Resilience A Key to Disaster Loss Reduction*.
- Heini, O., 2007. Designing a generic measure and performance indicator model (science in communication and information systems). Université de Genève, 135 p., Geneva.
- Holling, C., 1996. Engineering Within Ecological Constraints. *Natl. Acad. Press Wash. DC* 31–43.
- Hollnagel, E., 2011. *Resilience engineering in practice a guidebook*. Ashgate, Farnham, Surrey, England; Burlington, VT.
- Hollnagel, E., Paries, J., Woods, D., 2010. *Resilience engineering in practice a guidebook*, Ashgate Studies in Resilience Engineering. Ashgate, Farnham, Surrey, England; Burlington, VT.
- Hollnagel, E., Woods, D.D., Leveson, N., 2007. *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Hoot, N.R., Aronsky, D., 2008. Systematic review of emergency department crowding: causes, effects, and solutions. *Ann. Emerg. Med.* 52, 126–136.
- Hoot, N.R., Zhou, C., Jones, I., Aronsky, D., 2007. Measuring and forecasting emergency department crowding in real time. *Ann. Emerg. Med.* 49, 747–755.
- Horne, J.F., 1997. A New Direction: The Coming Age of Organizational Resilience. *Bus. Forum* 22, 24–28.
- Hotelling, H., 1933. *Analysis of a Complex of Statistical Variables Into Principal Components*. Warwick & York.
- Hotelling, H., 1947. Multivariate Quality Control Illustrated by the Air Testing of Sample Bombsights. *Tech. Stat. Anal.* 111–184.
- Huang, Y., Gertler, J., McAvoy, T.J., 2000. Sensor and actuator fault isolation by structured partial PCA with nonlinear extensions. *J. Process Control* 10, 459–469.
- Huang, Z., Juarez, J.M., Duan, H., Li, H., 2014. Reprint of “Length of stay prediction for clinical treatment process using temporal similarity.” *Expert Syst. Appl.* 41, 274–283.
- Hunte, G., 2010. *Creating Safety in an Emergency Department*. The University Of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Hwang, I., Kim, S., Kim, Y., Seah, C.E., 2010. A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 18, 636–653.

- Hwang, U., McCarthy, M.L., Aronsky, D., Asplin, B., Crane, P.W., Craven, C.K., Epstein, S.K., Fee, C., Handel, D.A., Pines, J.M., Rathlev, N.K., Schafermeyer, R.W., Zwemer, F.L., Jr, Bernstein, S.L., 2011. Measures of crowding in the emergency department: a systematic review. *Acad. Emerg. Med. Off. J. Soc. Acad. Emerg. Med.* 18, 527–538.
- Hyvärinen, A., Karhunen, J., Oja, E., 2001. *Independent Component Analysis*. Wiley-Blackwell, New York.
- IMNA, 2006. *Institute of Medicine Committee on the Future of Emergency Care in the U.S. Health System. Hospital- Based Emergency Care: At the Breaking Point*. The National Academies Press, Washington, DC.
- Isermann, R., 2006. *Fault-Diagnosis Systems - An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer.
- Isermann, R., 2011. Supervision, fault-detection and diagnosis methods – a short introduction, in: *Fault-Diagnosis Applications*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 11–45.
- Ishikawa, K., 2007. *La gestion de la qualité : outils et applications pratiques*. Dunod, Paris.
- Jackson, J.E., 2003. *A User's Guide to Principal Components*, Édition : New edition. ed. Wiley-Blackwell, Hoboken, N.J.
- Jebali, A., 2004. *Vers un outil d'aide à la planification et à l'ordonnancement des ressources dans les services de soins*. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG.
- Jolliffe, I., 2002. *Principal Component Analysis*, Springer Series in Statistics. Springer-Verlag, 2nd edition, 488 pages.
- Jolliffe, I.T., 2013. *Principal Component Analysis*, Édition : Softcover reprint of the original 2nd ed. 2002. ed. Springer-Verlag New York Inc., New York.
- Jones, S.A., Joy, M.P., Pearson, J., 2002. Forecasting demand of emergency care. *Health Care Manag. Sci.* 5, 297–305.
- Jones, S.S., Evans, R.S., 2008. An Agent Based Simulation Tool for Scheduling Emergency Department Physicians. *AMIA. Annu. Symp. Proc.* 2008, 338–342.
- Jones, S.S., Evans, R.S., Allen, T.L., Thomas, A., Haug, P.J., Welch, S.J., Snow, G.L., 2009. A multivariate time series approach to modeling and forecasting demand in the emergency department. *J. Biomed. Inform.* 42, 123–139.
- Jongejan, R.B., Helsloot, I., Beerens, R.J.J., Vrijling, J.K., 2011. How prepared is prepared enough? *Disasters* 35, 130–142.
- Jordan, S., Messner, M., 2012. Enabling control and the problem of incomplete performance indicators. *Account. Organ. Soc.* 37, 544–564.
- Kadri, F., Chaabane, S., Harrou, F., Tahon, C., 2014a. Time series modelling and forecasting of emergency department overcrowding. *J. Med. Syst.*, 38:107, 1-20.
- Kadri, F., Chaabane, S., Harrou, F., Tahon, C., 2014b. Modélisation et prévision des flux quotidiens des patients aux urgences hospitalières en utilisant l'analyse de séries chronologiques, in: *7ème Conférence de Gestion et Ingénierie Des Systèmes Hospitaliers (GISEH)*, Liège, Belgique, pp. 8.
- Kadri, F., Chaabane, S., Tahon, C., 2012. Rapport d'activité du projet ANR HOST: Hôpital : Optimisation, Simulation et évitement des Tensions (Rapport interne, TEMPO-PSI, UVHC).
- Kadri, F., Chaabane, S., Tahon, C., 2013b. Service d'urgences hospitalières : situations de tension et résilience. Presented at the JD-JN-MACS, Strasbourg, France, p. 6.

- Kadri, F., Chaabane, S., Tahon, C., 2013c. Rapport d'activité-Partiel du projet ANR HOST : Analyse des données de service d'urgences pédiatriques du CHRU de Lille.
- Kadri, F., Chaabane, S., Tahon, C., 2014c. A simulation-based decision support system to prevent and predict strain situations in emergency department systems. *Simul. Model. Pract. Theory* 42, 32–52.
- Kadri, F., Chaabane, S., Tahon, C., 2014d. Vers la résilience des services d'urgences hospitalières : gestion efficace des situations de tension, in: 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation- MOSIM'14 – 5 Au 7 Novembre 2014 - Nancy - France, p. 10.
- Kadri, F., Châtelet, E., Birregah, B., 2014e. Natural Disaster Impacts on Critical Infrastructures: A domino effect-based study. *J. Homel. Secur. Emerg. Manag.*, 11(2), 217-241.
- Kadri, F., Châtelet, E., Chen, G., 2011. Method for quantitative assessment of domino effect caused by overpressure. Soares, C.(Ed.), *Advances in Safety, Reliability and Risk Management*. CRC Press 1360.
- Kadri, F., and Châtelet, E., and Chen, G., 2013a. Method for quantitative assessment of the domino effect in industrial sites,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 91, no. 6, pp. 452–462.
- Kadri, F., PACH, C., Chaabane, S., Berger, T., Trentesaux, D., Tahon, C., Sallez, Y., 2013c. Modelling and management of the strain situations in hospital systems using an ORCA approach, IEEE IESM, 28-30 October. RABAT - MOROCCO, p. 10.
- Kano, M., Nakagawa, Y., 2008. Data-based process monitoring, process control, and quality improvement: Recent developments and applications in steel industry. *Comput. Chem. Eng.* 32, 12–24.
- Kellermann, A.L., 2006. Crisis in the Emergency Department. *N. Engl. J. Med.* 355, 1300–1303.
- Kennedy, K., Salzillo, M., Olinsky, A., Quinn, J., 2013. Forecasting Patient Volume for a Large Hospital System: A Comparison of the Periodicity of Time Series Data and Forecasting Approaches. *Adv. Bus. Manag. Forecast.* 9, 33–44.
- Khare, R.K., Powell, E.S., Reinhardt, G., Lucenti, M., 2009. Adding more beds to the emergency department or reducing admitted patient boarding times: which has a more significant influence on emergency department congestion? *Ann. Emerg. Med.* 53, 575–585.
- Kohli, R., Piontek, F., 2008. DSS in Healthcare: Advances and Opportunities, in: *Handbook on Decision Support Systems 2*, International Handbooks Information System. Springer Berlin Heidelberg, pp. 483–497.
- Komashie, A., Mousavi, A., 2005. Modeling emergency departments using discrete event simulation techniques, in: *Simulation Conference, 2005 Proceedings of the Winter*. Presented at the Simulation Conference, 2005 Proceedings of the Winter, pp. 2681–2685.
- Lambe, S., Washington, D.L., Fink, A., Laouri, M., Liu, H., Scura Fosse, J., Brook, R.H., Asch, S.M., 2003. Waiting times in California's emergency departments. *Ann. Emerg. Med.* 41, 35–44.
- Larroque, B., 2008. Observateurs de systèmes linéaires : application à la détection et localisation de fautes (phd).
- Laskowski, M., McLeod, R.D., Friesen, M.R., Podaima, B.W., Alfa, A.S., 2009. Models of Emergency Departments for Reducing Patient Waiting Times. *PLoS ONE* 4, 1–12.
- Laudon, K.C., Bergeron, F., Laudon, J.P., Gingras, L., 2010. *Les Systèmes D'information de Gestion: Gérer L'entreprise Numérique*. Editions du Renouveau Pédagogique, 524 pages.

- Lebraty, J., Pastorelli-Nège, I., 2004. Biases cognitifs : quel statut dans la prise de décision assistée ? ». *Systèmes Inf. Manag.* 9, 87–116.
- Lehmann, E.L., Romano, J., 2005. *Testing Statistical Hypotheses*, 3rd edition. ed. Springer Science & Business Media, 784 pages.
- Levine, P., Pomerol, J.-C., 1995. The role of the decision maker in DSSs and representation levels, in: *Proceedings of the Twenty-Eighth Hawaii International Conference on System Sciences*, 1995. Presented at the Proceedings of the Twenty-Eighth Hawaii International Conference on System Sciences, 1995, pp. 42–51 vol.3.
- Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., Laganier, R., 2010. Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine. *Bull. Assoc. Géographes Fr. Geogr.* 487–502.
- Lindell, M.K., Prater, C., Perry, R.W., 2006. *Emergency Management*, 1 edition. Wiley, Hoboken, NJ
- Lin, W.T., 1989. Modeling and forecasting hospital patient movements: Univariate and multiple time series approaches. *Int. J. Forecast.* 5, 195–208.
- Litvak, N., van Rijsbergen, M., Boucherie, R.J., van Houdenhoven, M., 2008. Managing the overflow of intensive care patients. *Eur. J. Oper. Res.* 185, 998–1010.
- Lobach, D.F., Kawamoto, K., Anstrom, K.J., Russell, M.L., Woods, P., Smith, D., 2007. Development, deployment and usability of a point-of-care decision support system for chronic disease management using the recently-approved HL7 decision support service standard. *Stud. Health Technol. Inform.* 129, 861–865.
- Lowry, C.A., Woodall, W.H., Champ, C.W., Rigdon, S.E., 1992. A Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart. *Technometrics* 34, 46–53.
- Ltifi, H., 2011. Démarche centrée utilisateur pour la conception de SIAD basés sur un processus d'Extraction de Connaissances à partir de Données. Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- Luan, J., 2002. Contrôle de la qualité-MSP, analyse des performances et contrôle de réception., *Technique et Ingénierie*, Dunod/L'Usine Nouvelle. Dunod.
- Lucas, J.M., 1985. Counted Data CUSUM's. *Technometrics* 27, 129–144.
- Lucas, J.M., Saccucci, M.S., Baxley, Jr., R.V., Woodall, W.H., Maragh, H.D., Faltin, F.W., Hahn, G.J., Tucker, W.T., Hunter, J.S., MacGregor, J.F., Harris, T.J., 1990. Exponentially weighted moving average control schemes: properties and enhancements. *Technometrics* 32, 1–29.
- Lundberg, J., Johansson, B., 2007. Pragmatic resilience, in: *In Proceedings of the Resilience Engineering Workshop*, R. Woltjer, J. Lundberg and B. Johansson (eds.), Vadstena, Sweden.
- Luo, M.-Y., Yang, C.-S., 2002. Enabling Fault Resilience for Web Services. *Comput Commun* 25, 198–209.
- Luthans, F., Vogelgesang, G.R., Lester, P.B., 2006. Developing the Psychological Capital of Resiliency. *Hum. Resour. Dev. Rev.* 5, 25–44.
- MacGregor, J.F., Kourti, T., 1995. Statistical process control of multivariate processes. *Control Eng. Pract.* 3, 403–414.
- Madni, A.M., 2007. *Designing for Resilience*. ISTI Lect. Notes Adv. Top. Syst. Eng.
- Madni, A.M., Jackson, S., 2009. Towards a Conceptual Framework for Resilience Engineering. *IEEE Syst. J.* 3, 181–191.
- Madsen, H., 2007. *Time Series Analysis*. CRC Press.

- Makridakis, S.G., Wheelwright, S.C., Hyndman, R.J., 1998. *Forecasting: Methods and Applications*, 3rd Edition. ed.
- Mallak, L.A., 1998. Measuring resilience in health care provider organizations. *Health Manpow. Manage.* 24, 148–152.
- Mallak, P., 2007. Capabilities-based planning for the national preparedness system. *Transp. Res. Board* 4–8.
- Marcon, E., Guinet, A., Tahon, C., 2008. *Gestion et performance des systèmes hospitaliers, Productique*. Hermès science ; Lavoisier, Paris.
- Mardia, K.V., 1974. Applications of Some Measures of Multivariate Skewness and Kurtosis in Testing Normality and Robustness Studies. *Sankhyā Indian J. Stat. Ser. B* 1960-2002 36, 115–128.
- Marmor, Y.N., Wasserkrug, S., Zeltyn, S., Mesika, Y., Greenshpan, O., Carmeli, B., Shtub, A., Mandelbaum, A., 2009. Toward simulation-based real-time decision-support systems for emergency departments, in: *Simulation Conference (WSC)*, 2042–2053.
- Martín Rodríguez, G., Cáceres Hernández, J.J., 2005. A method for ascertaining the seasonal pattern of hospital emergency department visits. *Rev. Esp. Salud Pública* 79, 5–15.
- Martin, S., 2005. *La résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux*. Ecole Normale Supérieure de Cachan, France.
- Mayer, D.G., Butler, D.G., 1993. Statistical validation. *Ecol. Model.* 68, 21–32.
- Meinadier, J.-P., 1998. *Ingénierie et intégration des systèmes*. Hermes Science Publications.
- Mélard, G., Roy, R., Saidi, A., 2006. Exact maximum likelihood estimation of structured or unit root multivariate time series models. *Comput. Stat. Data Anal.* 50, 2958–2986.
- Metaxoglou, K., Smith, A., 2007. Maximum likelihood estimation of varma models using . A state-space em algorithm. *J. Time Ser. Anal.* 28, 666–685.
- Mirdamadi, S., 2009. *Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution*. Université de Toulouse.
- Millot, P., 1988. *Supervision des procédés automatisés et ergonomie*, Hermès, Paris, France.
- Mnassri, B., 2012. *Analyse de données multivariées et surveillance des processus industriels par analyse en composantes principales*. Aix-Marseille Université.
- Mohammed, M.A., Worthington, P., Woodall, W.H., 2008. Plotting basic control charts: tutorial notes for healthcare practitioners. *Qual. Saf. Health Care* 17, 137–145.
- Molinie, E., 2005. *L'hôpital public en France : bilan et perspectives*, Journal officiel de la République française, avis et rapports du Conseil économique et social. Journaux officiels.
- Montgomery, D., 1997. *Introduction to Statistical Quality Control*, 3rd ed. ed. Wiley, London.
- Montgomery, D.C., 2008. *Statistical quality control: a modern introduction*. John Wiley, Hoboken, N.J., 760 pages,
- Montgomery, D.C., 2012. *Introduction to statistical quality control*. Wiley, Hoboken, NJ.
- Mosterman, P.J., 2001. Diagnosis of Physical Systems with Hybrid Models Using Parametrized Causality, in: Benedetto, M.D.D., Sangiovanni-Vincentelli, A. (Eds.), *Hybrid Systems: Computation and Control*, Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, pp. 447–458.

- Mouzakitis, A., 2013. Classification of Fault Diagnosis Methods for Control Systems. *Meas. Control* 46, 303–308.
- Nakayama, H., Ansari, N., Jamalipour, A., Kato, N., 2007. Fault-resilient sensing in wireless sensor networks. *Comput. Commun.* 30, 2375–2384.
- Narayanan, P., Basistha, A., Sarkar, S., Kamna, S., 2013. Trend analysis and ARIMA modelling of pre-monsoon rainfall data for western India. *Comptes Rendus Geosci.* 345, 22–27.
- Nemeth, C., Wears, R., Woods, D., Hollnagel, E., Cook, R., 2008. Minding the Gaps: Creating Resilience in Health Care, in: Henriksen, K., Battles, J.B., Keyes, M.A., Grady, M.L. (Eds.), *Advances in Patient Safety: New Directions and Alternative Approaches (Vol. 3: Performance and Tools)*, *Advances in Patient Safety*. Agency for Healthcare Research and Quality (US), Rockville (MD).
- Numanoglu, T., Tavli, B., Heinzelman, W., 2006. Energy Efficiency and Error Resilience in Coordinated and Non-coordinated Medium Access Control Protocols. *Comput Commun* 29, 3493–3506.
- Oddoye, J.P., Jones, D.F., Tamiz, M., Schmidt, P., 2009. Combining simulation and goal programming for healthcare planning in a medical assessment unit. *Eur. J. Oper. Res.* 193, 250–261.
- Oedewald, P., Reiman, T., 2006. Using subjective measures to monitor the systems' capability to manage complexity – evidence from the nuclear industry and health care, in: *2nd Symposium on Resilience Engineering*, Presented at the 2nd Symposium on Resilience Engineering, Juan-les-Pins, France, pp. 8–10.
- Ondel, O., 2006. Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur - machine asynchrone. Ecole Centrale de Lyon.
- Ouedraogo, K.A., 2013. Apprentissage renforcé appliqué à l'évaluation de la résilience d'un Système Homme-Machine face à des situations critiques. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- Papamichail, K.N., French, S., 2005. Design and evaluation of an intelligent decision support system for nuclear emergencies. *Decis. Support Syst.* 41, 84–111.
- Patton, R.J., Chen, J., 1994. Review of parity space approaches to fault diagnosis for aerospace systems. *J. Guid. Control Dyn.* 17, 278–285.
- Pavard, B., Dugdale, J., Bellamine-Ben Saoud, N., Dacry, S., 2006. Design of robust socio-technical systems, in: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Resilience Engineering*.
- Pearson, E., 1935. *The application of statistical methods to industrial standardization and quality control*, British Standards Institution, London, UK
- Pellegrin, C., 1997. *Fondements de la décision de maintenance*. Économica.
- Perry, S., Wears, R., Spillane, J., 2008. When worlds collide: two medication systems in one emergency department, in: Hollnagel E, Pieri F, Rigaud E, Editors. *Proceedings of the 3rd Resilience Engineering Symposium*. Ecole des mines de Paris. Antibes— Juan-Les-Pins, France: Mines ParisTech Les Presses.
- Pierreval, H., 1999. Proposition de typologie des décisions en temps réel agissant sur les flux des systèmes de production, in: *2ème Congrès MOSIM'99*, Annecy. France.
- Pignatiello, J., Runger, G., 1990. Comparisons of Multivariate CUSUM Charts. *J. Qual. Technol.* 22, 173–186.
- Pillet, M., 2005. *Appliquer la maîtrise statistique des processus (MSP/SPC)*. Editions d'Organisation.



- Pimm, S.L., 1984. The complexity and stability of ecosystems. *Nature* 307, 321–326.
- Pines, J.M., Hilton, J.A., Weber, E.J., Alkemade, A.J., Al Shabanah, H., Anderson, P.D., Bernhard, M., Bertini, A., Gries, A., Ferrandiz, S., Kumar, V.A., Harjola, V.-P., Hogan, B., Madsen, B., Mason, S., Öhlén, G., Rainer, T., Rathlev, N., Revue, E., Richardson, D., Sattarian, M., Schull, M.J., 2011. International Perspectives on Emergency Department Crowding. *Acad. Emerg. Med.* 18, 1358–1370.
- Power, D.J., 2002. *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers*. Greenwood Publishing Group., 272 pages.
- Power, D.J., 2008. Decision Support Systems: A Historical Overview, in: *Handbook on Decision Support Systems 1*, International Handbooks Information System. Springer Berlin Heidelberg, pp. 121–140.
- Qin, S.J., 2012. Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis. *Annu. Rev. Control* 36, 220–234.
- Qin, S.J., Dunia, R., 2000. Determining the number of principal components for best reconstruction. *J. Process Control* 10, 245–250.
- Qin, S.J., Valle, S., Piovoso, M.J., 2001. On unifying multiblock analysis with application to decentralized process monitoring. *J. Chemom.* 15, 715–742.
- Quarteroni, A.M., Sacco, R., Saleri, F., 2008. *Méthodes Numériques: Algorithmes, analyse et applications*. Springer Science & Business.
- Quinet, C., 1994. Herbert Simon et la rationalité 9, 133–181.
- Rasmussen, J., 1985. The role of hierarchical knowledge representation in decisionmaking and system management. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* SMC-15, 234–243.
- Reiman, T., tutkimuskeskus, V. teknillinen, 2007. *Assessing Organizational Culture in Complex Sociotechnical Systems: Methodological Evidence from Studies in Nuclear Power Plant Maintenance Organizations*. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Reniers, G.L.L., Ale, B.J.M., Dullaert, W., Foubert, B., 2006. Decision support systems for major accident prevention in the chemical process industry: A developers' survey. *J. Loss Prev. Process Ind.* 19, 604–620.
- Richardson, D., McMahan, K.L.H., 2009. Emergency Department access block occupancy predicts delay to surgery in patients with fractured neck of femur. *Emerg. Med. Australas.* EMA 21, 304–308.
- Rigaud, E., 2011. Resilience and safety management: ideas for innovating in industrial safety.
- Robert, B., Hémond, Y., Yan, G., 2010. L'évaluation de la résilience organisationnelle. *Télescope* 16, 131–153.
- Roberts, S.W., 1959. Control Chart Tests Based on Geometric Moving Averages. *Technometrics* 1, 203–210.
- Rondeau, K.V., Francescutti, L.H., 2005. Emergency department overcrowding: the impact of resource scarcity on physician job satisfaction. *J. Healthc. Manag. Am. Coll. Healthc. Exec.* 50, 327–340; discussion 341–342.
- Rosenthal, U., Boin, A., Comfort, L.K., 2001. *Managing Crises: Threats, Dilemmas, Opportunities*. Charles C Thomas Pub Ltd, Springfield, Ill.
- Rossetti, M.D., Trzcinski, G.F., Syverud, S.A., 1999. Emergency department simulation and determination of optimal attending physician staffing schedules, in: *Simulation Conference*

- Proceedings, 1999 Winter. Presented at the Simulation Conference Proceedings, 1999 Winter, pp. 1532–1540.
- Rotstein, Z., Wilf-Miron, R., Lavi, B., Shahar, A., Gabbay, U., Noy, S., 1997. The dynamics of patient visits to a public hospital ED: a statistical model. *Am. J. Emerg. Med.* 15, 596–599.
- Roy, B., Bouyssou, D., 1993. Aide multicritère à la décision : méthodes et cas. *Collect. Gest. Paris*.
- Runger, G.C., Testik, M.C., 2004. Multivariate Extensions to Cumulative Sum Control Charts. *Qual. Reliab. Eng. Int.* 20, 587–606.
- Ruohonen, T., Neittaanmaki, P., Teittinen, J., 2006. Simulation Model for Improving the Operation of the Emergency Department of Special Health Care, in: *Simulation Conference, 2006. WSC*, pp. 453–458.
- Samaha, S., Armel, W.S., Starks, D.W., 2003. The use of simulation to reduce the length of stay in an emergency department, in: *Simulation Conference Winter*, pp. 1907–1911.
- Shaluf, I., 2007. Disaster types. *Disaster Prev. Manag.* 15, 704–717.
- Shewhart, W.A., 1931. Economic control of quality of manufactured product. D. Van Nostrand Company, Inc., New York, D. Van Nostrand Co.
- Shumway, R.H., Stoffer, D., 2011. Time series analysis and its applications With R Examples, Springer Texts in Statistics. ed. New York.
- Simon, H.A., 1977. *The New Science of Management Decision*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Sprivulis, P.C., Da Silva, J.-A., Jacobs, I.G., Frazer, A.R.L., Jelinek, G.A., 2006. The association between hospital overcrowding and mortality among patients admitted via Western Australian emergency departments. *Med. J. Aust.* 184, 208–212.
- Stork, C.L., Veltkamp, D.J., Kowalski, B.R., 1997. Identification of Multiple Sensor Disturbances during Process Monitoring. *Anal. Chem.* 69, 5031–5036.
- Subbaraj, P., Kannapiran, B., 2010. Artificial Neural Network Approach for Fault Detection in Pneumatic Valve in Cooler Water Spray System. *Int. J. Comput. Appl.* 9, 43–52.
- Sun, Y., Heng, B., Seow, Y., Seow, E., 2009. Forecasting daily attendances at an emergency department to aid resource planning. *BMC Emerg. Med.* 9, 1.
- Taboada, M., Cabrera, E., Epelde, F., Iglesias, M.L., Luque, E., 2013. Using an Agent-based Simulation for Predicting the Effects of Patients Derivation Policies in Emergency Departments. *Procedia Comput. Sci.*, 2013 International Conference on Computational Science 18, 641–650.
- Taboada, M., Cabrera, E., Luque, E., Epelde, F., Iglesias, M.L., 2012. A Decision Support System for Hospital Emergency Departments Designed Using Agent-based Techniques, in: *WSC '12. Winter Simulation Conference, Berlin, Germany*, pp. 359:1–359:2.
- Tahon, C., Trentesaux, D., 2001. Aide à la décision en gestion de production, In *Grabot & Erschler (Ed.)*, *Organisation et gestion de production*, Hermès, Paris.
- Tandberg, D., Qualls, C., 1994. Time series forecasts of emergency department patient volume, length of stay, and acuity. *Ann. Emerg. Med.* 23, 299–306.
- Tanguy, B., 2001. Modélisation de l'essai charpy par l'approche locale de la rupture : application au cas de l'acier 16MND5 dans le domaine de transition. *École Nationale Supérieure des Mines de Paris*.

- Tanguy, B., 2005. Quelle(s) modélisation(s) de l'essai charpy pour une meilleure prédiction de la courbe de résilience, in: Séminaire LMT.
- Tenenhaus, M., 1998. La régression PLS: Théorie et pratique. Editions Technip, Paris.
- Tharrault, Y., 2008. Diagnostic de fonctionnement par analyse en composantes principales : application à une station de traitement des eaux usées. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL.
- Tharrault, Y., Mourot, G., Ragot, J., 2008. Fault detection and isolation with robust principal component analysis, in: 2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation. Presented at the 2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, pp. 59–64.
- Thor, J., Lundberg, J., Ask, J., Olsson, J., Carli, C., Härenstam, K.P., Brommels, M., 2007. Application of statistical process control in healthcare improvement: systematic review. *Qual. Saf. Health Care* 16, 387–399.
- Thorwarth, M., 2011. A Simulation-based Decision Support System to Improve Healthcare Facilities Performance - Elaborated on an Irish Emergency Department. Dublin Institute of Technology, School of Management.
- Thorwarth, M., Arisha, A., Harper, P., 2009. Simulation Model to Investigate Flexible Workload Management for Healthcare and Servicescape Environment, in: Winter Simulation Conference, Austin, Texas, USA, pp. 1946–1956.
- Tierney, K., Bruneau, M., 2007. Conceptualizing and Measuring Resilience A Key to Disaster Loss Reduction. *TR News* 1–5.
- Trachsler, D., 2009. La résilience : un concept pour la gestion des catastrophes et crises (No. 60). Center for Security Studies (CSS), ETH Zurich.
- Tressol, M., 2008. Etude de la canicule européenne de 2003 avec les données aéroportées MOZAIC : pollution et transport (phd). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Turban, E., Aronson, J.E., Liang, T.-P., 2004. *Decision Support Systems and Intelligent Systems* (7th Edition). Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- Vanderhaegen, F., 2003. *Analyse et contrôle de l'erreur humaine*, Hermès Science Publication, Lavoisier. Paris, France. ed.
- Vatan, K., Zare, N., Alinekhad, 2013. Modeling and Forecasting the Cardio-Respiratory and Toxicity Events in Shiraz Emergency Medical Center Using Time Series Analysis. *Switz. Res. Park J.* 102, 1017–1023.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Kavuri, S.N., Yin, K., 2003. A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods. *Comput. Chem. Eng.* 27, 327–346.
- Vogus, T.J., Sutcliffe, K.M., 2007. Organizational resilience: Towards a theory and research agenda, in: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, ISIC*, pp. 3418–3422.
- Volle, M., 2005. La place de l'aide à la décision dans le système d'information. *Rev. Modul.* 57–69.
- Walker, B., Carpenter, S., Anderies, J., Abel, N., Cumming, G., Janssen, M., Lebel, L., Norberg, J., Peterson, J., Pritchard, R., 2002. Resilience Management in Social-ecological Systems: a Working Hypothesis for a Participatory Approach. *Conserv. Ecol.* 6, 14.
- Weckel, B., 2010. Décider face à la complexité et l'urgence. (*Techniques de l'ingénieur*. No. AG 1 572).
- Weiss, S.J., Derlet, R., Arndahl, J., Ernst, A.A., Richards, J., Fernández-Frackelton, M., Schwab, R., Stair, T.O., Vicellio, P., Levy, D., Brautigan, M., Johnson, A., Nick, T.G., Fernández-

- Frankelton, M., 2004. Estimating the degree of emergency department overcrowding in academic medical centers: results of the National ED Overcrowding Study (NEDOCS). *Acad. Emerg. Med. Off. J. Soc. Acad. Emerg. Med.* 11, 38–50.
- Weiss, S.J., Ernst, A.A., Nick, T.G., 2006. Comparison of the National Emergency Department Overcrowding Scale and the Emergency Department Work Index for quantifying emergency department crowding. *Acad. Emerg. Med. Off. J. Soc. Acad. Emerg. Med.* 13, 513–518.
- Wei, W.W.S., 2006. *Time series analysis: univariate and multivariate methods*. Pearson Addison Wesley., 614 pages.
- Westrum, R., 2006. A Typology of Resilience Situations, in: Hollnagel, E., Woods, D., Leveson, N. (Eds.), *Resilience Engineering: Concepts And Precepts*. Ashgate Publishing, pp. 55–65.
- Wieser, P., 2005. Modélisation et réingénierie des systèmes hospitaliers HUG-DUMC (Urgences), in *Gestion Hospitalière (stratégie, management hospitalier et gestion du changement)*, numéro spécial, 2005
- Windhorst, U., Johansson, H., 1999. *Modern techniques in neuroscience research*, 1<sup>st</sup>. ed. Springer, New York.
- Woodall, W.H., Adams, B.M., 1993. The Statistical Design of Cusum Charts. *Qual. Eng.* 5, 559–570.
- Woods, D., 2006. Essential characteristics of resilience, in: *Resilience Engineering : Concepts and Precepts*, E. hollnagel, D.D. woods and N. leveson (eds.), Aldershot, UK Ashgate, pp. 21–33.
- Yamashita, J., Shigemura, J., 2013. The Great East Japan Earthquake, Tsunami, and Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: A Triple Disaster Affecting the Mental Health of the Country. *Psychiatr. Clin. North Am.* 36, 351–370.
- Yeh, J.-Y., Lin, W.-S., 2007. Using simulation technique and genetic algorithm to improve the quality care of a hospital emergency department. *Expert Syst. Appl.* 32, 1073–1083.
- Yue, H., Qin, S.J., 2001. Reconstruction-based fault identification using a combined index. *Ind. Eng. Chem. Res.* 40, 4403–4414.
- Zemouri, R., 2003. *Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance*. Université de Franche-Comté.
- Zeng, Z., Ma, X., Hu, Y., Li, J., Bryant, D., 2012. A simulation study to improve quality of care in the emergency department of a community hospital. *J. Emerg. Nurs. JEN Off. Publ. Emerg. Dep. Nurses Assoc.* 38, 322–328.
- Zieba, S., 2009. *Contribution à la résilience d'un système coopérative Homme-robot par une gestion de l'autonomie ajustable*. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- Zobel, C.W., 2011. Representing Perceived Tradeoffs in Defining Disaster Resilience. *Decis Support Syst* 50, 394–403.

# **ANNEXES**

## Table de Matières Annexes

<b>Annexe A : Analyse par séries chronologiques .....</b>	<b>179</b>
1. Généralités sur les séries chronologiques .....	179
1.1. Définition .....	179
1.2. Application aux systèmes hospitaliers .....	180
2. Les modèles de prévision univariés .....	181
2.1. Prévision par lissage exponentiel .....	181
2.1.1. Lissage exponentiel Simple (LES, série sans tendance, sans saisonnalité) .....	182
2.1.2. Lissage exponentiel double (LED: série avec tendance, sans saisonnalité).....	182
2.1.3. La méthode de Holt-Winters (Série avec tendance et saisonnalité).....	183
2.2. Modélisation des séries stationnaires - Modèles de prévision univariés .....	184
2.2.1. Les processus autorégressifs, AR(p).....	184
2.2.2. Les processus en moyenne mobile MA(q) .....	185
2.2.3. Les processus ARMA(p,q) .....	185
2.2.4. Modèle SARIMA .....	185
2.2.5. Détermination et élimination de la tendance et de la saisonnalité .....	185
2.2.6. Estimation et détermination des ordres du modèle .....	186
2.2.7. Validation du modèle .....	187
a) Capacité de prédiction d'un modèle .....	187
b) Analyse des résidus .....	187
<b>Annexe B : Contrôle statistique des procédés .....</b>	<b>188</b>
1. Contrôle statistique des procédés univariés .....	188
1.1. Définition et caractérisation de la carte de contrôle .....	188
1.2. Carte de contrôle Shewhart .....	189
1.3. Carte CUSUM (Cumulative Sum charte).....	189
1.4. Carte EWMA .....	190
2. Contrôle statistique des procédés multivariés : cartes de contrôle multivariées .....	191
2.1. Carte $T^2$ de Hotelling .....	191
2.2. Carte MEWMA.....	192
2.3. Carte MCUSUM .....	193
<b>Annexe C : Analyse en composante principale .....</b>	<b>194</b>
1. Modélisation par l'analyse en composante principale (ACP).....	194
2. Nombre de composantes principales utilisables.....	195
3. Les métriques de surveillance basée sur l'ACP .....	196
3.1. La statistique $T^2$ .....	196
3.2. La statistique $Q$ .....	197

<b>Annexe D : Analyse des données du SUP du CHRU de Lille .....</b>	<b>199</b>
1. <b>Introduction .....</b>	<b>199</b>
2. <b>Age et sexe des patients .....</b>	<b>199</b>
2.1. Répartition des patients par sexe et âge .....	199
2.2. Répartition des âges des patients (âge en mois) .....	199
3. <b>Les arrivées des patients au SUP.....</b>	<b>200</b>
3.1. Mode d'arrivée.....	200
3.2. Nombre d'arrivées au SUP de CHRU de Lille.....	201
3.2.1. Nombre d'arrivées journalières .....	201
3.2.2. Nombre d'arrivées journalières de la semaine.....	201
3.2.3. Nombre d'arrivées par heure .....	202
4. <b>Groupes d'Etude Multicentrique des Services d'Accueil (GEMSA).....</b>	<b>202</b>
5. <b>La classification clinique des malades aux urgences (CCMU) .....</b>	<b>204</b>
6. <b>Examens complémentaires.....</b>	<b>205</b>
7. <b>Orientation après passage au SUP .....</b>	<b>205</b>
<b>Annexe E : Scénarios expérimentés dans le pilotage réactif .....</b>	<b>206</b>
1. <b>Alternative A : actions de correction avec temps de lancement TL= 0 .....</b>	<b>206</b>
2. <b>Alternative B : actions de correction avec temps de lancement TL= 60 minutes .....</b>	<b>208</b>
3. <b>Alternative C : temps de lancement des actions de correction, TL= 90 minutes.....</b>	<b>209</b>
<b>Annexe F : Questionnaires .....</b>	<b>211</b>
1. <b>Questionnaire concernant les indicateurs de tension .....</b>	<b>211</b>
2. <b>Questionnaire concernant les situations de tension.....</b>	<b>214</b>
3. <b>Questionnaire concernant les patients.....</b>	<b>215</b>

## **Table des Figures Annexes**

Figure A-1 : Exemple de séries chronologiques.....	181
Figure A-2 : Modélisation des séries chronologiques en utilisant la procédure de Box et Jenkins (Box and Jenkins, 1976; Makridakis et al., 1998) .....	186
Figure B-1 : Caractéristiques d'une carte de contrôle .....	188
Figure B-2 : Processus de production multivarié.....	192
Figure C-1 : Réduction de dimension par l'ACP.....	195
Figure C-2 : Décomposition de X variables en sous espaces processus et bruit. ....	196
Figure D-1 : Fonction de répartition des âges des patients (âge en mois).....	200
Figure D-2 : Nombre d'arrivée par jour au SUP de CHRU-Lille (Janv-Déc 2012).....	201
Figure D-3 : Répartition horaire des arrivées au SUP selon les jours de la semaine.....	203



## Table des Tableaux Annexes

Table B-1 : Les principales caractéristiques des trois cartes de contrôle.....	191
Table C-1 : Algorithme de détection d'anomalies basé sur les cartes de contrôle mutlivariées et l'analyse en composantes principales (ACP) .....	198
Table D-1 : Pourcentage des moyens d'arrivées au SUP.....	200
Table D-2 : Nombre moyen d'arrivées par jour de la semaine .....	202
Table D-3 : Résumé de l'analyse statistique par jour de la semaine.....	202
Table D-4 : Classification GEMSA .....	203
Table D-5 : Répartition des effectifs selon les six groupes pour l'année 2012.....	204
Table D-6 : Classification CCMU des données 2012. ....	204
Table D-7 : Répartition des patients selon les examens complémentaires .....	205
Table D-8 : Orientation après le SUP. ....	205
Table E-1 : Actions de correction dans le cas de l'alternative A. ....	206
Table E-2 : Résultats des actions de correction dans le cas de l'alternative A .....	207
Table E-3 : Actions de correction dans le cas de l'alternative B.. ....	208
Table E-4 : Résultats des actions de correction dans le cas de l'alternative A. ....	209
Table E-5 : Actions de correction dans le cas de l'alternative C .....	210
Table E-6 : Résultats des actions de correction dans le cas de l'alternative C. ....	211

# Annexe A : Analyse par séries chronologiques

## 1. Généralités sur les séries chronologiques

### 1.1. Définition

Une série chronologique est une séquence de mesures indexées dans le temps sur la même unité d'observation à de multiples instants. L'étude d'une série chronologique permet d'analyser, de décrire et d'expliquer un phénomène au cours du temps et d'en tirer des conséquences pour des prises de décision. L'analyse des séries chronologiques a deux objectifs principaux :

1. identifier la nature du phénomène représenté par la séquence d'observations,
2. prévoir les valeurs futures de la série chronologique à partir de ses valeurs observées.

Une série chronologique ( $y_t$ ) résulte de différentes composantes fondamentales :

- 1) la tendance ou trend, représente l'évolution à long terme de la série,
- 2) la saisonnalité (composante saisonnière), qui réapparaît à intervalles réguliers, correspond à un phénomène qui se répète périodiquement,
- 3) composante résiduelle (bruit ou résidu) : elle correspond à des fluctuations irrégulières de faible intensité et apparaissant de manière aléatoire. Cet effet, que l'on suppose en général dû au hasard, se manifeste par des variations accidentelles,
- 4) phénomènes accidentels : conditions météorologiques, grèves, vacances, etc. En général, cette composante est intégrée dans la composante résiduelle.

Les observations des séries chronologiques peuvent être exprimées selon deux types de modèles :

#### 1) Les modèles déterministes

Ces modèles relèvent de la statistique descriptive. Ils ne font intervenir que de manière sous-jacente le calcul des probabilités et consistent à supposer que l'observation de la série à la date  $t$  est une fonction du temps  $t$  et d'une variable  $\varepsilon_t$ , faisant office d'erreur au modèle et représentant la différence entre la réalité et le modèle proposé :

$$y_t = f(t, \varepsilon_t) \quad (\text{A.1})$$

Les deux modèles déterministes les plus utilisés sont le modèle additif et le modèle multiplicatif décrits ci-dessous.

#### a) Le modèle additif

C'est le modèle classique de décomposition dans le traitement des modèles d'ajustement. La variable  $y_t$  s'écrit comme la somme de trois termes :

$$y_t = Z_t + S_t + \varepsilon_t \quad (\text{A.2})$$

Où :  $Z_t$  représente la tendance (déterministe),  $S_t$  la saisonnalité (également déterministe) et  $\varepsilon_t$  l'erreur au modèle aléatoire indépendante et identiquement distribuée (iid).

### b) Le modèle multiplicatif

La variable  $y_t$  s'écrit, au terme d'erreur près, comme le produit de la tendance et d'une composante de saisonnalité :

$$y_t = Z_t(1 + S_t)(1 + \varepsilon_t) \quad (\text{A.3})$$

L'ajustement est ici multiplicatif. Avant toute modélisation et étude approfondie du modèle, on tente d'abord de déterminer si on est en présence d'une série dans laquelle pour une observation donnée :

- 1) la variation saisonnière  $S$  s'ajoute simplement à la tendance  $Z$ ; c'est le modèle additif,
- 2) la variation saisonnière  $S$  est proportionnelle à la tendance  $Z$ ; c'est le modèle multiplicatif.

### 2) Les modèles stochastiques

Ils sont du même type que les modèles déterministes mais les variables de bruit  $\varepsilon_t$  ne sont pas indépendantes et identiquement distribuées. Elles possèdent une structure de corrélation non nulle :  $\varepsilon_t$  est une fonction des valeurs passées (plus au moins lointaines suivant le modèle) et d'un terme d'erreur. La classe des modèles de ce type la plus utilisée est la classe des modèles autorégressifs (AR), à moyenne mobile (MA), une conjugaison deux, modèle ARMA, et ses variantes ARIMA et SARIMA décrits dans la suite de l'annexe.

## 1.2. Application aux systèmes hospitaliers

Les arrivées de patients aux urgences hospitalières sont définies comme un schéma temporel. Le nombre d'arrivées aux urgences varie considérablement selon l'heure de la journée, le jour de la semaine, la semaine du mois et le mois de l'année (période normale et période épidémiques). Pour faire face à ces admissions parfois massives, les gestionnaires de ces établissements ont besoin d'une estimation fiable des futures admissions en fonction des données déjà enregistrées. La figure A-1 représente les différents types de séries chronologiques extraites de la base de données du service d'urgence pédiatrique (SUP) du CHRU de Lille. On représente en général les séries sur des graphiques de valeurs (ordonnées) en fonction du temps (abscisses).

Lorsqu'une série est stable autour de sa moyenne, on parle de série stationnaire (figure 1.a). Inversement, on trouve aussi des séries non stationnaires. Lorsqu'une série croît sur l'ensemble de l'échantillon, on parle de tendance (figure 1.b). Enfin lorsqu'on observe des phénomènes qui se reproduisent à des périodes régulières, on parle de phénomène saisonnier (figure A-1.c).

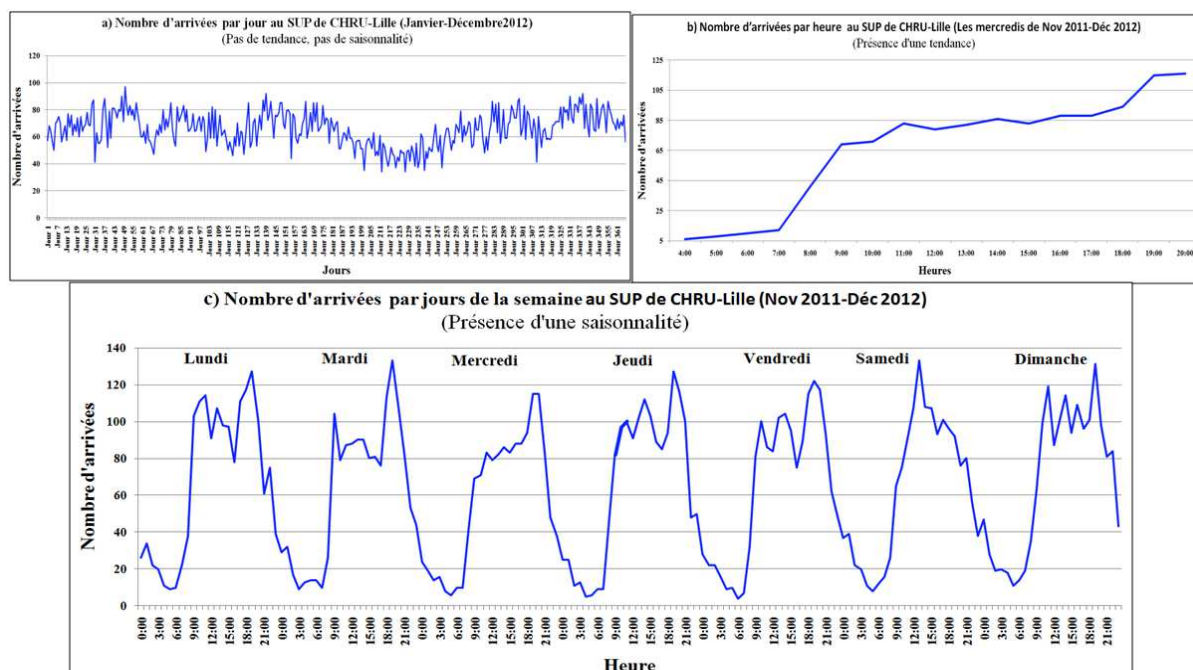


Figure A-1 : Exemple de séries chronologiques.

La modélisation et la prévision des admissions quotidiennes aux urgences hospitalières fournissent des informations utiles qui peuvent être utilisées dans l'allocation et la planification des ressources. La prévision permet aussi l'amélioration de l'efficacité des services d'urgence en réduisant le nombre de patients dans les files d'attente et en augmentant le nombre de passages. La prévision efficace des flux de patients aux urgences hospitalières aide ainsi les gestionnaires de ces établissements dans la planification de leurs activités. Par exemple, l'organisation du personnel soignant (i.e. emploi du temps), l'allocation efficace des ressources nécessaires pour fournir un service de qualité, prévoir une capacité d'hospitalisation suffisante en aval pour absorber le flux de patients occasionnel.

## 2. Les modèles de prévision univariés

Les méthodes les plus utilisées pour la modélisation et la prévision des séries chronologiques univariées sont les méthodes de lissage exponentiel et les modèles ARMA de Box and Jenkins (Box and Jenkins, 1976).

### 2.1. Prévision par lissage exponentiel

Introduites par Holt en 1958 ainsi que par Winters en 1960, les méthodes de lissage constituent l'ensemble des techniques empiriques de prévision qui accordent plus ou moins d'importance aux valeurs passées d'une série chronologique. Les méthodes de lissage exponentiel permettent de prolonger une série chronologique en vue de prévisions à court terme.

On distingue trois techniques de prévision par lissage exponentiel :

- 1) le lissage exponentiel simple (LES) qui consiste à ajuster localement à la série temporelle une constante,
- 2) le lissage exponentiel double ou Holt (LED) qui consiste à ajuster à la série temporelle une droite,
- 3) le lissage de Holt-Winters qui considère des fonctions plus complexes (polynomiales, périodiques,...).

### 2.1.1. Lissage exponentiel Simple (LES, série sans tendance, sans saisonnalité)

Le lissage exponentiel simple permet d'effectuer des prévisions pour des séries chronologiques sans tendance et sans saisonnalité. Le principe consiste à donner plus d'importance aux dernières observations. On ne prolonge pas une série comme on le ferait avec une régression simple mais on cherche à obtenir une valeur lissée à l'instant  $t$  pour la reporter tout simplement en  $t+1$ .

Si on dispose de  $n$  observations ( $X_1, \dots, X_n$ ), et on souhaite prévoir, à la date ( $T = 1, \dots, n$ ), la valeur de la série à un horizon 1, ou à un horizon quelconque  $h$ . La prévision  $\hat{y}_T(h)$  fournie par lissage exponentiel simple est de la forme :

$$\hat{y}_T(h) = \alpha \sum_{j=0}^{T-1} (1 - \alpha)^j \hat{y}_{T-1} \quad (\text{A.4})$$

La constante de lissage ( $0 < \alpha < 1$ ), s'applique à la dernière réalisation, le coefficient  $(1 - \alpha)$  s'applique à la prévision précédente qui ne s'est probablement pas réalisée. La prévision est définie comme étant une moyenne de toutes les observations passées, pondérée de sorte que plus l'observation ancienne moins elle a d'importance.

Quand la constante de lissage  $\alpha$  est proche de 0 ( $\alpha \leq 0,3$ ), on donne une importance significative aux observations éloignées, tandis qu'un  $\alpha$  proche de 1 ( $\alpha \geq 0,7$ ) tend à négliger ces observations éloignées.

Le lissage exponentiel simple peut être exprimé par la méthode adaptative de mise à jour (ordre 1) comme suit :

$$\hat{y} = \alpha y_t + (1 - \alpha) y_{t-1} \quad (\text{A.5})$$

En raison de la formule récurrente, il est nécessaire de choisir une valeur à partir de laquelle les prévisions seront effectuées. Cette valeur n'a que peu d'importance si la série est longue. Le choix de la constante de lissage peut relever de considérations empiriques : des fortes pondérations pour les valeurs récentes ( $\alpha$  élevé) donnent de meilleures prévisions à court terme qu'à long terme.

### 2.1.2. Lissage exponentiel double (LED: série avec tendance, sans saisonnalité)

Le lissage exponentiel simple (LES) permet d'établir une prévision à  $t+1$  lorsqu'il n'existe pas de tendance. Lorsqu'on souhaite établir une prévision par lissage sur une série avec tendance, on doit alors établir les paramètres d'une tendance linéaire  $y = a + bt$ . Graphiquement, l'extrapolation n'est plus horizontale mais poursuit une tendance. Le principe de lissage exponentiel double permet de faire un ajustement par une droite :

$$y_t = a + (t - T)b \quad (\text{A.6})$$

Selon le principe du lissage exponentiel, les dernières valeurs ont un poids plus important que les plus anciennes. La fonction de prévision est ainsi recalculée pour chaque observation supplémentaire. On dit qu'elle est localement linéaire. La prévision à l'horizon  $h$  s'écrit :

$$\hat{y}_t(h) = a_t + b_t h \quad (\text{A.7})$$

Les coefficients  $a_j$  et  $b_j$  sont donnés par :

$$\begin{cases} a_j = 2\hat{y}_j^1 - \hat{y}_j^2 \\ b_j = \frac{\alpha}{1-\alpha}(\hat{y}_j^1 - \hat{y}_j^2) \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

Avec  $\hat{y}_j^1$  et  $\hat{y}_j^2$  sont obtenus récursivement par deux lissages consécutifs :

$$\begin{cases} \hat{y}_j^1 = \alpha y_j + (1 - \alpha)\hat{y}_{j-1}^1 \\ \hat{y}_j^2 = \alpha y_j + (1 - \alpha)\hat{y}_{j-1}^2 \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

### 2.1.3. La méthode de Holt-Winters (Série avec tendance et saisonnalité)

#### a) Méthode de Holt-Winters non saisonnière :

Tout comme le LED, le lissage de Holt-Winters sans saisonnalité permet d'établir une fonction de prévision linéaire. Cette méthode nous permet d'estimer au voisinage de l'instant  $T$  une droite. Pour un horizon  $h$  on utilise :

$$\hat{y}_t(h) = a_t + b_t h \quad (\text{A.10})$$

où :

–  $a_t$  est le niveau de la tendance, c'est une moyenne pondérée entre deux estimations de la constante à l'origine : d'une part celle qui est issue de la dernière observation, d'autre part celle qui a été prévue. Le premier paramètre à choisir,  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) est donc celui qui va pondérer les deux niveaux  $t$  et  $t-1$ .

–  $b_t$  est la pente de la tendance, c'est une moyenne pondérée entre deux estimations. On détermine un coefficient,  $\beta$  ( $0 < \beta < 1$ ), et on applique cette pondération à la dernière estimation de pente observée, c'est-à-dire à la différence des deux niveaux en  $t$  et  $t-1$ . Il nous reste  $(1 - \beta)$  de pondération à appliquer à notre précédente estimation de pente.  $a_t$  et  $b_t$  sont donnés par les formule suivante :

$$\begin{cases} a_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t = \beta(b_t - b_{t-1}) + (1 - \beta)a_{t-1} \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

#### b) Méthode de Holt-Winters saisonnière :

Le lissage de Holt-Winters saisonnière présente l'avantage d'intégrer la saisonnalité, au contraire du lissage simple (LES), du lissage double (LED) et de celui de Holt-Winters non saisonnier qui sont des méthodes extrapolatives de séries désaisonnalisées. Outre les deux constantes utilisées dans la méthode de Holt-Winters sans saisonnalité, on ajoute une

troisième constante de lissage : le coefficient saisonnier  $\gamma$ . Une saisonnalité existant, deux types de schémas de composition sont possibles :

*b.1) Méthode saisonnière additive :*

La présentation de Holt-Winter sur schéma additif d'une série avec tendance et saisonnalité ( $S$ ), d'ordre  $s$  peut être approchée au voisinage de  $T$  par la série suivante :

$$\hat{y}_t(h) = a_t + b_t h + S_t \quad (\text{A.12})$$

Avec  $S_t$  est un facteur saisonnier. Les formules de mise à jour s'écrivent de la façon suivante, où  $s$  est le facteur de saisonnalité (exemple :  $s = 4$  pour des données trimestrielles ou  $s = 12$  pour des données mensuelles).

$$\begin{cases} a_t = \alpha(y_t - S_{t-s}) + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}), \text{lissage de la tendance} \\ b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + b_{t-1}(1 - \beta), \text{lissage de la moyenne} \\ S_t = \gamma(y_t - a_t) + S_{t-s}(1 - \gamma), \text{lissage de la saisonnalité} \end{cases} \quad (\text{A.13})$$

La prévision à l'horizon  $h$  ( $1 < h < s$ ) s'écrit :

$$\hat{y}_t(h) = \hat{a}_t + \hat{b}_t h + \hat{S}_{t+h-s} \quad (\text{A.14})$$

*b.2) Méthode saisonnière multiplicative :*

Le modèle de Holt-Winter sur schéma multiplicatif est la suivante :

$$\hat{y}_t(h) = (a_t + b_t) \times S_t \quad (\text{A.15})$$

Les formules de lissage de Holt-Winter sur schéma multiplicatif s'écrivent de la manière suivante :

$$\begin{cases} a_t = \alpha \left( \frac{y_t}{S_{t-s}} \right) + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \\ S_t = \gamma \left( \frac{y_t}{a_t} \right) + (1 - \gamma)S_{t-s} \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

La prévision à l'horizon  $h$  ( $1 < h < s$ ) s'écrit :

$$\hat{y}_t(h) = (\hat{a}_t + \hat{b}_t h) \times \hat{S}_{t+h-s} \quad (\text{A.17})$$

## 2.2. Modélisation des séries stationnaires - Modèles de prévision univariés

Les trois modèles de séries chronologiques univariés largement utilisés dans la littérature pour modéliser différents phénomènes sont le processus autorégressif (AR), le processus de moyenne mobile (MA), et le modèle ARMA (autorégressif et moyenne mobile) qui mixte les deux processus.

### 2.2.1. Les processus autorégressifs, AR(p)

Les processus autorégressifs construits à partir de l'idée que l'observation à l'instant  $t$  s'explique linéairement par les observations précédentes. Le modèle AR est intuitivement intéressant car il décrit comment une observation dépend directement d'une ou plusieurs

mesures précédentes et d'un bruit blanc. On dit que  $(Y_t)$  est un processus autorégressif centré d'ordre  $p$  s'il s'écrit :

$$Y_t = \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (\text{A.18})$$

$a_i$  est un paramètre non saisonnier, et  $\varepsilon_t$  est un bruit blanc  $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$ .

### 2.2.2. Les processus en moyenne mobile MA(q)

La seconde catégorie de modèles regroupe les processus en moyenne mobile. Le modèle de moyenne mobile MA(q) est une fonction linéaire où les valeurs de la série  $(Y_t)$  s'expriment par la combinaison linéaire de l'erreur aléatoire qui a entaché les  $q$  essais précédents. Le modèle moyenne mobile (Moving Average) d'ordre  $q$  répond à l'équation :

$$Y_t = \varepsilon_t + \sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j} \quad (\text{A.19})$$

où  $b_j$  est un paramètre non saisonnier du modèle MA(q).

### 2.2.3. Les processus ARMA(p,q)

Le modèle mixte ou ARMA(p,q) définit des processus sous la forme d'une récurrence autorégressive avec un second membre de type moyenne mobile. Le modèle ARMA a été proposé initialement par Box et Jenkins (Box and Jenkins, 1976). Un processus autorégressif moyenne mobile d'ordres  $p$  et  $q$ , ARMA(p,q), est de la forme :

$$Y_t = \sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t \quad (\text{A.20})$$

Dans l'analyse des séries chronologiques, l'opérateur de retard  $B$  définit comme  $(B^k Y_t = Y_{t-k})$ , opère sur les éléments de la série pour produire les éléments précédents. En utilisant l'opérateur de retard  $B$ , nous pouvons définir l'équation (3) comme suit :

$$\begin{aligned} \phi(B)Y_t &= \theta(B)\varepsilon_t, \\ \phi(B) &= (1 - a_1 B - a_2 B^2 - \dots - a_p B^p) \\ \theta(B) &= (1 - b_q B - b_q B^2 - \dots - b_q B^q) \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

où  $\phi(B)$  est le polynôme de degré  $p$  de coefficients du processus autorégressif AR(p), et  $\theta(B)$  est le polynôme de degré  $q$  de coefficients du processus en moyenne mobile MA(q).

### 2.2.4. Modèle SARIMA

Le modèle SARIMA Le modèle SARIMA (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average) est une extension du modèle ARIMA pour inclure la saisonnalité. La méthode de Box et Jenkins permet de déterminer les paramètres du modèle SARIMA pouvant convenir à une série chronologique selon ses caractéristiques (Box and Jenkins, 1976; Makridakis et al., 1998). Les principales étapes nécessaires pour construire et valider un modèle de type SARIMA sont schématiquement résumées dans la figure A-2.

### 2.2.5. Détermination et élimination de la tendance et de la saisonnalité

L'identification de la structure d'une série temporelle débute par l'observation de sa stationnarité. La non-stationnarité de la série temporelle est visible sur la tendance de la série (augmentation ou la diminution de la tendance) et à travers des modèles de la fonction



d'auto-corrélation (ACF) de la série. Box et Jenkins (1976) proposent, afin de rendre une série stationnaire, d'appliquer un terme de différenciation, c'est à dire de remplacer la série originale par la série des différences des points adjacents.

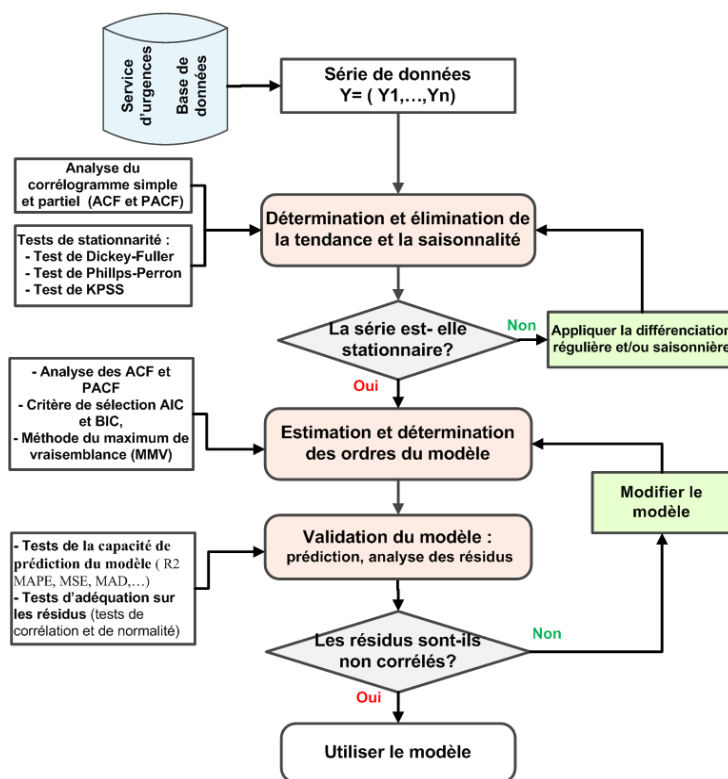


Figure A-2 : Modélisation des séries chronologiques en utilisant la procédure de Box et Jenkins (Box and Jenkins, 1976; Makridakis et al., 1998).

Si la série est stationnaire après l'application de la différenciation la fonction d'auto-corrélations de la série différenciée ne présente que quelques pics significatifs, encore appelés auto-corrélations résiduelles, si nécessaire, la différenciation est répétée. Lorsque la série originale est stationnaire alors l'ordre du terme de différenciation dans le modèle finale est de 0, lorsqu'une différenciation est nécessaire à l'obtention de la stationnarité l'ordre du terme de différenciation dans le modèle finale est de 1, et ainsi de suite.

Il convient d'effectuer un test permettant de détecter l'existence d'une saisonnalité avant d'effectuer une correction de variations saisonnières. Le test le plus communément utilisé est celui de Fisher par analyse de la variance du facteur mensuel (ou trimestriel) par rapport à la variance totale. La dessaisonnalisation d'une série temporelle consiste à estimer sa composante saisonnière  $S_t$  et à l'extraire de la série brute  $(y_t)$ . On obtient ainsi une série corrigée des variations saisonnières (CVS).

#### 2.2.6. Estimation et détermination des ordres du modèle

Une fois la stationnarité d'une série observée, l'analyse se centre sur la détermination des ordres des termes d'auto-régression et de moyenne mobile à l'aide des fonctions d'auto-corrélations (ACF) et des fonctions d'auto-corrélations partielles (PACF). L'ordre du terme autorégressif  $AR(p)$  présent dans le modèle final est égale à  $p$ . Il correspondant au

nombre de pics significatifs dans la fonction d'auto-corrélation partielle (PACF). L'ordre du terme du processus de moyenne mobile dans le modèle final est égal à  $q$ . C'est le nombre de pics significatifs dans la fonction d'auto-corrélation (ACF). Les paramètres autorégressifs (AR) et moyenne mobiles (MA) peuvent être estimés en utilisant une méthode d'estimation non-linéaire du maximum de vraisemblance (MMV).

Plusieurs logiciels informatiques implémentent ces méthodes d'estimation d'un modèle ARIMA (Eviews, SPSS, DEMETRA, STATA, SAS, R, Matlab, etc.) notamment les méthodes du Maximum de Vraisemblance.

### 2.2.7. Validation du modèle

#### a) Capacité de prédiction d'un modèle

Il est rare que l'on réussisse à prédire exactement la demande. On désigne par erreur de prévision la différence entre la demande prévue et la demande réelle. Le calcul de l'erreur moyenne faite par un modèle prévisionnel nous donne une mesure de l'exactitude avec laquelle ce modèle adhère au patron des données historiques.

Généralement, afin d'évaluer les modèles, les données de la série sont divisées en deux parties complémentaires : une première partie des données (données d'apprentissage) est utilisée pour construire le modèle. La seconde partie (données d'essais) est utilisée pour valider le modèle final. La validation du modèle final fait référence à plusieurs tests statistiques pour vérifier la validité du modèle.

Pour évaluer la capacité prédictive de modèle, il existe plusieurs approches pour évaluer la capacité de prédiction d'un modèle (Makridakis et al., 1998; Mayer and Butler, 1993), y compris l'erreur absolue moyenne en pourcentage ou le pourcentage d'erreur absolue moyen (Mean Absolute Percentage Error : MAPE), le coefficient de détermination ou  $R^2$ , Erreur Quadratique moyenne (EQM), la moyenne du carré des d'erreurs (Mean Square Error : MSE), et la déviation absolue moyenne (Mean Absolute Deviation : MAD), le critère d'information d'Akaike (AIC), et le critère d'information bayésien (BIC).

#### b) Analyse des résidus

L'analyse des résidus est l'étape la plus importante dans la validation du modèle. Elle consiste à évaluer la distribution des résidus. Plusieurs tests statistiques (tests de Lilliefors, Jarque-Bera, ...) et les graphes des résidus (histogramme, la droite de Henry, la Probabilité-Probabilistes ou "PP plot", et le quantile-quantile ou "QQ plot", ...) peuvent être utilisés pour examiner la qualité de l'ajustement du modèle choisi pour les données de la série ajustée. Les résidus d'un bon modèle présentent diverses propriétés : normalité, linéarité, homoscedasticité, et indépendance.

## Annexe B : Contrôle statistique des procédés

### 1. Contrôle statistique des procédés univariés

#### 1.1. Définition et caractérisation de la carte de contrôle

Plusieurs définitions de la carte de contrôle sont proposées dans la littérature. Shewhart (1931) a estimé qu'une carte de contrôle peut servir, d'une part, pour définir l'objectif à atteindre par le processus de production et d'autre part, pour juger si l'objectif de production a été atteint. Duncan (1956) a considéré les cartes de contrôle comme des outils statistiques qui se base sur la notion de test d'hypothèse. Feigenbaum (1983) a défini la carte de contrôle comme un outil graphique pour la comparaison des caractéristiques du produit actuel avec celles de son passé. Selon Mnassri, (2012) une carte de contrôle constitue à la fois un outil statistique et graphique, qui permet de suivre dans le temps l'évolution des valeurs individuelles d'une variable d'un processus de production, ou de la moyenne d'un échantillon prélevé régulièrement, et de décider du temps d'intervention pour modifier ou arrêter une évolution non désirée.

En général, à intervalles réguliers, on prélève dans le processus de production des échantillons de taille fixe. Au fur et à mesure qu'elle se remplit, la carte de contrôle permet la visualisation de l'évolution du processus. Si un point se trouve à l'extérieur de lignes prédéfinies (limites de contrôle), on considère que le processus est hors contrôle et qu'une action corrective doit être menée. Chaque carte de contrôle comporte :

- deux limites : une limite de contrôle inférieure (LCI) et une limite de contrôle supérieure (LCS),
- la valeur cible (droite centrale) de la variable à surveiller (figure B-1).

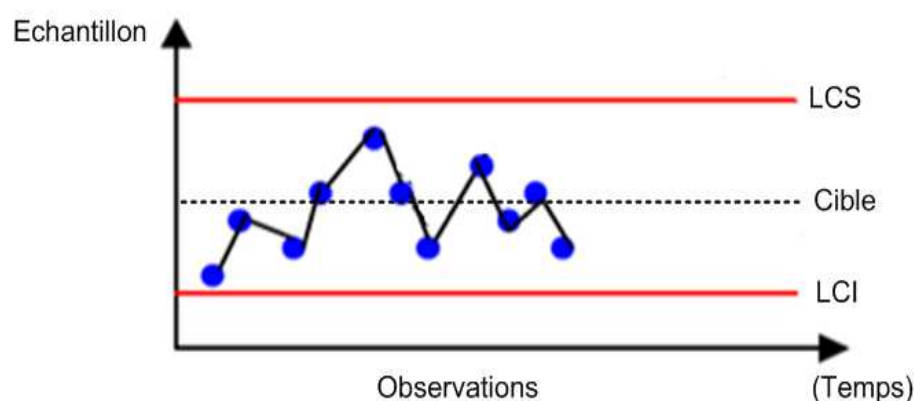


Figure B-1 : Caractéristiques d'une carte de contrôle.

## 1.2. Carte de contrôle Shewhart

La première carte de contrôle utilisée est la carte de Shewhart (Shewhart, 1931). Elle a été conçue pour visualiser l'évolution de la moyenne d'un processus. La méthode de Shewhart est l'une des plus simples pour la surveillance des anomalies dans le processus de production. Les limites de contrôle sont choisies habituellement à  $\pm k\sigma_0$  par rapport à la moyenne des données historiques ou la cible ( $\mu_0$ ) comme suit (voir tableau B-1) :

$$LCI, LCS = \mu_0 \pm k\sigma_0 \quad (\text{B.1})$$

où  $\sigma_0$  est l'écart-type et  $k$  la variable d'écart (souvent choisie égale à trois écarts-types). Les cartes de Shewhart s'attachent aux variables quantitatives (mesurables). Ces cartes utilisent à chaque instant  $t$  les seules mesures relatives à  $t$ . Elles détectent uniquement les grands écarts de variation du processus. Par conséquent, elles ne sont pas satisfaisantes lorsque les changements dans l'évolution des caractéristiques représentatives d'un processus sont de faibles amplitudes.

Outre un problème de détection de faibles variations dans le processus à surveiller, un des principaux inconvénients des cartes de type Shewhart est que le test utilisé ne s'appuie que sur les dernières informations recueillies. Elle ne prend pas ainsi les informations relatives aux tendances du processus contenues dans les dernières estimations. Ces lacunes motivent l'utilisation d'autres alternatives, telles que les cartes de contrôle EWMA et CUSUM, mieux adaptées à la détection de faibles changements des variables du processus. Ces cartes permettent l'accumulation de l'information dans le temps en utilisant les observations à l'instant  $t$  et l'ensemble ou une partie des observations à des instants antérieurs à  $t$  (Montgomery, 2012).

## 1.3. Carte CUSUM (Cumulative Sum charte)

La carte CUSUM repose sur un modèle de processus dont les observations  $y_k$  suivent une distribution normale de moyenne  $\mu$  et d'écart-type  $\sigma$ . La carte consiste à représenter la somme cumulée de la différence  $d$  entre les observations ( $y_k$ ) et la valeur moyenne ( $\mu$ ), soit  $d = [\sum_{k=1}^t (y_k - \mu)]$ , aux différents moments d'échantillonnage ( $k$ ).

Dans ce type de carte, les différences entre les observations et leurs valeurs attendues sont calculées à chaque instant  $t$ . La carte CUSUM effectue, à l'instant  $t$ , la somme la valeur de la fonction de décision  $C_t^+$ , et de la différence entre la valeur observée  $y_t$  et la valeur attendue au moment  $t$  ( $\mu_{t,C} + k$ ) (Lucas, 1985) :

$$C_t^+ = \max [0, C_{t-1}^+ + y_t - (\mu_{t,C} + k)] \quad (\text{B.2})$$

où  $k$ ,  $\mu_{t,C}$  and  $C_t^+$  sont respectivement la variable d'écart (la différence minimale qui doit être dépassée pour qu'une observation compte dans le calcul), la moyenne sous contrôle et la fonction de décision de la carte CUSUM. Une alerte est émise quand fonction de décision dépasse la valeur seuil de contrôle :  $C_t^+ > H$  ( $H$  valeur seuil).

Cette méthode a l'avantage sur les précédentes d'émettre une alerte quand de petites déviations positives se succèdent, et cela non uniquement quand une observation est

largement supérieure à sa valeur attendue. Ainsi, une augmentation légère mais continue déclenchera une alerte plus précoce avec la carte CUSUM qu'avec la carte de contrôle de Shewhart. Cependant, la carte CUSUM a une réponse relativement lente quand il s'agit de détecter des grands changements dans le processus.

#### 1.4. Carte EWMA

Selon la littérature, les cartes EWMA est l'une des cartes de contrôle les plus utilisés pour la surveillance des processus auto-corrélés en raison de leur flexibilité qui permet de choisir la meilleure performance en agissant sur le paramètres de pondération  $\lambda$  et leur sensibilité aux faibles variations.

La carte de contrôle EWMA enregistre les informations d'une manière différente de celle de la carte CUSUM et, contrairement à la méthode de Shewhart, ce ne sont plus les observations brutes qui sont comparées à une limite de contrôle, mais un "lissage" de ces observations. Ce lissage est une moyenne mobile pondérée calculée, à chaque pas de temps, grâce à l'observation du présent et aux observations précédentes.  $y_t$  étant l'observation au moment  $t$  et  $z_t$  la valeur lissée par EWMA au moment  $t$ , alors :

$$z_t = \lambda y_t + (1 - \lambda)z_{t-1} \quad (\text{B.3})$$

où  $\lambda$  est un paramètre de lissage ou de pondération ayant des valeurs comprises entre 0 et 1 et  $z_{t-1}$  la valeur lissée par EWMA au moment  $t-1$ . Un poids plus important est ainsi donné aux observations les plus récentes, grâce au paramètre  $\lambda$ . Un défaut est détecté lorsque que la statistique  $z_t$  dépasse une limite de contrôle. La construction de la carte EWMA repose sur le choix du paramètre de pondération  $\lambda$  et de la période opérationnelle moyenne (POM) qu'on souhaite avoir quand le processus est sous contrôle.

La moyenne attendue,  $\mu_0$  étant estimée sur des données historiques, les limites de contrôle inférieure et supérieure, LCI et LCS, sont données par :

$$LCI, LCS = \mu_0 \mp k\sigma_0 \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}} \quad (\text{B.4})$$

où  $k$  est un nombre positif contrôlant la valeur LCS. Ce lissage permet d'enlever une partie du bruit de la série pour se concentrer sur ses mouvements « plus profonds », afin de diminuer le nombre de faux positifs. Le degré de lissage peut être ajusté en faisant varier le paramètre  $\lambda$  entre 0 et 1.

Les principales caractéristiques des trois cartes de contrôle (la statistique surveillée, limite de contrôle inférieure (LCI) et la limite de contrôle supérieure (LCS) pour alerter, et la sortie sont résumées dans la tableau B-1(Montgomery, 2012).

Table B-1 : Les principales caractéristiques des trois cartes de contrôle.

	Statistique surveillée	Limites de contrôle (LCI, LCS)	Sortie
<b>Shewhart</b>	$Shewhart_t = y_t$	$LCL, LCS = \mu_0 \mp k\sigma_0$	$S_t = Si [Y_t > LCS, Y_t < LCI]$
<b>CUSUM</b>	$C_t^+ = \max [0, C_{t-1}^+ + y_t - (\mu_{t,c} + k)]$ avec $C_0^+ = 0$	$C_t^+ > H$ ( $H$ valeur seuil).	$C_t = Si [C_t^+ > H]$
<b>EWMA</b>	$z_t = \lambda y_t + (1 - \lambda)z_{t-1}$	$LCL, LCS = \mu_0 \mp L\sigma_0 \sqrt{\frac{\lambda}{(2 - \lambda)}}$	$E_t = Si [z_t > CLS, z_t < LCI]$

## 2. Contrôle statistique des procédés multivariés : cartes de contrôle multivariées

Les cartes de contrôle univariées ont été conçues pour contrôler la qualité d'une seule caractéristique ou variable d'un système de production. Cependant, les systèmes de production comportent souvent un grand nombre de variables. Bien que les cartes de contrôle univariées puissent être appliquées pour chaque caractéristique individuellement, cette technique peut conduire à des résultats insatisfaisants lorsque que plusieurs variables sont corrélées (figure B-2).

La surveillance multivariée est motivée par la possibilité de détecter des anomalies qui pourraient être manquées par les tests univariés, et par la possibilité d'exploiter la matrice de corrélation entre les sources de données. Au lieu d'appliquer une carte de contrôle à chaque série, une statistique de test unique est calculée, en injectant les différents flux de données et leur matrice de corrélation dans une méthode de contrôle statistique des procédés multivariée (*multivariate statistical process control, MSPC*). Contrairement à la surveillance parallèle, ces méthodes prennent en compte la corrélation entre les différentes séries temporelles.

### 2.1. Carte $T^2$ de Hotelling

Les premiers travaux concernant la carte  $T^2$  datent de 1947 (Hotelling, 1947). Hotelling a été le premier à mettre au point un concept de surveillance de procédé multivarié. Hawkins, (1991) a montré que le principal avantage de cette carte est qu'elle représente le meilleur test statistique pour détecter un dérèglement de la moyenne du procédé. Pour un procédé à  $p$  variables, et en utilisant les notations matricielles, on peut écrire le  $T^2$  sous la forme de la distance statistique suivante :

$$T^2 = (X - \mu)^T \Sigma^{-1} (X - \mu) \quad (\text{B.5})$$

où  $X$  est le vecteur d'observations à un instant donné de taille  $1 \times p$ ,  $\mu$  le vecteur des moyennes estimées sur des données historiques de taille  $1 \times p$  et  $\Sigma$  la matrice de covariance de taille  $p \times p$ .

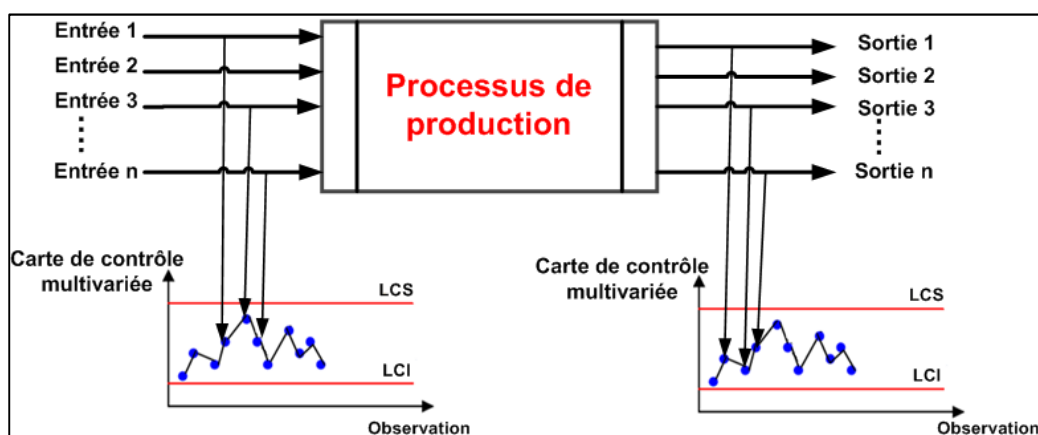


Figure B-2 : Processus de production multivarié.

$T^2$  est un scalaire. Donc, on peut le représenter sous la forme d'une carte de contrôle. Bien entendu, à chaque instant, la mesure du  $T^2$  va être comparée à une limite de contrôle supérieure (la limite de contrôle inférieure étant fixée à 0). Le calcul des limites va dépendre de l'estimation des paramètres du processus. Ainsi, suivant les cas, les limites seront différentes (Montgomery, 2008). Ainsi, une fois les paramètres ( $\mu$  et  $\Sigma$ ) et le seuil de contrôle estimés, on obtient, pour chaque instant d'échantillonnage, le vecteur d'observations  $X$ . On peut alors calculer la valeur de  $T^2$  et la comparer à la limite de contrôle supérieure (LCS). Si la valeur de  $T^2$  est inférieure à la LCS, alors le procédé sera déclaré sous contrôle, sinon il sera déclaré hors-contrôle.

La carte de contrôle  $T^2$  de Hotelling utilise seulement le vecteur d'observations à l'instant présent pour déterminer l'état du processus; elle est donc moins performante pour la détection des faibles dérèglages du processus. Pour remédier à cet inconvénient, les cartes de contrôle MEWMA (Multivariate EWMA) et MCUSUM (Multivariate CUSUM) ont été développées en analogie avec les cartes univariées.

## 2.2. Carte MEWMA

La carte MEWMA, développée par Lowry (Lowry et al., 1992), est une extension multivariée de la carte univariée EWMA. La construction de la carte MEWMA repose sur le même principe que la carte univariée EWMA (Lowry et al., 1992) :

$$Z_t = RY_t + (I - R)Z_{t-1} \quad (\text{B.6})$$

où  $Y_t$  est le vecteur d'observations à l'instant  $t$ ,  $R$  est la matrice diagonale de pondération des variables ( $0 < R_i < 1$ ) et  $I$  est la matrice identité. La valeur initiale  $Z_0$  est souvent considérée égale au vecteur cible du processus ( $Z_0 = \mu$ ). Si on donne le même poids à toutes les variables dans le calcul de la statistique  $Z_t$ , la matrice diagonale de pondération  $R$  devient une constante de pondération  $\lambda$  ayant une valeur comprise entre 0 et 1. Dans ce cas, l'équation (B.6) s'écrit comme suit :

$$Z_t = \lambda Y_t + (1 - \lambda)Z_{t-1} \quad (\text{B.7})$$

Le processus est considéré comme hors-contrôle lorsque que la statistique  $T_i^2$  (voir équation B.5) dépasse une certaine limite ( $h_M > 0$ ) :

$$T_i^2 = Z_t^T \Sigma_{Z_t}^{-1} Z_t > h_M \quad (\text{B.8})$$

où  $\Sigma_{Z_t}$  est la matrice de covariance de la statistique  $Z$  à l'instant  $t$ ;  $\Sigma_{Z_t}$  est calculée comme suit :

$$\Sigma_{Z_t} = \frac{\lambda[1-(1-\lambda)^{2t}]}{2-\lambda} \Sigma \quad (\text{B.9})$$

où  $\Sigma$  est la matrice de covariance des données du processus,  $Y_t$ . Dans le cas où  $\lambda > 0,1$  (n'est pas trop petit), cette matrice approche très rapidement sa valeur asymptotique définie par :

$$\Sigma_{Z_t} = \frac{\lambda}{2-\lambda} \Sigma \quad (\text{B.10})$$

Les performances de la carte MEWMA vont être fonction de  $\lambda$ . En effet, un  $\lambda$  faible permettra une détection performante des sauts de faibles amplitudes, alors qu'un  $\lambda$  élevé sera plus adapté à la détection de saut de fortes amplitudes. Si  $\lambda = 1$ , on obtient une carte  $T^2$  de Hotelling. Il faudra donc choisir  $\lambda$  en fonction de l'amplitude du saut que l'on souhaite détecter.

### 2.3. Carte MCUSUM

La carte MCUSUM est une extension de la carte CUSUM univariée pour le cas multidimensionnel. Plusieurs versions de la carte MCUSUM ont été proposées dans la littérature (Crosier, 1988; Hawkins, 1991; Pignatiello and Runger, 1990; Runger and Testik, 2004). Une des cartes MCUSUM les plus utilisée pour détecter des dérèglages de la moyenne du processus a été développée par (Pignatiello and Runger, 1990) dont les équations sont données par :

$$\begin{cases} Z_t = \max(\|C_t\| - kn_t, 0) \\ \|C_t\| = \sqrt{C_t^T \Sigma^{-1} C_t} \\ C_t = \sum_{i=t-n_t+1}^t (Y_i - \mu_0) \\ n_t = \begin{cases} n_{t-1} + 1, si Z_{t-1} > 0 \\ 1, si non \end{cases} \end{cases} \quad (\text{B.11})$$

Où  $Z_t$  est la statistique de contrôle,  $\|C_t\|$  est la norme du vecteur  $C_t$ ,  $n_t$  est le nombre de sous-groupes et  $k$  un coefficient de sensibilité qui dépend uniquement de la distance entre  $\mu_0$  et  $\mu_1$ .



## Annexe C : Analyse en composante principale

### 1. Modélisation par l'analyse en composante principale (ACP)

Considérons la matrice de données brutes suivantes,  $X = [X_1^T, \dots, X_n^T]^T \in R^{n \times m}$ , constituée de  $n$  observation et  $m$  variables. Avant de calculer le modèle ACP, les données brutes de la matrice  $X$  sont généralement prétraitées, ce qui consiste à centrer et à réduire les variables (moyennes des variables nulles, variances égales à 1). Cette étape de prétraitement met toutes les variables sur un pied d'égalité pour l'analyse.

Soit  $\bar{X}$  la matrice autoscalée (centrée réduite) de  $X$ . En utilisant la décomposition en valeurs singulières (DVS), l'analyse PCA transforme les données de la matrice autoscalée  $\bar{X}$  en une nouvelle matrice  $T = [t_1, t_2, \dots, t_m] \in R^{n \times m}$  de variables non-corrélées appelées scores ou composantes principales (CP). Chaque nouvelle variable est une combinaison linéaire des variables initiales, de sorte que la matrice  $T$  est obtenue à partir de la matrice  $\bar{X}$  par une transformation orthogonale (rotation) comme suit :

$$\bar{X} = TP^T \quad (\text{C.1})$$

où  $T = [p_1, p_2, \dots, p_m] \in R^{m \times m}$  ; les vecteurs colonne  $p_i \in R^m$  de la matrice  $P \in R^{m \times m}$  sont formés par l'association des vecteurs propres avec la matrice de covariance ( $\Sigma$ ) de  $\bar{X}$ , définie comme suit :

$$\Sigma = \frac{1}{n-1} \bar{X}^T \bar{X} = P \Lambda P^T \text{ avec } PP^T = P^T P = I_n \quad (\text{C.2})$$

où  $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_m)$  est la matrice diagonale contenant les valeurs propres dans l'ordre décroissant ( $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m$ ), et  $I_n$  est la matrice identité (Jackson, 2003).

Dans le cas des processus colinéaires, la réduction de la dimensionnalité de l'espace à  $m$  dimensions est obtenue en ne retenant que les CP correspondant aux valeurs propres les plus élevées de la matrice de covariance. Ces derniers, décrivent la majeure partie de la variance des données. D'autre part, les CPs possédant une valeur propre peu élevée sont considérés comme un facteur de bruit.

Une des étapes importantes dans la construction du modèle ACP est la détermination du nombre de CPs,  $I$ , requis pour capturer de manière adéquate la variabilité majeure dans l'ensemble de données. La figure C.1 montre la façon dont des variables colinéaires dans le cas d'un espace à 3 dimensions peuvent être représentées dans un espace réduit à 2 dimensions en utilisant seulement deux composantes principales (CP).

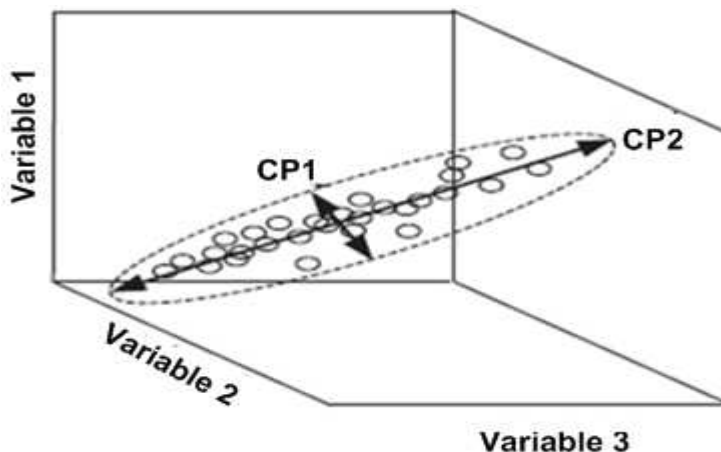


Figure C-1 : Réduction de dimension par l'ACP

## 2. Nombre de composantes principales utilisables

L'obtention d'un modèle ACP de qualité dépend du choix du nombre de CPs retenues (Qin and Dunia, 2000). Si le nombre de CPs,  $l$ , n'est pas estimé correctement, le modèle peut sous-estimer ou surestimer les données. Si on surestime le nombre de CPs,  $l$ , on peut introduire du bruit et le modèle ne parvient pas à prendre en compte une partie d'informations provenant des données. Cependant, en sous-estimant le nombre de CPs, des caractéristiques importantes dans les données peuvent ne pas être capturées, ce qui va conduire à la dégradation de la qualité de la prédiction du modèle ACP. Plusieurs techniques ont été proposées pour sélectionner le nombre de CPs. Par exemple : Scree plot, parallel analysis, sequential tests, resampling, profile likelihood, cross validation, and cumulative percent variance (CPV). La technique CPV est décrit ci-dessous.

L'idée derrière la technique CPV est de sélectionner les CPs,  $l$ , qui captent un certain pourcentage de la variance totale (par exemple, 90%). Le CPV est défini comme suit :

$$CPV(l) = \frac{\sum_{i=1}^l \lambda_i}{\text{trace}(\Sigma)} \times 100 \quad (\text{C.3})$$

Une fois le nombre de CPs,  $l$ , est déterminé, la matrice de données  $\bar{X}$  peut être représentée en utilisant l'ACP comme la somme de deux parties orthogonales : une matrice de données approchée  $\hat{X}$  et une matrice de donnée résiduelle  $E$  comme suit :

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \overbrace{[\hat{T} | \tilde{T}]^T}^T \overbrace{[\hat{P} | \tilde{P}]^T}^{P^T} \\ &= \hat{T} \hat{P}^T + \tilde{T} \tilde{P}^T \\ &= \bar{X} \hat{P} \hat{P}^T + \bar{X} (I_m - \hat{P} \hat{P}^T) \end{aligned} \quad (\text{C.4})$$

$\hat{T} \in R^{n \times l}$  and  $\tilde{T} \in R^{n \times (m-l)}$  sont des matrices contenant le nombre  $l$  de CP retenues et le nombre  $(m - l)$  de CP ignorées, respectivement et  $\hat{P} \in R^{m \times l}$  and  $\tilde{P} \in R^{m \times (m-l)}$  sont des

matrices contenant le nombre  $l$  de vecteurs propres retenus et le  $(m - l)$  de vecteurs propres ignorés, respectivement. Ainsi, un sous-espace (processus sous-espace) contenant les vraies variations (non aléatoires) est identifié. Le complément de ce sous-espace est le sous-espace de bruit (Figure 2).

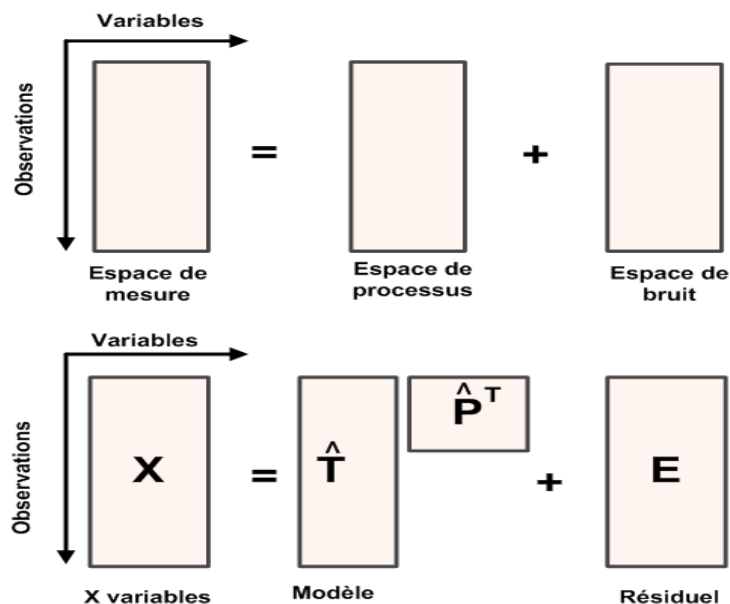


Figure C-2 : Décomposition de X variables en sous espaces processus et bruit.

### 3. Les métriques de surveillance basée sur l'ACP

Une fois le modèle ACP construit en utilisant les données du processus obtenues dans des conditions normales de fonctionnement, il peut être utilisé avec l'un des indices de détection, (par exemple la statistique de Hotelling  $T^2$  ou la statistique  $Q$ ), pour détecter les défauts ou anomalies.

#### 3.1. La statistique $T^2$

La statistique  $T^2$  mesure les variations dans les CPs à différents échantillons de temps. Pour fonction de décision (FD), la statistique  $T^2$  des premiers  $l$  de CPs est défini comme (Hotelling, 1933):

$$T^2 = \bar{X}^T \hat{P} \hat{\Lambda}^{-1} \hat{P}^T \bar{X} = \sum_{i=1}^l \frac{t_i^2}{\lambda_i} \quad (\text{C.5})$$

où la matrice  $\hat{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_m)$ , est une matrice diagonale contenant les valeurs propres associées aux  $l$  CPs retenues. La statistique  $T^2$  donnée dans (équation C.5) peut être visualisée comme un ellipsoïde dans un espace de dimension  $l$ . Pour les nouvelles données de test, lorsque la valeur de  $T^2$  est supérieure à une valeur seuil,  $T_{l,n,\alpha}^2$ , une anomalie (ou un défaut) est déclarée (Hotelling, 1933).

La valeur seuil utilisée pour la statistique  $T^2$  peut être calculée comme suit (Hotelling, 1933) :

$$T_{l,n,\alpha}^2 = \frac{l(n-1)}{n-l} F_{l,n-l,\alpha} \quad (\text{C.6})$$

où  $n$  est le nombre d'échantillons dans les données,  $l$  le nombre CPs retenu,  $\alpha$  est le niveau de signification (Généralement,  $(1\% \leq \alpha \leq 5\%)$ , et  $F_{l,n-l}$ , est la distribution F de Fisher avec  $l$  et  $(n - l)$  degrés de liberté.

Lorsque le nombre d'observations,  $n$ , est assez grand, le seuil de la statistique  $T^2$  peut être approximé par une distribution  $\chi^2$  avec  $l$  degrés de liberté :

$$T^2 = \chi_{l,\alpha}^2 \quad (\text{C.7})$$

Ces valeurs seuils sont calculées en utilisant des données nominales (données sans anomalies). Pour les nouvelles données de test, lorsque la valeur de  $T^2$  est supérieure à la valeur seuil,  $T_{l,n,\alpha}^2$ , une anomalie sera déclarée.

### 3.2. La statistique $Q$

La statistique  $Q$  (Erreur quadratique moyenne de prédiction ou Squared prediction error) est défini comme [44]:

$$Q = \|(I - \hat{P}\hat{P}^T)\bar{X}\|^2 \quad (\text{C.8})$$

La statistique  $Q$  mesure la projection d'un échantillon de données sur le sous-espace résiduel, qui fournit une mesure globale de la façon dont un échantillon de données ajuste le modèle ACP. En d'autres termes, la métrique basée sur la statistique  $Q$  peut être considérée comme une mesure de la non-concordance du modèle du processus. Quand un vecteur de nouvelles données est disponible, la statistique  $Q$  est calculée et comparée avec la valeur seuil  $Q_\alpha$ . Si la valeur seuil est dépassée ( $Q > Q_\alpha$ ), alors une anomalie est déclarée. Les valeurs seuils sont calculées en se basant sur l'hypothèse que les mesures sont indépendantes du temps, multivariées et normalement distribuées. La valeur du seuil  $Q_\alpha$  est donnée par (Jackson, 2003):

$$Q_\alpha = \varphi_1 \left[ \frac{h_0 c_\alpha \sqrt{2\varphi_2}}{\varphi_1} + 1 + \frac{\varphi_2 h_0 (h_0 - 1)}{\varphi_1^2} \right] \quad (\text{C.9})$$

$$\varphi_i = \sum_{j=l+1}^m \lambda_j^i, i = 1, 2, 3 \quad (\text{C.10})$$

$$h_0 = -1 \frac{2\varphi_1 \varphi_3}{3\varphi_2^2} \quad (\text{C.11})$$

où  $l$  est le nombre CP retenues et  $c_\alpha$  la valeur de la distribution normale avec un niveau de signification  $\alpha$ . Cette valeur de seuil est calculée en se basant sur des hypothèses que les mesures sont indépendantes du temps, multivariées et normalement distribuées. L'indice de détection de défaut  $Q$  est très sensible aux erreurs de modélisation et sa performance dépend en grande partie du choix du nombre  $l$  et du nombre de CP retenues (Benaïcha et al., 2010).

Généralement, dans le cadre de la détection des anomalies basée sur l'analyse en composante principale (ACP), l'ACP développe un modèle de référence en utilisant les données d'apprentissage (données sans anomalies). Le nouveau comportement du système peut être ensuite comparé à celui prédéfini pour s'assurer s'il reste dans des conditions normales de fonctionnement ou non. L'algorithme de détection d'anomalie est résumé dans le tableau C-1.

Table C-1 : Algorithme de détection d'anomalies basé sur les cartes de contrôle multivariées et l'analyse en composante principale (ACP)

Étapes	Actions
1	<p><b>Données</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensemble de données d'apprentissage représentant l'état de fonctionnement normal.</li> <li>• Ensemble de données de test (nouvelles données) qui peuvent contenir des situations anormales.</li> <li>• Paramètres de la carte de contrôle utilisée.</li> </ul>
2	<p><b>Prétraitement des données</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyser les données,</li> <li>• Centrer et réduire les données (moyenne nulle et écart type égale à 1).</li> </ul>
3	<p><b>Construction du modèle ACP en utilisant les données d'apprentissage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calculer la matrice de covariance, <math>\Sigma</math>, en utilisant l'équation (C.2)</li> <li>• Calculer les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice <math>\Sigma</math> et trier les valeurs propres dans l'ordre décroissant.</li> <li>• Déterminer le nombre de composantes principales (CP) à utiliser (plusieurs techniques peuvent être utilisées voir la partie 2).</li> <li>• Exprimer la matrice de données comme une somme de matrices de données et la matrice résiduelle (équation C.4).</li> <li>• Calculer les limites de contrôle du modèle statistique (par exemple, statistique <math>Q</math> et ou <math>T^2</math>)</li> </ul>
4	<p><b>Tester les nouvelles données (données de test)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Centrer et réduire les nouvelles données.</li> <li>• Générer le vecteur des résidus, en utilisant le modèle ACP.</li> <li>• Calculer la statistique de contrôle (statistique <math>Q</math> ou <math>T^2</math>) en utilisant les nouvelles données (équation C.5 ou C.7).</li> </ul>
5	<p><b>Vérifier les anomalies</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Déclarer une anomalie lorsqu'une nouvelle données dépasse les limites de contrôle (exemple: <math>Q &gt; Q_\alpha</math>)</li> </ul>

## Annexe D : Analyse des données du SUP du CHRU de Lille

### 1. Introduction

L'analyse des données a été menée en utilisant les données de toute l'année 2012 extraites de la base de données du SUP du CHRU de Lille. De janvier 2012 à décembre 2012, 24 040 visites ont été enregistrées. Ces données ont été filtrées en éliminant les doublons selon la règle fixée par les médecins urgentistes.

### 2. Age et sexe des patients

#### 2.1. Répartition des patients par sexe et âge

Sexe	Effectifs	Pourcentage	Age moyen en mois	Ecart type	Age moyen en années
F	10766	44,8%	61,51	59,13	5,13
M	13272	55,2%	59,5	59,59	4,96

Nous constatons un écart d'environ 10% entre le nombre de consultations de filles par rapport aux garçons, sachant que dans la pyramide des âges, on constate en moyenne sur ces dix dernières années, 2,22% de garçons en plus par rapport aux filles (<http://www.insee.fr>). Pour une analyse plus précise, il serait nécessaire de prendre en compte la pyramide des âges de la ville de Lille et de sa région pour vérifier que les pourcentages sont identiques.

#### 2.2. Répartition des âges des patients (âge en mois)

Moyenne	60,40
Médiane	40,00
Ecart-type	59,39
Min	0,00
Max	1 322,00

Age ≤ 180	23 746	98,79 %
Age >180	292	1,21 %
Total	24 038	100 %

*Remarque* : 78 patients ont été déclarés avec un âge compris entre 205 mois (17 ans et 1 mois) et 1 322 mois (110 ans et 2 mois). L'âge des patients au SUP se situant autour de 180 mois, il est indispensable de vérifier si ces données sont des erreurs de saisie ou sont réelles.

La figure D-1 ci-dessous, présente la répartition des âges jusqu'à 204 mois. Nous constatons que la majorité des patients (80%) ont un âge compris entre 0 et 120 mois (10

ans). Il est à noter également que quasiment un quart des patients ont un âge compris entre 0 et 12 mois.

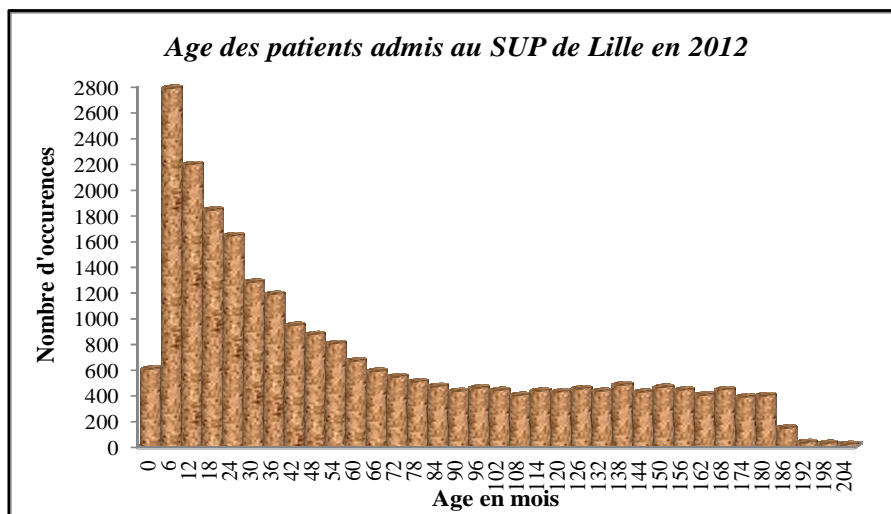


Figure D-1 : Fonction de répartition des âges des patients (âge en mois)

### 3. Les arrivées des patients au SUP

#### 3.1. Mode d'arrivée

Le tableau ci-dessous présente les moyens d'arrivées aux SUP, les modes d'arrivée les plus fréquents sont : les moyens personnels (85%), les ambulances privées (5,91%), et les pompiers (5,32%).

Table D-1 : Pourcentage des moyens d'arrivée au SUP

Moyens d'arrivée	Effectifs	Pourcentage
Moyens Personnels	20 616	85,76 %
Ambulance Privée	1 420	5,91 %
Pompiers	1 278	5,32 %
SAMU-SMUR	274	1,14 %
Autres	211	0,88 %
Hélicoptère	76	0,32 %
Non Renseigné	68	0,28 %
Ambulance Publique	55	0,23 %
Taxi	34	0,14 %
Ambulance Publique de CHRU	8	0,03%
<b>Total</b>	<b>24 040</b>	<b>100%</b>

### 3.2. Nombre d'arrivées au SUP de CHRU de Lille

#### 3.2.1. Nombre d'arrivées journalières

La figure D-2 présente le nombre d'arrivées journalières au SUP entre janvier et décembre 2012. Cette figure montre que cette série chronologique ne présente pas de tendance.

Le nombre d'arrivées au SUP varie considérablement en fonction du jour de la semaine. Ceci pourrait être expliqué par :

- un nombre plus élevé d'arrivées se produit le dimanche et le lundi,
- des journées ou des événements spéciaux, comme les vacances, des événements sportifs, les festivals régionaux, peuvent conduire à des arrivées anormalement élevées au SUP,

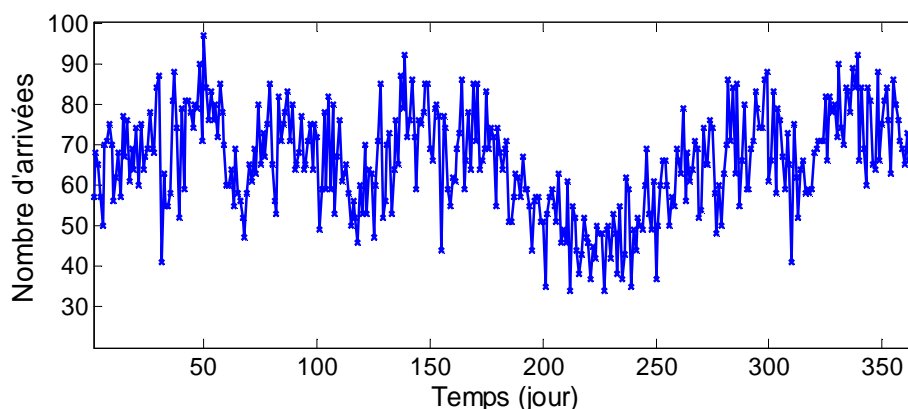


Figure D-2 : Nombre d'arrivées journalières au SUP de CHRU-Lille (Janvier 2011-Décembre 2012).

#### 3.2.2. Nombre d'arrivées journalières de la semaine

La table D-2 représente le nombre moyen d'arrivées journalières de patients au SUP de la semaine, le lundi et le dimanche sont les plus chargés avec plus de 69 patients. Mais en général, le nombre moyen de patients arrivant aux urgences est équiréparti sur l'ensemble des jours de la semaine. La table D-3 résume l'analyse statistique descriptive des arrivées journalières des patients de la semaine.



Table D-2 : Nombre moyen d'arrivées par journalières de la semaine

Jour	Effectifs	Nombre de semaines	Nombre moyen journalier de patients
Lundi	3 691	53	69,64
Dimanche	3 664	53	69,13
Samedi	3 420	52	65,77
Jeudi	3 377	52	64,94
Vendredi	3 359	52	64,60
Mardi	3 309	52	63,63
Mercredi	3 218	52	61,88
Total	24 038		

Table D-3 : Résumé de l'analyse statistique par jour de la semaine

	Dimanche	Samedi	Vendredi	Jeudi	Mercredi	Mardi	Lundi
Moyenne	69,13	65,77	64,60	64,94	61,88	63,63	69,64
Médiane	69,00	65,00	64,00	66,00	60,50	64,50	71,00
écart-type	12,02	9,36	12,76	13,75	10,90	12,61	13,52
Min	35,00	43,00	38,00	35,00	37,00	34,00	34,00
Max	97,00	83,00	92,00	88,00	87,00	92,00	90,00
1er quartile	61,00	60,00	56,50	54,50	55,75	53,00	59,00
3e quartile	76,00	72,00	73,25	76,50	66,25	74,00	80,00
80%	80,20	74,60	75,00	78,80	69,00	74,00	82,80

### 3.2.3. Nombre d'arrivées par heure

Les répartitions horaires de nombre d'arrivée des patients aux urgences pédiatriques selon les jours de la semaine sont présentées figure D-3.

## 4. Groupes d'Etude Multicentrique des Services d'Accueil (GEMSA)

Les six groupes de la classification GEMSA élaborée par le Groupe d'Etude Multicentrique des Services d'Accueil sont résumés table D-4.

Chaque groupe est associé à un type de patient. Les critères de classification ont été établis en fonction du mode d'entrée, du mode de sortie des patients et de l'activité de soins programmée ou non.

Cette classification renseigne sur les arrivées des patients, prévues ou imprévues, qui demande des prises en charge importantes et prolongées. La répartition des effectifs selon les six groupes pour l'année 2012 est représentée table D 5.

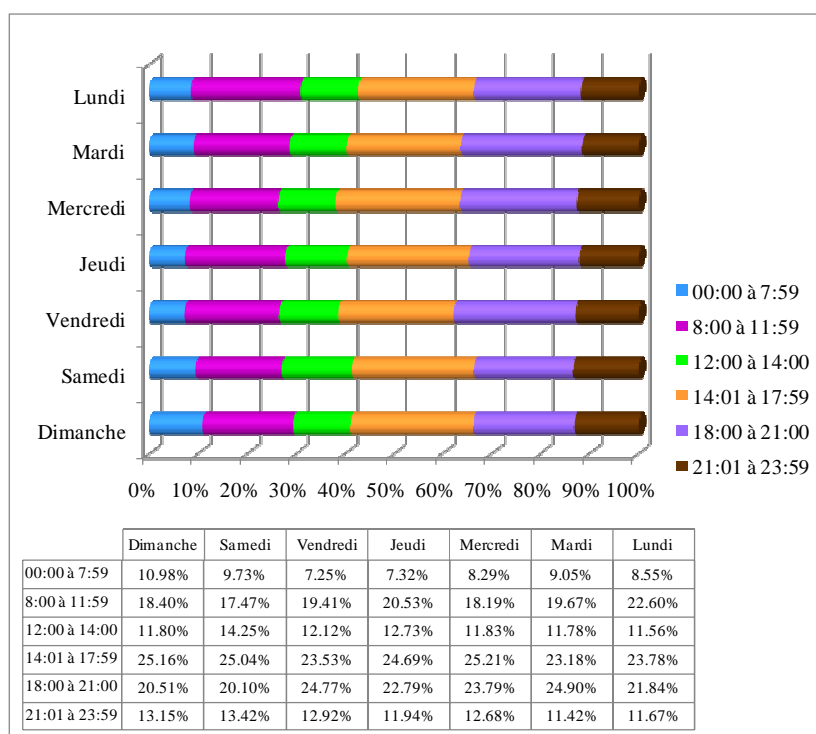


Figure D-3 : Répartition horaire des arrivées au SUP selon les jours de la semaine.

Table D-4 : Classification GEMSA

Classification GEMSA	Mode d'admission	Description
GEMSA 1 (G1)	Imprévu	Patient décédé à l'arrivée ou avant toute réanimation
GEMSA 2 (G2)	Imprévu	Patient non convoqué, arrivée inattendue, retour à domicile après les soins d'urgence
GEMSA 3 (G3)	Prévu	Patient convoqué, arrivée prévue, retour à domicile après les soins d'urgence
GEMSA 4 (G4)	Imprévu	Patient non convoqué, arrivée inattendue, hospitalisé après des soins d'urgence
GEMSA 5 (G5)	Prévu	Patient convoqué, arrivée prévue, hospitalisé après des soins d'urgence
GEMSA 6 (G6)	Imprévu	Patient nécessitant des soins immédiats ou prolongés (soins intensifs)

Table D-5 : Répartition des effectifs selon les six groupes GEMSA pour l'année 2012.

GEMSA	Effectif	Pourcentage
1	0	0,00 %
<b>2</b>	<b>19 100</b>	<b>79,46 %</b>
3	1 683	7,00 %
<b>4</b>	<b>2 556</b>	<b>10,63 %</b>
5	509	2,12 %
6	12	0,05 %
Non Renseigné	178	0,74 %
Total	24 038	100,00 %

Selon la table D-5, plus de 79% des patients arrivant au SUP sont imprévus (G2). En général ces patients regagnent leur domicile après la prise en charge au SUP. Le groupe G4, représente les arrivées imprévues (10,63%). La plupart de ces patients sont hospitalisés après la prise en charge par le SUP.

## 5. La classification clinique des malades aux urgences (CCMU)

La classification clinique des malades aux urgences (CCMU) est une codification évaluant l'état du patient aux urgences, son niveau de gravité ainsi que son pronostic médical. La table D-6 présente la classification des patients pris en charge au niveau de SUP pour toute l'année 2012.

Table D-6 : Classification CCMU des données 2012.

CCMU	Effectifs	Pourcentage
<b>CCMU 1</b>	<b>7 455</b>	<b>31,01%</b>
<b>CCMU 2</b>	<b>14 760</b>	<b>61,40%</b>
CCMU 3	1 379	5,74%
CCMU 4	86	0,36%
CCMU 5	19	0,08%
Non renseigné	339	1,41%
Total	24 038	100,00%

On remarque que les patients classés CCMU 2 représentent la majorité des patients qui sont admis aux urgences pédiatriques (plus de 61% des admis), puis les patients classés CCMU 1 avec plus de 31%. Ces patients présentent un état sans gravité et ils regagnent tous leur domicile.

## 6. Examens complémentaires

Selon les données de 2012, un patient peut être amené à passer quatre types d'examens complémentaires selon son état de gravité. Les quatre types d'examens sont présentés dans la table D-7.

Table D-7 : Répartition des patients selon les examens complémentaires

Examen	Nombre	Pourcentage
Radiologie	5 653	23,5 %
Biologie	4 708	19,6 %
Echographie	1 426	5,9 %
Scanner	482	2,0 %
Sur 24 038 passages		2 patients non renseignés

La table D-7, montre que plus de 23% des patients admis aux urgences pédiatriques ont subi des examens de radiologie et plus de 19% ont subi des examens biologiques (19,6%). D'où l'attention que l'on doit apporter à l'allocation de ressources (humaines et matérielles) pour ces deux examens, sources potentielles de situations de tension.

## 7. Orientation après passage au SUP

La table D-8 ci-dessous représente les destinations les plus fréquentes après la prise en charge au SUP. On remarque que plus de 83% des patients regagnent leur domicile après le passage aux urgences, 5,77% d'entre eux sont transférés au sein du CHRU de Lille.

Table D-8 : Orientation après le SUP.

Orientation	Effectifs	Pourcentage
Retour Domicile	20 159	83,86%
Transfert Interne	1 387	5,77%
Partie Sans Attendre	188	0,78%
Admis(E) en hospitalisation complète (4243)	181	0,75%
Admis(E) en neuropédiatrie hc (3031)	173	0,72%
Transfert Externe	172	0,72%
Admis Par Erreur	160	0,67%
Admis(E) En HC ortho enfants (4213)	136	0,57%
Admis(E) en HC viscéral enfants (4212)	135	0,56%
Fugue	104	0,43%
Admis(E) en HC unité arc en ciel (4171)	104	0,43%

## Annexe E : Scénarios expérimentés dans le pilotage réactif

Dans le cas du pilotage réactif des situations de tension au sein du SUP, nous avons pris en compte les cinq indicateurs de tension sélectionnés et validés pour le SUP du CHRU de Lille (Table V-9 du chapitre V). Pour cela, nous avons proposé trois alternatives selon la nature des actions de correction, les règles de priorité et le temps de lancement des actions de correction  $T_L$ .

### 1. Alternative A : actions de correction avec temps de lancement $T_L = 0$

Dans cette alternative, nous avons testé les effets des actions de correction possibles (actions sur les ressources humaines, sur les ressources matérielles et sur le flux patients) au sein du SUP après passage de l'état normal à l'état dégradé, sans prendre en compte le temps de lancement des actions de correction ( $T_L = 0$ ). La table E-1 présente les 31 scénarios testés. Les résultats de l'application de chaque scénario sont présentés table E-2. Un « 1 » signifie que l'action de correction est efficace, un « 0 » que l'action de correction n'est pas efficace.

Table E-1 : Actions de correction dans le cas de l'alternative A.

Alternative A (Scénarios A <sub>i</sub> )	Ressources humaines		Ressources matérielles	Flux patients	Temps de lancement d'action de correction
	IDE	MU	Boxes	Règles de priorité	$T_L$ (minutes)
Scénario A1	1 IDE	0 MU	0 Box	0	0
Scénario A2	0 IDE	1 MU	0 Box	0	0
Scénario A3	0 IDE	0 MU	1 Box	0	0
Scénario A4	1 IDE	0 MU	1 Box	0	0
Scénario A5	0 IDE	1 MU	1 Box	0	0
Scénario A6	1 IDE	1 MU	0 Box	0	0
Scénario A7	1 IDE	1 MU	1 Box	0	0
Scénario A8	0 IDE	0 MU	0 Box	1	0
Scénario A9	1 IDE	0 MU	0 Box	1	0
Scénario A10	0 IDE	1 MU	0 Box	1	0
Scénario A11	0 IDE	0 MU	1 Box	1	0
Scénario A12	1 IDE	0 MU	1 Box	1	0
Scénario A13	0 IDE	1 MU	1 Box	1	0
Scénario A14	1 IDE	1 MU	0 Box	1	0
Scénario A15	1 IDE	1 MU	1 Box	1	0
Scénario A16	0 IDE	0 MU	0 Box	2	0
Scénario A17	1 IDE	0 MU	0 Box	2	0
Scénario A18	0 IDE	1 MU	0 Box	2	0
Scénario A19	0 IDE	0 MU	1 Box	2	0
Scénario A20	1 IDE	0 MU	1 Box	2	0
Scénario A21	0 IDE	1 MU	1 Box	2	0

Scénario A22	1 IDE	1 MU	0 Box	2	0
Scénario A23	1 IDE	1 MU	1 Box	2	0
Scénario A24	0 IDE	0 MU	0 Box	3	0
Scénario A25	1 IDE	0 MU	0 Box	3	0
Scénario A26	0 IDE	1 MU	0 Box	3	0
Scénario A27	0 IDE	0 MU	1 Box	3	0
Scénario A28	1 IDE	0 MU	1 Box	3	0
Scénario A29	0 IDE	1 MU	1 Box	3	0
Scénario A30	1 IDE	1 MU	0 Box	3	0
Scénario A31	1 IDE	1 MU	1 Box	3	0

Table E-2 : Résultats des actions de correction dans le cas de l'alternative A.

Scénarios	Indicateurs de tension				
	T <sub>2</sub>	PW	Np	PM	Qs
A1	1	1	0	0	1
A2	1	1	0	0	1
A3	1	1	0	0	1
A4	1	1	0	0	1
A5	1	1	0	0	1
A6	1	1	0	0	1
A7	1	1	0	0	1
A8	0	1	0	0	0
A9	1	1	0	0	1
A10	0	1	0	0	0
A11	1	1	0	0	1
A12	1	1	0	0	1
A13	1	1	0	0	1
A14	0	1	0	0	1
A15	1	1	0	0	1
A16	0	0	0	0	0
A17	1	1	0	0	1
A18	1	1	0	0	1
A19	1	1	0	0	1
A20	1	1	0	0	1
A21	1	1	0	0	1
A22	1	1	0	0	1
A23	1	1	0	0	1
A24	1	1	0	0	0
A25	1	1	0	0	0
A26	1	1	0	0	0
A27	1	1	1	1	1
A28	1	1	0	0	0
A29	0	0	0	0	0
A30	1	1	0	0	1
A31	1	1	0	0	1

## 2. Alternative B : actions de correction avec temps de lancement TL= 60 minutes

Dans cette alternative, nous avons testé les effets des actions de correction sur le fonctionnement du SUP avec un temps de lancement des actions de correction,  $T_L = 60$  minutes. La table E-3 présente les 31 scénarios testés, les résultats de l'application de chaque scénario sont présentés table E-4.

Table E-3 : Actions de correction dans le cas de l'alternative B.

Alternative B (Scénarios B <sub>i</sub> )	Ressources humaines		Ressources matérielles	Flux patients	Temps de lancement d'action de correction
	IDE	MU	Boxes	Règles de priorité	T <sub>L</sub> (minutes)
Scénario B1	1 IDE	0 MU	0 Box	0	60
Scénario B2	0 IDE	1 MU	0 Box	0	60
Scénario B3	0 IDE	0 MU	1 Box	0	60
Scénario B4	1 IDE	0 MU	1 Box	0	60
Scénario B5	0 IDE	1 MU	1 Box	0	60
Scénario B6	1 IDE	1 MU	0 Box	0	60
Scénario B7	1 IDE	1 MU	1 Box	0	60
Scénario B8	0 IDE	0 MU	0 Box	1	60
Scénario B9	1 IDE	0 MU	0 Box	1	60
Scénario B10	0 IDE	1 MU	0 Box	1	60
Scénario B11	0 IDE	0 MU	1 Box	1	60
Scénario B12	1 IDE	0 MU	1 Box	1	60
Scénario B13	0 IDE	1 MU	1 Box	1	60
Scénario B14	1 IDE	1 MU	0 Box	1	60
Scénario B15	1 IDE	1 MU	1 Box	1	60
Scénario B16	0 IDE	0 MU	0 Box	2	60
Scénario B17	1 IDE	0 MU	0 Box	2	60
Scénario B18	0 IDE	1 MU	0 Box	2	60
Scénario B19	0 IDE	0 MU	1 Box	2	60
Scénario B20	1 IDE	0 MU	1 Box	2	60
Scénario B21	0 IDE	1 MU	1 Box	2	60
Scénario B22	1 IDE	1 MU	0 Box	2	60
Scénario B23	1 IDE	1 MU	1 Box	2	60
Scénario B24	0 IDE	0 MU	0 Box	3	60
Scénario B25	1 IDE	0 MU	0 Box	3	60
Scénario B26	0 IDE	1 MU	0 Box	3	60
Scénario B27	0 IDE	0 MU	1 Box	3	60
Scénario B28	1 IDE	0 MU	1 Box	3	60
Scénario B29	0 IDE	1 MU	1 Box	3	60
Scénario B30	1 IDE	1 MU	0 Box	3	60
Scénario B31	1 IDE	1 MU	1 Box	3	60

Table E-4 : Résultats des actions de correction dans le cas de l'alternative B.

Scénarios	Indicateurs de tension				
	T <sub>2</sub>	PW	Np	PM	Qs
B1	0	0	0	0	0
B2	1	1	0	0	1
B3	1	1	0	0	1
B4	0	1	0	0	1
B5	1	1	0	0	1
B6	0	0	0	0	1
B7	1	1	0	0	1
B8	0	1	0	0	0
B9	1	1	0	0	1
B10	1	1	0	0	1
B11	1	1	0	0	1
B12	1	1	0	0	1
B13	1	1	0	0	1
B14	1	1	0	0	1
B15	1	1	0	0	1
B16	0	0	0	0	0
B17	0	0	0	0	0
B18	1	1	0	0	1
B19	1	1	0	0	1
B20	0	1	0	0	1
B21	1	1	0	0	1
B22	0	0	0	0	1
B23	1	1	0	0	1
B24	1	1	0	0	1
B25	1	1	0	0	1
B26	1	1	0	0	1
B27	1	1	1	1	1
B28	1	0	0	0	0
B29	1	1	0	0	1
B30	0	0	0	0	0
B31	1	1	0	0	1

### 3. Alternative C : temps de lancement des actions de correction, TL= 90 minutes

Dans cette alternative, nous avons testé les effets des actions de correction sur le fonctionnement du SUP avec un temps de lancement des actions de correction, T<sub>L</sub> = 90 minutes. La table E-5 présente les 31 scénarios testés et les résultats de l'application de chaque scénario sont présentés table E-6.



Table E-5 : Actions de correction dans le cas de l'alternative C.

Alternative C (Scénarios C <sub>i</sub> )	Ressources humaines		Ressources matérielles	Flux patients	Temps de lancement d'action de correction
	IDE	MU	Boxes	Règles de priorité	T <sub>L</sub> (minutes)
Scénario C1	1 IDE	0 MU	0 Box	0	90
Scénario C2	0 IDE	1 MU	0 Box	0	90
Scénario C3	0 IDE	0 MU	1 Box	0	90
Scénario C4	1 IDE	0 MU	1 Box	0	90
Scénario C5	0 IDE	1 MU	1 Box	0	90
Scénario C6	1 IDE	1 MU	0 Box	0	90
Scénario C7	1 IDE	1 MU	1 Box	0	90
Scénario C8	0 IDE	0 MU	0 Box	1	90
Scénario C9	1 IDE	0 MU	0 Box	1	90
Scénario C10	0 IDE	1 MU	0 Box	1	90
Scénario C11	0 IDE	0 MU	1 Box	1	90
Scénario C12	1 IDE	0 MU	1 Box	1	90
Scénario C13	0 IDE	1 MU	1 Box	1	90
Scénario C14	1 IDE	1 MU	0 Box	1	90
Scénario C15	1 IDE	1 MU	1 Box	1	90
Scénario C16	0 IDE	0 MU	0 Box	2	90
Scénario C17	1 IDE	0 MU	0 Box	2	90
Scénario C18	0 IDE	1 MU	0 Box	2	90
Scénario C19	0 IDE	0 MU	1 Box	2	90
Scénario C20	1 IDE	0 MU	1 Box	2	90
Scénario C21	0 IDE	1 MU	1 Box	2	90
Scénario C22	1 IDE	1 MU	0 Box	2	90
Scénario C23	1 IDE	1 MU	1 Box	2	90
Scénario C24	0 IDE	0 MU	0 Box	3	90
Scénario C25	1 IDE	0 MU	0 Box	3	90
Scénario C26	0 IDE	1 MU	0 Box	3	90
Scénario C27	0 IDE	0 MU	1 Box	3	90
Scénario C28	1 IDE	0 MU	1 Box	3	90
Scénario C29	0 IDE	1 MU	1 Box	3	90
Scénario C30	1 IDE	1 MU	0 Box	3	90
Scénario C31	1 IDE	1 MU	1 Box	3	90

Table E-6 : Résultats des actions de correction dans le cas de l'alternative C.

Scénarios	Indicateurs de tension				
	T <sub>2</sub>	PW	Np	PM	Qs
C1	0	0	0	0	1
C2	1	1	1	0	1
C3	1	1	0	0	1
C4	1	1	0	0	1
C5	1	1	0	0	1
C6	1	1	0	0	1
C7	1	1	0	0	1
C8	0	1	0	0	1
C9	1	1	0	0	1
C10	1	1	0	0	1
C11	1	1	0	0	1
C12	1	1	0	0	1
C13	1	1	0	0	1
C14	0	0	0	0	1
C15	1	1	0	0	1
C16	0	0	0	0	0
C17	0	0	0	0	1
C18	1	1	1	1	1
C19	1	1	0	0	1
C20	1-	1	0	0	1
C21	1	1	0	0	1
C22	0	1	0	0	0
C23	0	1	0	0	1
C24	1	1	0	0	1
C25	1	1	0	0	1
C26	0	0	0	0	0
C27	1	1	1	1	1
C28	1	1	1	1	1
C29	1	1	1	1	1
C30	1	1	0	0	1
C31	1	1	1	1	1

## Annexe F : Questionnaires

Afin de cerner et mieux comprendre la notion de situation de tension, les indicateurs de tension ainsi que les informations concernant le fonctionnement interne de service d'urgence pédiatrique de CHRU de Lille, plusieurs questionnaires destinés aux professionnels de santé (Médecins urgentistes, IDE, IAO, AS,...) a été mis en place.

L'objectif de ces questionnaires était de recueillir toutes les informations possibles sur les situations de tension (causes et conséquences), les indicateurs de tension ainsi que le parcours des patients au sein de service des urgences pédiatriques de CHRU de Lille.

Nous avons établi trois questionnaires. Le premier propose de classer des indicateurs des situations de tension selon leur degré de pertinence dans l'activité de prise en charge du personnel médical. Le second questionnaire concerne les situations de tension que le personnel médical a pu vivre lors de son activité hospitalière. Le dernier questionnaire est focalisé sur les informations générales concernant les patients reçus au sein du service d'urgence pédiatrique (passage, étapes, parcours, ...).

### 1. Questionnaire concernant les indicateurs de tension

La tension est la conséquence d'un déséquilibre entre le flux d'admission des patients et la capacité de soins des urgences. Le principal effet des déséquilibres est une augmentation des files d'attente, plusieurs indicateurs qui peuvent caractériser ces délais. Le choix de ces indicateurs pertinents se fait en se basant sur les avis des professionnels de santé (Médecins urgentistes, IDE, IAO,...) et sur le retour d'expérience concernant les situations de tension déjà observées dans l'établissement de soins.

Vous trouverez ci-dessous une liste des indicateurs de tension qui peuvent nous renseigner sur les situations de tension. Pour aider au choix et à la sélection de ces indicateurs, veuillez classer ces indicateurs de tension selon leur degré de pertinence de 1 à 5 (1 le plus pertinent et 5 le moins pertinent).

*Cocher la case adéquate*

1. Le temps d'attente au guichet administratif.

Le plus pertinent	Le moins pertinent					
<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20px; height: 20px; text-align: center;">1</td> <td style="width: 20px; height: 20px; text-align: center;">2</td> <td style="width: 20px; height: 20px; text-align: center;">3</td> <td style="width: 20px; height: 20px; text-align: center;">4</td> <td style="width: 20px; height: 20px; text-align: center;">5</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5		

2. Le temps d'attente entre l'enregistrement au guichet administratif et la prise en charge par l'hôtesse.

Le plus pertinent	Le moins pertinent					
<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20px; height: 20px; text-align: center;">1</td> <td style="width: 20px; height: 20px; text-align: center;">2</td> <td style="width: 20px; height: 20px; text-align: center;">3</td> <td style="width: 20px; height: 20px; text-align: center;">4</td> <td style="width: 20px; height: 20px; text-align: center;">5</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5		

3. Le temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et l'intervention de l'IAO.

Le plus pertinent Le moins pertinent

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

4. Le temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et le premier examen médical.

Le plus pertinent Le moins pertinent

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

5. Le délai écoulé entre l'enregistrement au guichet administratif et l'admission en UHCD.

Le plus pertinent Le moins pertinent

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

6. Le délai écoulé entre l'enregistrement au guichet administratif et la sortie du service

Le plus pertinent Le moins pertinent

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

7. Le nombre d'hospitalisation sur 24 h

Le plus pertinent Le moins pertinent

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

8. Le nombre d'hospitalisation par jour sur X jours

Le plus pertinent Le moins pertinent

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

9. Nombre de patients actuellement hospitalisés dans le secteur d'UHCD depuis plus de 24h

Le plus pertinent Le moins pertinent

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

10. Nombre de transferts pour manque de place depuis 24h

Le plus pertinent Le moins pertinent

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

11. La moyenne de présence aux urgences sur 24h,

Le plus pertinent Le moins pertinent

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

12. Durée moyenne d'attente aux urgences depuis 2h

Le plus pertinent Le moins pertinent

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

13. Le passage depuis 6 h, et le passage/24h,

Le plus pertinent Le moins pertinent

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

14. Le nombre de patients selon leurs âgés (ex : <1 ans.)

Le plus pertinent					Le moins pertinent	
1	2	3	4	5		

15. Le nombre de patients présents/médecin

Le plus pertinent					Le moins pertinent	
1	2	3	4	5		

16. Le nombre de patients présents/IDE (Infirmier Diplômé d'Etat),

Le plus pertinent					Le moins pertinent	
1	2	3	4	5		

17. Le nombre de patients présents depuis plus de 10h aux urgences

Le plus pertinent					Le moins pertinent	
1	2	3	4	5		

18. Nombre de patients hospitalisés à la sortie des urgences depuis 3 jours

Le plus pertinent					Le moins pertinent	
1	2	3	4	5		

19. Le nombre d'interventions primaires et secondaires par le SAMU

Le plus pertinent					Le moins pertinent	
1	2	3	4	5		

20. Nombre de CCMU (Classification Clinique des Malades aux Urgences) 4 et 5 présents (patients graves)

Le plus pertinent					Le moins pertinent	
1	2	3	4	5		

21. Taux d'occupation ponctuel (rapport à un instant « t » du nombre de patients hospitalisés sur la capacité d'accueil)

Le plus pertinent					Le moins pertinent	
1	2	3	4	5		

Si d'autres indicateurs de tensions vous alerte merci de les lister ci-dessous :

-  
-  
-

## 2. Questionnaire concernant les situations de tension

Nous proposons de définir la situation de tension de la manière suivante : Une situation de tension dans un service d'urgence peut être définie comme étant un déséquilibre qui dépasse une certaine durée (seuil) entre :

- a) Le « flux de charge » en soins (patients).
- b) La « capacité » de soins (Personnels).

1) Êtes-vous d'accord avec cette définition ? (entourez la réponse appropriée)

- a) Oui
- b) Non

2) Si non pourquoi ? (Répondez en texte libre)

-  
-  
-

3) À quel niveau ressentez vous ces situations de tension :

-  
-  
-

4) Quelles sont les actions à entreprendre pour éviter une situation de tension donnée :

-  
-  
-

5) Quelles sont les actions à entreprendre pour limiter ces situations de tension (actions en fonction de type de situation).

-  
-  
-

6) À partir de quel temps d'attente (patients dans la salle(s) d'attente) considérez vous que le travail est surchargé (saturé).

-  
-  
-

7) Au niveau de chaque zone de soin, quel est le nombre maximum de patients qu'un MU peut traiter en une heure, quatre heures ?

-  
-  
-

8) Quel est le temps de séjours (minimum et maximum) des patients en UHCD et Salles d'examen, et en salle d'attente

-  
-  
-

### **3. Questionnaire concernant les informations concernant les patients**

- 1) Le nombre de passages par jour, semaine.
- 2) L'heure et la fréquence d'arrivée des patients.
- 3) Le parcours des patients dans le service d'urgence.
- 4) La durée de passage (min et max) dans le service.
- 5) La durée de passage (min et max) dans chaque zone.
- 6) Le temps de séjour dans chaque zone.
- 7) Le taux d'occupation des boxes, lits,...