



**HAL**  
open science

# Pilotage des systèmes complexes soumis à des perturbations

Sondes Chaabane

► **To cite this version:**

Sondes Chaabane. Pilotage des systèmes complexes soumis à des perturbations: Robustesse et Résilience. Automatique / Robotique. Université Polytechnique Hauts-de-France, 2023. tel-04523159

**HAL Id: tel-04523159**

**<https://uphf.hal.science/tel-04523159>**

Submitted on 27 Mar 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

N° d'ordre : 23/13

## **Habilitation à diriger des recherches**

Présentée à

L'université Polytechnique Hauts-de-France

INSA Hauts-de-France

Dans le domaine : Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

Spécialité : Automatique, productique

Par

**Sondes CHAABANE**

Maître de Conférences

### **Pilotage des systèmes complexes soumis à des perturbations : Robustesse et Résilience**

Soutenue le 05 décembre 2023, devant le jury composé de :

#### **RAPPORTEURS**

Mme. Gülgün ALPAN, Professeure des Universités, Institut Polytechnique de Grenoble  
Mme. Valérie BOTTA-GENOULAZ, Professeure des Universités, INSA de Lyon  
M. William DERIGENT, Professeur des Universités, Université de Lorraine, (Président du jury)

#### **EXAMINATEURS**

M. Shenle PAN, Maître de conférences, HDR, Mines Paris Tech  
M. Franck FONTANILI, Maître de conférences, HDR, IMT Mines Albi  
M. Samir LAMOURI, Professeur des Universités, Arts et Métiers Paris Tech  
M. Damien TRENTESAUX, Professeur des Universités, UPHF, (Directeur de recherche)



*A la mémoire de mon cher père toujours dans mon cœur*

*A la mémoire de mon collègue et ami Christian Tahon*



**Partie II :**  
**Dossier Scientifique**



# Remerciements

Je remercie M. Damien TRENTESAUX pour son soutien et son aide tout au long de ma carrière dès mon arrivée à Valenciennes. Ses conseils m'ont guidée dans toutes mes activités de recherche et d'enseignement. Un grand merci Damien.

Je remercie les rapporteurs, Mme Gülgün ALPAN, Mme Valérie BOTTA-GENOULAZ et M. William DERIGENT, pour avoir lu mon manuscrit, pour avoir proposé des améliorations et pour avoir donné des remarques constructives qui me serviront pour la suite de ma vie professionnelle. Un grand merci pour votre temps, votre disponibilité et votre sympathie.

Je remercie M. Shenle PAN et M. Franck FONTANILI pour leur disponibilité, leur implication dans le jury et leur intérêt pour mes travaux. Un grand merci pour vos encouragements et vos conseils.

J'exprime ma reconnaissance et mes remerciements à M. Samir LAMOURI pour son soutien, son aide et ses références pertinentes. Un grand merci Samir pour ton soutien toutes ces années.

J'ai beaucoup de reconnaissances envers tout le personnel de l'INSA Hauts-de-France, de l'Université Polytechnique des Hauts-de-France et le LAMIH UMR CNRS 8201. Un grand merci à tous mes collègues (la liste est longue) pour tout ce qu'ils m'apportent au quotidien.

Mes remerciements vont à mes doctorants qui ont contribué à ce travail : Tarek CHAARI, Frédéric BONVOISIN, Farid KADRI, Faiza WALHA, Rachda Naila MEKHALDI, Ali ATTAJER et Salma NISSOUL. Un grand merci pour votre travail et votre sérieux.

Je remercie tous mes co-auteurs pour leur collaboration dans le montage des projets et la rédaction des papiers scientifiques. Un grand merci pour votre confiance et votre implication.

Je tiens à exprimer ma gratitude à M. Alain GUINET, mon directeur de thèse qui m'a fait aimer la recherche et m'a fait découvrir la passion de réaliser des projets scientifiques. Un grand merci Alain pour ton courage et ta sincérité.

Je n'oublie pas M. Pierre BAPTISTE qui m'a accompagnée dans mes premiers pas dans la recherche et dans le génie industriel. Un grand merci Pierre pour ton énergie et ton aide.

Un grand merci à ma mère, ma sœur, mes frères, mes neveux et ma nièce qui ont toujours été là pour moi.

Je termine avec un grand merci à mon amour et mes princesses, vous êtes ma force et ma lumière.



# Table des matières

Remerciements .....	vii
Table des matières .....	ix
Liste des tableaux .....	xiii
Liste des figures.....	xv
Avant-propos .....	19
Introduction générale .....	21
Chapitre 1. Contexte scientifique et positionnement .....	23
1.1. Contexte général des travaux .....	23
1.1.1. Systèmes complexes soumis à perturbation : disciplines, mots clés, terminologies .....	24
1.1.2. Systèmes complexes : définitions et propriétés .....	26
1.2. Les quatre concepts clés supports de nos travaux en génie industriel .....	28
1.2.1. Perturbations .....	28
1.2.2. Performance .....	32
1.2.3. Décisions.....	34
1.2.4. Pilotage .....	37
1.3. Positionnement des travaux et verrous identifiés .....	38
1.4. Conclusion.....	41
Chapitre 2. Approches de pilotage des systèmes de production dans un contexte perturbé : robustesse et résilience.....	43
2.1. Organisation de l'état de l'art.....	43
2.2. Définition des concepts de robustesse et de résilience.....	46
2.2.1. Définition de la robustesse.....	46

2.2.2.	Définition de la résilience .....	49
2.3.	Approches de pilotage des systèmes de production en différentes périodes de perturbation .....	52
2.4.	Evaluation de la robustesse et de la résilience .....	58
2.4.1.	Evaluation de la robustesse .....	58
2.4.2.	Evaluation de la résilience .....	58
2.5.	Contributions nationales internationales .....	59
2.5.1.	Laboratoires de recherche .....	59
2.5.2.	Groupes de recherche .....	66
2.5.3.	Appels à projets .....	67
2.6.	Conclusion .....	68
Chapitre 3.	Contributions scientifiques : Définition et évaluation de la robustesse et de la résilience .....	71
3.1.	Organisation des contributions .....	71
3.2.	Définition des concepts de robustesse et de résilience .....	72
3.2.1.	Définition de la robustesse en ordonnancement des systèmes de production sous incertitudes .....	72
3.2.2.	Résilience des services d'urgences en situation de tension .....	74
3.2.3.	Résilience opérationnelle des systèmes de production .....	76
3.3.	Evaluations de la robustesse et de la résilience .....	77
3.3.1.	Fonction d'évaluation robuste appliqué au problème d'ordonnancement des systèmes de production sous incertitudes .....	77
3.3.2.	Evaluation de la résilience d'un service d'urgences .....	78
3.3.3.	Evaluation de la résilience opérationnelle d'un système cyber-physique de production .....	81
3.4.	Conclusion .....	83
Chapitre 4.	Contributions scientifiques : approches de pilotage .....	85
4.1.	Cadre conceptuel des approches de pilotage d'un système de production soumis à des perturbations .....	85

4.2.	Contributions des systèmes de pilotage dans la phase de pré-perturbation .....	87
4.2.1.	Ordonnancement robuste : cas d'un flow shop hybride.....	87
4.2.2.	Séries chronologiques pour la prévision de nombre d'arrivées journalières au SUP .....	90
4.2.3.	Pilotage Proactif d'un service d'urgence .....	94
4.3.	Contributions des systèmes de pilotage dans la phase de durant l'occurrence des perturbations .....	100
4.3.1.	Approches de détection d'occurrence de situations de tension dans le fonctionnement d'un service d'urgence.....	101
4.3.2.	Détection univariée des arrivées anormales de patients au SUP .....	101
4.3.2.1.	Détection multivariée des demandes de soins au service d'urgence.....	105
4.3.3.	Pilotage réactif de service d'urgence .....	109
4.3.4.	Approche réactive pour l'allocation des PI-Containers.....	114
4.3.5.	Approche réactive basée sur les systèmes multi-agents pour un problème de tournée des soignants en hospitalisation à domicile .....	119
4.3.6.	Pilotage réactif des systèmes cyber-physiques basé sur l'AHP augmentée (A-AHP) et les règles d'expert.....	124
4.4.	Contributions des systèmes de pilotage dans la phase post-perturbations.....	132
4.4.1.	Classification.....	135
4.4.2.	Régression.....	138
4.5.	Synthèse des contributions.....	140
4.6.	Conclusion.....	143
Chapitre 5. Perspectives de recherches scientifiques.....		145
5.1.	Organisation des perspectives de recherche.....	145
5.2.	Amélioration de la résilience des systèmes complexes dans un contexte de perturbations .....	146
5.3.	Approches hybrides de pilotage combinant des techniques d'optimisation, de simulation et d'intelligence artificielle .....	152
5.3.1.	Hybridation locale.....	152
5.3.2.	Hybridation dans le cas de propagation de l'effet d'une perturbation.....	153

5.4.	Intégration de l'humain dans les approches de pilotage des systèmes.....	154
5.4.1.	Apport des approches de la coopération Humain-Machine.....	155
5.4.2.	Amélioration des conditions de travail des opérateurs dans un contexte perturbé .....	156
5.5.	Feuille de route.....	156
5.6.	Conclusion.....	158
	Conclusion générale.....	159
	Bibliographie .....	161
	Liste des publications.....	181
	Revue internationale avec comité de lecture .....	181
	Revue nationale avec comité de lecture.....	182
	Coordination d'ouvrage.....	182
	Chapitre d'ouvrage .....	182
	Conférence internationale avec actes et comité de lecture .....	183
	Conférence nationale avec actes et comité de lecture.....	185
	Séminaire et autres communications .....	187
	Rapport de contrat de recherche .....	187

## Liste des tableaux

Table 2-1. Définition de la « Robustesse » (Stockmann, Winkler, et Kunath 2021). .....	47
Table 2-2. Requête de recherche bibliographique.....	52
Table 2-3. Synthèse des approches de pilotage.....	56
Table 2-4. Projets réalisés avec des laboratoires partenaires. ....	64
Table 3-1. Résilience et domaines d'application (Kadri 2014).....	74
Table 3-2. Notations de la figure 3-7 (Kadri 2014).....	79
Table 4-1. Pourcentage de déviation moyenne de toutes les instances (Chaari 2010). ....	90
Table 4-2. Modèles ARMA retenus. ....	92
Table 4-3. Mesures de validation statistiques appliquées aux données des trois modèles. ....	93
Table 4-4. Scénarios simulés dans le cas des alternatives A. ....	97
Table 4-5. Scénarios simulés dans le cas des alternatives B.....	98
Table 4-6. Scénarios simulés dans le cas des alternatives B.....	107
Table 4-7. Définition des scénarios et alternatives composant les actions correctives. ....	111
Table 4-8. Résultats des approches dans un contexte dynamique pour le taux de remplissage des camions. ....	118
Table 4-9. Résultats des approches dans un contexte dynamique en considérant les distances parcourues. ....	118
Table 4-10. Résultats des tournées des soignants face aux perturbations impactant la durée des trajets. ....	124
Table 4-11. Résultats des mesures de performance globale du système. ....	131
Table 4-12. Description des données PMSI utilisées. ....	134
Table 4-13. Sous-ensemble des variables retenues pour le modèle de prédiction. ....	135
Table 4-14. Mesures d'évaluation pour la classification des DDS. ....	137
Table 4-15. Mesures d'évaluation des algorithmes de régression pour la prédiction des DDS.....	139
Table 4-16. Synthèse de nos contributions (ordre chronologique). ....	140



# Liste des figures

Figure 1-1. Répartition des articles selon les domaines. ....	24
Figure 1-2. Mots clés utilisés.....	25
Figure 1-3. Caractéristiques d'un systèmes complexe (Clemens 2019).....	27
Figure 1-4. Concepts clés, terminologie et typologies. ....	28
Figure 1-5. Multi-dimensions de la perturbation. ....	29
Figure 1-6. Classification des perturbations .....	31
Figure 1-7. Echelle internationale des évènements nucléaires (INES) (IAEA 2008). ....	32
Figure 1-8. Caractéristiques d'une perturbation. ....	32
Figure 1-9. Processus décisionnel.....	36
Figure 1-10. Modèle de l'environnement d'un système de pilotage.....	38
Figure 1-11. Verrous scientifiques.....	39
Figure 1-12. Stratégies de développement des travaux de recherche.....	41
Figure 2-1. Evolution du niveau de performance en fonction du temps et de la période d'une perturbation. ....	44
Figure 2-2. Structuration de l'état de l'art. ....	45
Figure 2-3. Partie 1 : définition de la robustesse et de la résilience. ....	46
Figure 2-4. Répartition des mots clés autour de la « Robustesse ». ....	46
Figure 2-5. Nuage de mots des définitions « Robustesse » dans le domaine de la production.....	48
Figure 2-6. Nombre de publications du concept « Résilience » par année.....	49
Figure 2-7. Domaines de publications du concept « Résilience ».....	50
Figure 2-8. Nuage de mots du concept « Résilience » dans les définitions proposées dans (Davidson et al. 2016).....	50
Figure 2-9. Partie 2 : approches de pilotage de systèmes de production. ....	52
Figure 2-10. Nuages des mots clés des publications. ....	53
Figure 2-11. Laboratoires de recherche français travaillant sur le pilotage des systèmes de production soumis à des perturbations. ....	64
Figure 3-1. Organisation des contributions.....	71
Figure 3-2. Répartitions de nos contributions dans le temps et selon les verrous scientifiques V1 et V2. ....	72
Figure 3-3. Triangle de la performance « Robustesse » pour le pilotage des systèmes de production soumis à des perturbations. ....	73
Figure 3-4. Concepts clés de la résilience d'un service d'urgences (SU).....	75
Figure 3-5. Cadre de la résilience opérationnelle (McFarlane et al. 2018).....	76

Figure 3-6. Fonction robuste.....	77
Figure 3-7. Evolution de la performance d'un SU après l'occurrence d'une perturbation.....	78
Figure 3-8. Procédure générale d'évaluation de la résilience d'un SU.....	80
Figure 3-9. Approche d'évaluation de la résilience opérationnelle d'un CPPS.....	81
Figure 4-1. Organisation des contributions.....	85
Figure 4-2. Répartitions de nos contributions dans le temps et selon les verrous scientifiques identifiés. .....	86
Figure 4-3. Cadre de positionnement des approches de pilotage (Chaabane et Trentesaux 2019). ....	86
Figure 4-4. Algorithme génétique pour l'ordonnancement robuste (Chaari 2010; Chaari et al. 2011).	88
Figure 4-5. Fonction robuste ( <i>makespan</i> ) (Chaari et al. 2011). ....	88
Figure 4-6. Démarche expérimentale pour la validation de l'AG robuste.....	89
Figure 4-7. Résultats de Exemple des 100 réplifications pour le scénario J10c5a2 avec un degré d'incertitude $\alpha$ (resp. 10%, 25% et 50%). ....	89
Figure 4-8. Méthode de modélisation des séries chronologiques en utilisant la procédure de (Box et Jenkins 1976).....	91
Figure 4-9. Paramètres du modèle ARMA (p,q).....	91
Figure 4-10 : Prévission à un horizon $H = 7$ jours, séries G2, G4 et Total. ....	94
Figure 4-11 : Méthodologie de pilotage proactif d'un service d'urgence. ....	95
Figure 4-12 : Processus de prise ne charge des patients au SUP. ....	96
Figure 4-13 : Pilotage proactif de SUP (publiée dans (Kadri, Chaabane, et Tahon 2014a)).....	96
Figure 4-14 : Evolution de l'indicateur PW dans le cas de l'alternative A. ....	97
Figure 4-15 : Evolution de l'indicateur PW dans le cas de l'alternative B.....	98
Figure 4-16 : Evolution de la performance QPW (%) pour les deux scénarios A1 et B3. ....	99
Figure 4-17 : Méthodologie de détection des arrivées anormales des patients dans un SU. ....	102
Figure 4-18 : Evolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une situation anormale (cas A1).....	104
Figure 4-19 : Evolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une situation anormale (cas A2).....	104
Figure 4-20 : Evolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une situation anormale progressive (cas B). ....	105
Figure 4-21 : Méthodologie de détection des demandes de soins anormales des patients dans un SU. ....	106
Figure 4-22 : Diagramme de dispersion des valeurs observées versus les valeurs prédites obtenues à partir du modèle ACP. ....	108
Figure 4-23 : Evolution temporelle de la statistique de la care MCUSUM en présence d'anomalies sur plusieurs jours (cas A).....	109

Figure 4-24 : Evolution temporelle de la statistique de la care MCUSUM en présence d’anomalies sur progressive (cas B). .....	109
Figure 4-25 : Evolution de l’indicateur PW en temps réel. ....	110
Figure 4-26 : Impact de l’ajout d’une IDE à différents temps de lancement. ....	112
Figure 4-27 : Impact de l’ajout d’un médecin à différents temps de lancement. ....	112
Figure 4-28 : Impact des règles de priorité. ....	113
Figure 4-29 : Structure d’un PI-Hub et les distances parcourues. ....	114
Figure 4-30 : Communication entre les agents. ....	115
Figure 4-31 : Déroulement de DMAH .....	116
Figure 4-32 : Architecture globale d’affectation des soignants et de planification des tournées dans un centre de HAD. ....	119
Figure 4-33 : Règles de gestion locales selon le niveau d’autonomie décisionnel des soignants. ....	120
Figure 4-34 : Interactions dans le cas de la règle NPR. ....	121
Figure 4-35 : Interactions dans le cas de la règle NRR. ....	121
Figure 4-36 : Interactions dans le cas de la règle BRR. ....	122
Figure 4-37 : Graphes radars des performances des 4 règles. ....	123
Figure 4-38 : Approche de pilotage réactif adapté de (Attajer 2023). ....	125
Figure 4-39 : Mécanisme décisionnel basé sur l’AHP augmentée (A-AHP) (Attajer et al. 2022b). ....	126
Figure 4-40 : Exemples de prise de décision basée sur des règles (Attajer et al. 2022b). ....	127
Figure 4-41 : Plateforme S.MART de l’Université Polytechnique Hauts-de-France. ....	128
Figure 4-42 : Résultats de la simulation pour l’Expérience#1 (Attajer et al. 2022b). ....	129
Figure 4-43 : Résultats de la simulation pour l’Expérience#2 (Attajer et al. 2022b). ....	130
Figure 4-44 : Résultats de la simulation pour l’Expérience#3 (Attajer et al. 2022b). ....	131
Figure 4-45 : Déroulement d’un séjour hospitalier (Mekhaldi 2022). ....	133
Figure 4-46 : Processus de prédiction de DDS avec les techniques d’apprentissage automatique. ....	134
Figure 4-47 : Matrice de confusion. ....	136
Figure 4-48 : Résultats de la « précision globale » des trois algorithmes. ....	137
Figure 4-49 : Evaluation des modèles de prédiction de DDS. ....	139
Figure 4-50 : Evaluation des approches de résolution des problèmes de pilotage des systèmes de production de biens et de services. ....	142
Figure 5-1. Organisation des perspectives de recherche. ....	146
Figure 5-2. Thèmes de l’action pour l’organisation des travaux et des résultats. ....	147
Figure 5-3. Nombre de publications par année (web of science : titre = “Resilience” and “Robustness”). .....	148
Figure 5-4. Framework de la définition et l’évaluation de la résilience adapté de (Morisse et Prigge 2017). ....	149

Figure 5-5. Représentation graphique de la « Résilience » (Mujjuni et al. 2021).....	150
Figure 5-6. Vers une Total Productive Resilience. ....	151
Figure 5-7. Architecture fonctionnelle de système d'aide à la décision pour le pilotage d'un système de production soumis à des perturbations. ....	153
Figure 5-8. Propagation de l'impact d'une perturbation. ....	154
Figure 5-9. Répartition dans le temps des perspectives de recherche. ....	157
Figure 5-10. Perspectives de dépôts de projets. ....	157

## Avant-propos

En 1999 étudiante en 3<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieurs en Informatique à l'Ecole Nationale des Sciences Informatiques (ENSI) en Tunisie, j'ai suivi en parallèle un DEA (Diplôme d'Etudes Approfondies) en Informatique dans le cadre d'une école doctorale commune entre l'ENSI et la faculté des sciences en informatique de Tunis. Ce DEA m'a permis de m'initier à la recherche et de découvrir la spécialité du Génie Industriel. J'ai réalisé mon premier projet de recherche sur l'ordonnancement des machines parallèles non liées sous la direction de Pr. Pierre Baptiste et Pr. Mohamed Moalla, que j'ai soutenu en octobre 2000. Ce projet m'a offert l'opportunité de réaliser une thèse de doctorat (bourse de la région Rhône-Alpes) sous la direction du Pr. Alain Guinet à l'INSA de Lyon sur un sujet passionnant : « gestion prédictive des blocs opératoires » que j'ai soutenue en juillet 2004.

Après une année d'ATER à l'Université Claude Bernard à Lyon, une année de post-doctorat à l'Université Catholique de Louvain à Mons en Belgique et une année d'ATER à l'Université Jean-Monnet à Saint-Etienne (IUT de Roanne), j'ai été nommée maître de conférences en septembre 2006 à l'Université Polytechnique Hauts-De-France, à l'ENSIAME (Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs en Informatique, Automatique, Mécanique, Energétique et Electronique) devenue depuis septembre 2019 l'INSA Hauts-de-France. J'ai eu l'opportunité d'enseigner des matières en adéquation avec mes activités de recherche dans le domaine du Génie Industriel comme l'ordonnancement, la recherche opérationnelle, le pilotage de la performance et la simulation.

Mes activités de recherche sont menées dans l'équipe de Pr Damien Trentesaux au département « automatique » du LAMIH CNRS 8201 sur le thème SIC : Systèmes Intelligents Coopérants. Je me suis intéressée aux problématiques de pilotage des systèmes de production de biens et de services soumis à des perturbations opérationnelles et fréquentes. J'ai développé des approches de pilotage couplant des techniques d'optimisation et de simulation au début de ma carrière. Ensuite j'ai intégré des modèles de prédiction et des algorithmes d'intelligence artificielle pour tirer profit des données collectées des systèmes de production grâce aux nouvelles technologies.

Lors de mes travaux de thèse, j'ai passé 3 ans d'immersion dans un hôpital ce qui m'a permis de découvrir un domaine applicatif, le domaine hospitalier ou plus largement le domaine de la santé, riche en problématiques et en challenges scientifiques. J'ai gardé ce domaine tout au long de mes travaux de recherche. Je suis intéressée également aux systèmes industriels et manufacturiers avec une évolution des méthodes et des techniques de résolution adaptée au contexte technologique apporté par l'industrie 4.0.



# Introduction générale

Les systèmes complexes évoluent dans un contexte dynamique et rencontrent différents types de perturbations et d'incertitudes impliquant diverses ressources et entités qui interagissent les unes avec les autres. Les systèmes socio-techniques répondent à ces mêmes caractéristiques. Ils doivent être capables de faire face aux différentes perturbations, qu'elles soient prévues ou imprévues. Ces perturbations sont devenues la norme et peuvent survenir à n'importe quel moment dans le cycle de vie des produits, impactant ainsi le bon fonctionnement de système et de sa performance. Nos recherches s'intéressent au pilotage des systèmes de production dans ce contexte perturbé. Notre objectif est d'assurer et d'améliorer la robustesse et la résilience de ces systèmes, deux concepts clés de nos travaux. Nos activités de recherche se sont focalisées autour de la robustesse et la résilience, et des trois phases caractérisant l'occurrence de la perturbation : avant, pendant et après l'occurrence de la perturbation.

Ce rapport détaille mes travaux de recherche organisés en cinq chapitres. Le premier chapitre, intitulé « Contexte scientifique et positionnement », présente le contexte général de nos travaux de recherche. Il détaille les éléments clés et les concepts associés. Il termine par l'exposition des verrous scientifiques qui nous ont intéressés. Le second chapitre, intitulé « Approches de pilotage des systèmes de production dans un contexte perturbé : robustesse et résilience », est consacré à l'état de l'art relatif aux verrous scientifiques identifiés. Il permet de lister les travaux issus de la communauté nationale et internationale traitant des problématiques scientifiques relatives à nos travaux de recherche. Le troisième chapitre, intitulé « Contributions scientifiques : Définition et évaluation de la robustesse et de la résilience », présente mes contributions sur la définition et l'évaluation des deux concepts clés : la robustesse et la résilience. Le chapitre 4, intitulé « Contributions scientifiques : approches de pilotage », détaille les approches de pilotage développées dans les différents projets scientifiques et les thèses co-encadrées. Le chapitre 5, intitulé « Perspectives de recherches scientifiques », présente nos perspectives de recherche pour les années à venir autour de 3 projets de recherche.



# Chapitre 1. Contexte scientifique et positionnement

## Objectifs du chapitre

*Ce chapitre a pour objectif de présenter le contexte de nos travaux de recherche et leur positionnement. Le contexte général sera présenté en premier lieu afin de définir les éléments clés de notre recherche. Ensuite, les éléments clés seront détaillés dans les différentes sections. Enfin les verrous scientifiques auxquels nous nous sommes intéressés seront exposés.*

## 1.1. Contexte général des travaux

Cette section présente le contexte général dans lequel s'inscrit nos recherches. Les éléments clés qui en découlent sont alors définis.

Dans nos travaux de recherche, nous considérons des systèmes composés d'entités de nature diverses, physiques, digitales et humaines qui décident et interagissent afin d'atteindre un objectif global. Pour atteindre cet objectif, nous nous sommes intéressés plus précisément au mécanisme de pilotage qui se base sur un ensemble de décisions prises par ces entités élaborées à partir d'indicateurs de performances. Ces indicateurs sont mesurés à partir de l'observation de certains états de ce système global. Ces états et décisions sont supposés être soumis à perturbations qui sont non nécessairement toutes observables. Les applications considérées de nos travaux peuvent être des systèmes de production, de logistique ou des systèmes offrant des services (de transport, hospitalier, etc.).

La nature même des systèmes considérés et les caractéristiques des perturbations qu'ils subissent compliquent fortement l'élaboration des décisions de pilotage. De notre point de vue, le contexte théorique de nos travaux relève du cadre des systèmes complexes soumis à perturbations. Nous nous proposons de décrire ce contexte théorique avant de revenir plus en détail sur les concepts clés relevant de nos travaux. Pour ce faire, une première analyse très globale a été menée pour identifier les différentes disciplines traitant des systèmes complexes soumis à perturbation en mettant en avant les principaux mots clés et termes utilisés. Suite à cette analyse, nous proposerons de caractériser la notion de système complexe selon notre point de vue.

### 1.1.1. Systèmes complexes soumis à perturbation : disciplines, mots clés, terminologies

La notion de système complexe soumis à perturbation est très générique et concerne de nombreux domaines et secteurs d'activités (Norman et Stappers 2015) comme par exemple les systèmes manufacturiers, les systèmes hospitaliers, les systèmes de transport, les systèmes d'implémentation de politique gouvernementale... Pour identifier les domaines scientifiques traitant de ce concept, nous avons effectué une recherche sur scopus en utilisant les mots clés suivants identifiés comme étant représentatifs de notre recherche bibliographique : “Complex system\*” OR “Disruption\*” OR “Disturbance\*” OR “risk\*” OR “uncertain\*” OR “event\*”, pour la période allant de 2015 à fin 2022. Un peu plus de 77 000 articles ont été recensés. La figure 1-1 présente la répartition de ces articles par domaine montrant une diversité des domaines et des secteurs d'activités des systèmes complexes et les perturbations qui seront prises en compte. On remarque que la notion de complexité est étudiée majoritairement en ingénierie, dans le domaine informatique et le domaine médical.

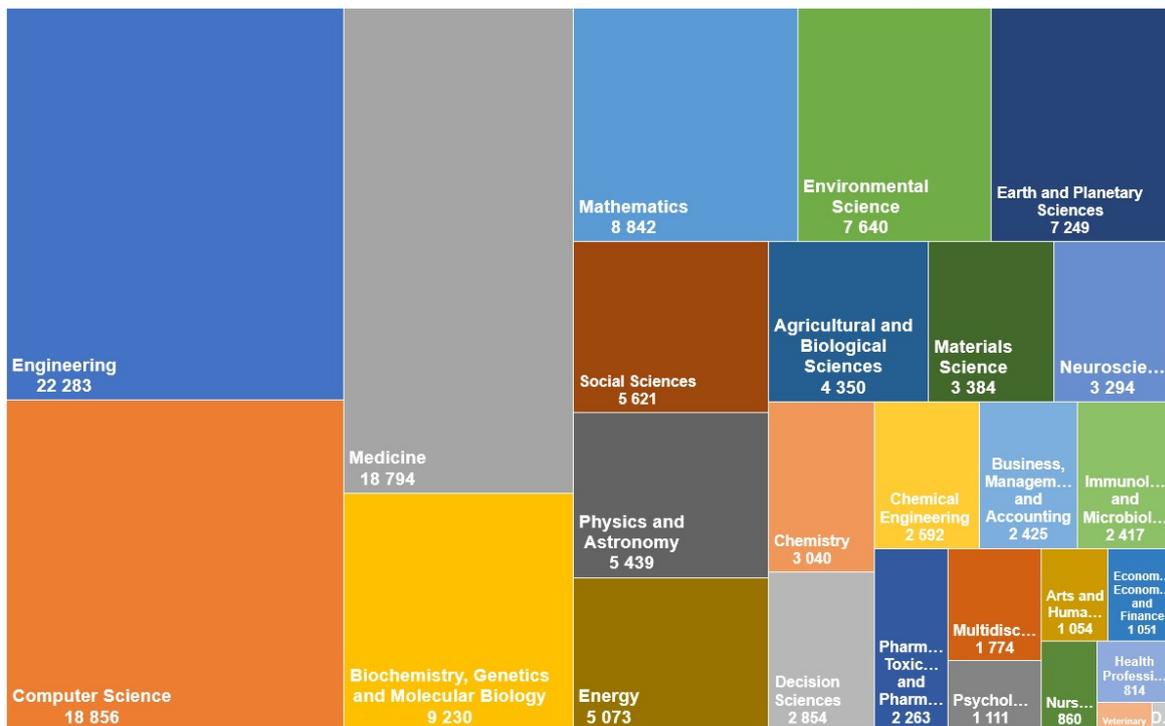


Figure 1-1. Répartition des articles selon les domaines.

La figure 1-2 présente une visualisation des mots clés utilisés à partir des 2000 premiers articles identifiés dans notre recherche *scopus* illustrant ainsi la variation termes utilisés par les auteurs de ces papiers faisant référence aux perturbations, aux problématiques et aux approches développées.



appliquées avant l'occurrence de la panne, pendant la panne et après la panne. Un autre exemple concerne les délais d'approvisionnement qui peuvent affecter le bon déroulement de la production des produits. Des travaux s'intéressent alors à mettre en place des stratégies d'anticipation pour faire face à ces perturbations.

En conclusion sur cette étude relativement large, nous avons constaté l'abondance des travaux traitant des systèmes complexes soumis à perturbations ces dernières années, dans différents domaines et secteurs d'activité. De nombreux termes ont été employés pour traiter le concept de perturbation.

Nous nous proposons dans la partie suivante de spécifier plus précisément cette notion de système de complexe dans le cadre de nos travaux relevant du génie industriel. Nous constaterons que le concept de perturbations fait partie intrinsèque du concept de système complexe lui-même.

### 1.1.2. Systèmes complexes : définitions et propriétés

Les systèmes complexes sont caractérisés par un grand nombre d'entités qui interagissent de manière non linéaire entre elles. (Simon 1962) définit ces systèmes comme suit : *“Roughly, by a complex system I mean one made up of a large number of parts that interact in a non-simple way”* (*“Par système complexe, j'entends un système composé d'un grand nombre de parties qui interagissent de façon non triviale. »*). A partir de cette définition des auteurs ont essayé de définir de tels systèmes et de présenter leurs caractéristiques. (Boes et Migeon 2017) présentent la complexité des systèmes comme étant la difficulté d'analyser ces systèmes et de prédire leur comportement. Ces systèmes sont composés d'un grand nombre d'entités interreliés et interagissant entre elles de façon non-linéaire (Kamissoko et al. 2015; Chimeh et Richmond 2018). Ils peuvent également être en relation avec d'autres systèmes et leurs environnements (Chiva, Ghauri, et Alegre 2014). (Zolghadri et al. 2014) présentent les caractéristiques suivantes d'un système complexe : (1) grand nombre de modules physiques et fonctionnels (2) niveau d'effort élevé pour comprendre, modéliser et analyser le système (3) des connaissances multidisciplinaires et intensives (4) grand nombre d'intervenants impliqués (5) des données et des connaissances distribuées et rarement détenues par une seule personnes (6) grand niveau de dynamisme.

(Clemens 2019) présente les caractéristiques d'un système complexe dans la figure 1-3 englobant différents axes et entités.

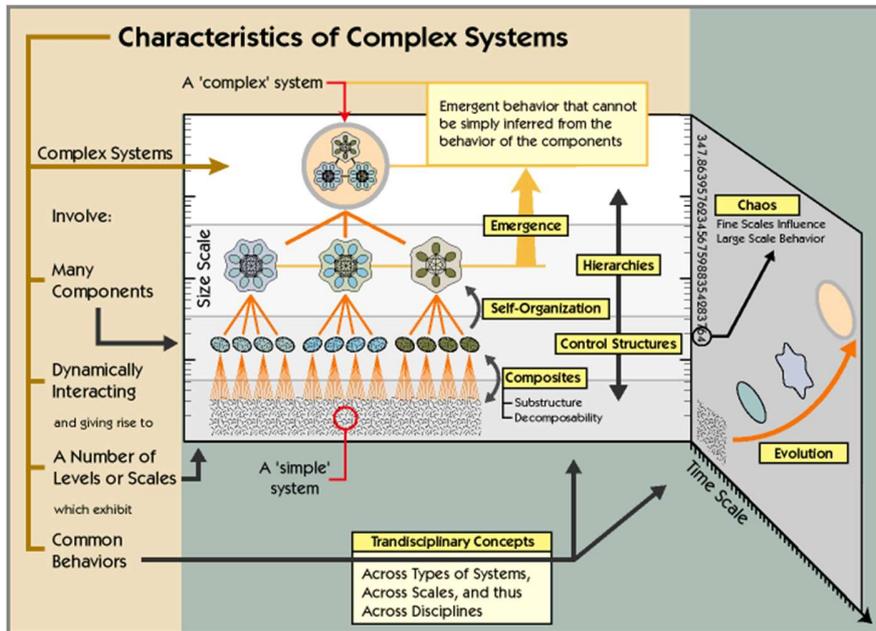


Figure 1-3. Caractéristiques d'un systèmes complexe (Clemens 2019).

Ces différents travaux nous permettent d'identifier les caractéristiques fondamentales d'un système complexe :

- **Une large quantité d'entités impliquées** : différents types d'entités (personnes, ressources, machines objets, ...) interagissent dynamiquement et à plusieurs niveaux et échelles selon des comportements communs qui pourront être traduits par des objectifs communs ou des performances communes à atteindre pour le système global.
- **Des systèmes soumis à perturbation** : les systèmes complexes évoluent dans le temps en réponse à des différentes sollicitations comme les perturbations, les incertitudes ou les événements imprévus ...
- **Une somme systémique** : un grand nombre d'entités est impliqué dans ces systèmes et le comportement global ne peut pas être déduit simplement de la somme des comportements des entités le composant.
- **Capacité d'adaptation à son environnement et auto-organisation** : capacité de décider des modifications à apporter à son propre comportement pour s'adapter à son environnement et répondre aux différentes perturbations et sollicitations.
- **Difficulté de prédiction des états** : capacité de changer son état, pas de linéarité de fonctionnement (résultats inconnus, mesures imprévisibles...), structure et interactions réparties et non hiérarchisées
- **Une large quantité de données, informations et connaissances intégrées ou à gérer** : connaissances, données et information intensives et multidisciplinaires provenant des entités, des sous-systèmes et des décisions impliqués dans l'évolution dynamique des systèmes complexes.

Nos travaux de recherche entrent dans les domaines de l'ingénierie et englobent plus particulièrement les domaines scientifiques relevant du génie industriel. La complexité des systèmes est appréhendée par les entités impliquées, les facteurs externes perturbant le fonctionnement du système et l'évolution des performances du système dans le contexte perturbé. A partir de la section suivante, notre discours sera essentiellement relatif au domaine du génie

industriel. Nous allons étudier plus en détail quatre concepts clés permettant de préciser les contours de nos travaux de recherche.

## 1.2. Les quatre concepts clés supports de nos travaux en génie industriel

Cette partie va nous permettre de borner le cadre dans lequel s'inscrit nos travaux et contributions. Elle est structurée autour de l'étude des quatre concepts clés que nous avons identifié qui relèvent de notre section disciplinaire, celle de l'automatique : performance, perturbation, décision et pilotage. D'autres concepts clés ne relevant pas directement de notre section peuvent bien évidemment être identifiés et ne seront pas traités. Ils concernent par exemple le volet humain (psychologie cognitive, management organisationnel), financier (salarial, actionnariat), électronique (technologies numériques), etc.

La figure 1-4 illustre visuellement, sous la forme d'une carte mentale, ces concepts clés. Sont représentés les terminologies et typologies qui leurs sont propres.

Les sections suivantes contiennent une étude (définitions, typologies) de ces quatre concepts.

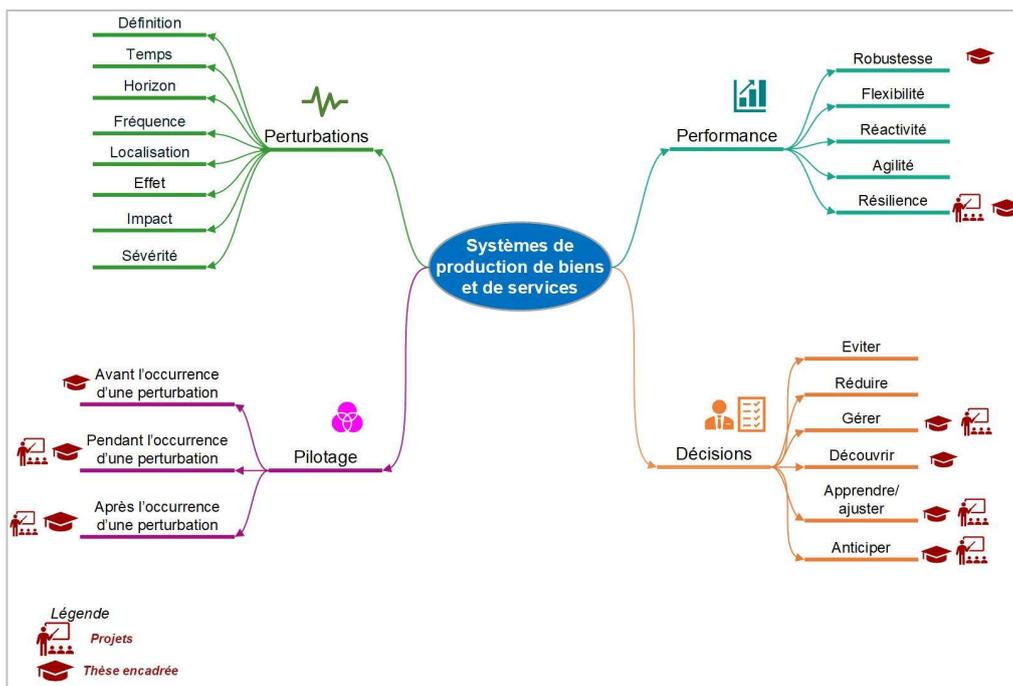


Figure 1-4. Concepts clés, terminologie et typologies.

### 1.2.1. Perturbations

Larousse définit les perturbations comme étant le *dérèglement dans un fonctionnement, un organisme, un système*. Dans le dictionnaire d'Oxford, les perturbations sont définies comme des problèmes interrompant un événement, une activité ou un processus. Vu le nombre de termes utilisés dans la littérature scientifique, il était nécessaire de bien définir le terme à employer pour désigner le contexte perturbé des systèmes complexes. Nous avons choisi le terme « perturbation ».

Nous définissons une perturbation comme étant un événement prévu ou inattendu qui peut dégrader les performances d'un système (pannes de machines, pannes de ressources, manque de matériaux...) ou les améliorer (occasion d'évoluer et de développer de nouvelles pratiques et innovations : demandes croissantes, nouveaux clients...). Cette définition insiste sur la double face de la perturbation : menace ou opportunité (Zitzmann 2014). Mais quel que soit son type, la perturbation contribuera à la complexité des systèmes et impactera leurs performances.

La perturbation est une notion multi dimensionnelle (figure I-5) :

- **Temps** : cette dimension est relative à la notion de temps en rapport avec la perturbation, comme par exemple à quel moment la perturbation est détectée ? A quel moment la perturbation est prise en compte ? ...
- **Horizon** : cette dimension est relative à l'horizon de la prise en compte de la perturbation. Elle concerne les niveaux décisionnels : stratégique (long terme), tactique (moyen-terme) et opérationnel (court-terme).
- **Fréquence** : la notion de fréquence nous indique la répétitivité de cette perturbation. Une perturbation fréquente ne sera pas traitée de la même façon qu'une perturbation occasionnelle voire exceptionnelle.
- **Localisation** : cette dimension est relative à la localisation géographique de la perturbation dans le système, est ce qu'elle est locale ou globale ? est ce qu'elle concerne un composant particulier ou tout un ensemble ? ...
- **Effet** : cette dimension est relative à ce qui est produit par la perturbation. C'est la conséquence de la perturbation.
- **Impact** : cette dimension est relative au résultat de l'effet de la perturbation sur le système étudié.
- **Sévérité** : cette dimension indique la dangerosité de la perturbation et son résultat sur le système.

Nous détaillons plus en avant ces dimensions dans la suite de la section.



Figure 1-5. Multi-dimensions de la perturbation.

Historiquement, les perturbations ont été considérées comme étant des événements occasionnels. Mais de nos jours les perturbations sont devenues « la norme » (Skobelev et Trentesaux 2017) et ceci s'explique par les nouvelles contraintes de la concurrence, la nervosité dans le comportement des clients, les nouvelles exigences de l'environnement, la complexité des processus, ... Les perturbations sont partout et tout au long de cycle de vie des produits, des

systèmes et des organisations de la conception à l'exploitation et jusqu'au démantèlement ou recyclage. Elles concernent tous les niveaux décisionnels : stratégique (long-terme), tactique(moyen-terme), opérationnel (court-terme) et temps-réel (très court-terme). Évoluant dans un environnement perturbé et faisant intervenir une variété d'entités hétérogènes en interaction de façon distribuée et non prédictible, les systèmes complexes doivent être capables de détecter les perturbations et de réagir de façon rapide et efficace à ces perturbations pour maintenir ou retrouver un état stable et performant.

Différents vocabulaires ont été utilisés dans la littérature pour faire référence aux perturbations. (Sheard 2008) présente plusieurs termes pour définir les événements qui perturbent le bon fonctionnement d'un système comme par exemples : perturbations, changements, défaillances, pannes, événements imprévus, risques. Dans le domaine de la chaîne logistique, (Zitzmann 2014) utilise le terme « incertitudes » faisant référence aux perturbations avec ses deux faces : le risque (incertitude avec une probabilité et un résultat négatif) et la chance (incertitude sans probabilité et un résultat positif). Dans le même domaine, (Ivanov 2018) décrit de façon plus précise les incertitudes selon les termes suivant :

- (1) Incertitudes : terme général utilisé dans n'importe quel système. Ces incertitudes peuvent être amplifiées ou réduites.
- (2) Risques : résultants des incertitudes, ils peuvent être identifiés, analysés, contrôlés et régulés.
- (3) Perturbations : résultants des risques, ils peuvent être prévus ou évités par des mesures d'adaptation du système.

Pour nos travaux, nous définissons les perturbations comme étant des événements prévus ou imprévus qui perturbent le bon fonctionnement des systèmes et qui nécessitent des mesures d'adaptation du système pour y faire face.

La perturbation peut être de différents types et causée par plusieurs sources. S'inspirant des travaux de (Westrum 2006) concernant les menaces, nous avons identifié trois grandes classes de perturbations :

- (1) **Perturbations régulières** : se produisent régulièrement. Ce sont des perturbations connues et déjà rencontrées et la plupart de temps elles sont prévisibles. Exemples: pannes de machines, disponibilité des opérateurs, nouvelles demandes...
- (2) **Perturbations irrégulières** : se produisent rarement et elles coûtent cher à prévoir. Exemples : accidents, dangers naturels...
- (3) **Perturbations sans précédent** : Ce sont des événements inattendus qui se produisent sans précédent. Exemples: crise financière, attentats, COVID-19...

(Namdar et al. 2018) considèrent deux classes de perturbations :

- (1) **Perturbations fréquentes avec un impact mineur** : ce sont des risques au niveau opérationnel relatifs à une faible coordination entre les entités de la chaîne logistique. Exemple : disparité entre l'offre et la demande, pannes des machines, fluctuation de la demande...
- (2) **Perturbations peu fréquentes avec un impact majeur** : Ce sont des risques causés par des problèmes sévères comme un attentat ou une explosion avec des conséquences socio-économiques très graves et un temps de récupération très long.

Une autre classe de perturbations concerne les « crises » définies comme étant des **perturbations difficiles à prévoir** et qui impactent un système dans sa globalité et menacent son

bon fonctionnement (Hetu et al. 2018). Les crises peuvent avoir un effet en cascade si elles sont mal gérées. Les crises exigent une action rapide pour atténuer leurs effets et impacts. La gestion des crises s’articule autour d’un ensemble de mesures directes prises pour se préparer, réagir à la crise et atténuer ses effets.

Inspirée de la matrice des risques, la matrice présentée dans la figure 1-6 résume ces différents types de perturbations selon leurs fréquences et impacts.

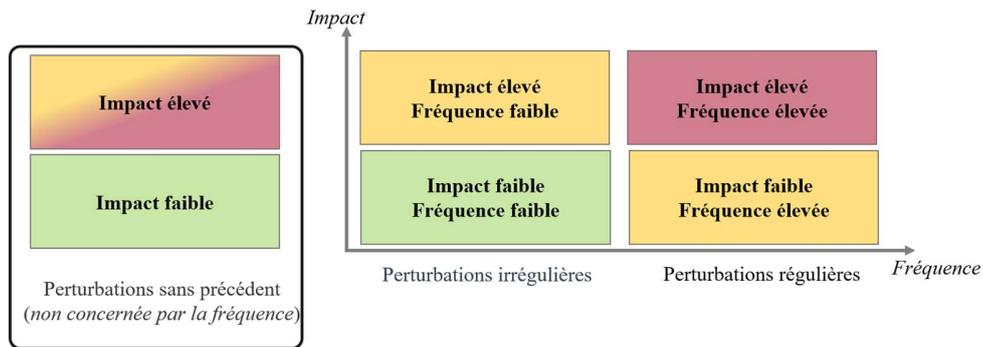


Figure 1-6. Classification des perturbations

Une perturbation peut avoir un effet défini par son niveau de propagation dans le système. Ces effets dépendent de type de la perturbation, de sa fréquence et de son impact. Nous pouvons citer à titre d’exemple “Effet coup de fouet” (en anglais : “*Bullwhip effect*”), très connu en supply chain, qui concerne des perturbations et des risques récurrents rencontrés au niveau opérationnel comme par exemple : la fluctuation des demandes journalières ou hebdomadaires, les délais, les inventaires... (Ivanov 2018). Nous trouvons également l’“Effet de vague” (en anglais : “*Ripple effect*”) qui concerne des perturbations à faible fréquence mais avec un impact fort et le système nécessitera une longue période et de grands investissements pour récupérer ses performances (Dolgui, Ivanov, et Sokolov 2018). L’“Effet boule de neige” (en anglais : “*Snowball effect*”) concerne l’amplification de l’impact d’une perturbation durant la transmission tout au long de la chaîne logistique (Świerczek 2014). L’“Effet Domino” (en anglais : “*Domino effect*” (or “*Cascading effect*”)) concerne généralement les perturbations avec une faible fréquence et un impact majeur rencontrées dans les processus industriels (par exemple : une explosion, un incendie...). Il en résulte une escalade des effets d’un incident initial et la propagation des événements impliquant d’autres unités avec des conséquences plus sévères que l’accident initial (Khakzad 2015; Reniers et Cozzani 2013). Enfin, l’“Effet papillon” (en anglais : “*Butterfly effect*”) qui concerne les conséquences imprévisibles des événements extrêmes résultant d’un changement insignifiant des conditions initiales (Sun et al. 2016).

Une perturbation peut avoir un niveau de sévérité qui peut varier de simple anomalie à une situation de crise. Pour illustrer ce propos nous pouvons se référer à l’échelle internationale des événements nucléaires et radiologiques dite échelle *INES* (*International Nuclear Event Scale*) proposée par l’Agence Internationale de l’énergie atomique (IAEA 2008) et présentée dans la figure 1-7.

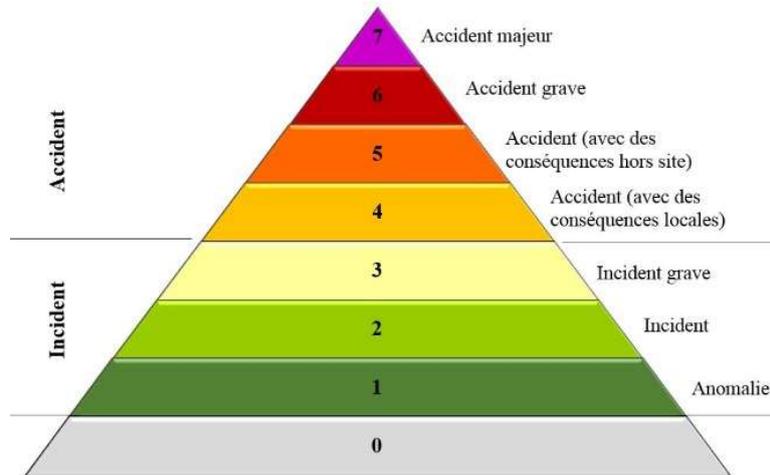


Figure 1-7. Echelle internationale des événements nucléaires (INES) (IAEA 2008).

Les différentes dimensions de la perturbation présentées dans la figure 1-5 nous ont permis d'identifier les caractéristiques d'une perturbation. Ces caractéristiques constituent des éléments essentiels nous permettant de savoir ce qui peut perturber le bon fonctionnement d'un système et causer les écarts avec les performances optimales attendues. Nous détaillons ces caractéristiques dans la figure 1-8.

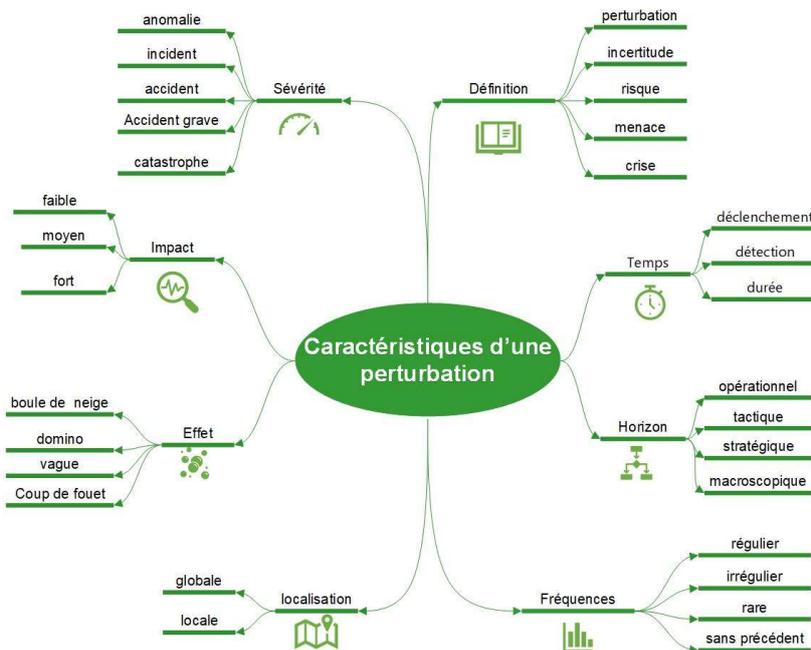


Figure 1-8. Caractéristiques d'une perturbation.

### 1.2.2. Performance

**La performance industrielle** est un concept associé à un objectif et une mesure, « *une entreprise performante est une entreprise qui atteint les objectifs qu'elle annonce* », pourvu que

ces objectifs soient cohérents avec le contexte de l'entreprise (Berrah 2002). D'après (Mélèse 1991) les objectifs sont des « *buts précis à atteindre dans un temps donné* ». Ils précisent les buts par des critères d'évaluation assortis d'un niveau à atteindre. Ils se réfèrent à des plans ou normes et sont, à leur tour, déclinés en sous-objectifs (Berrah 2013).

La performance est le résultat d'une comparaison de l'objectif et la mesure de son atteinte (Hamadmad 2017). Dans un contexte industriel, l'objectif d'un décideur ou d'un manager est d'augmenter ou améliorer les performances du système (OECD 2019). Cette performance s'est traduite classiquement par le triptyque (*Efficiency – Efficacy – Pertinence*). L'*efficacité* est définie comme étant la réalisation des objectifs en comparant les résultats obtenus aux résultats attendus (Neely, Gregory, et Platts 1995). L'*efficience* est le rapport entre les ressources (humaines, matérielles financières...) mises en œuvre et les résultats obtenus (Neely, Gregory, et Platts 1995). Enfin, la *pertinence* est l'adéquation entre les ressources mobilisées et les objectifs atteints (Berrah 2013).

D'autres objectifs concernent plus spécifiquement les perturbations et la manière de les gérer. Citons par exemple :

- la « *robustesse* », définie comme étant la capacité d'un système à maintenir ses performances et être insensible aux perturbations (Monostori 2018; Zitzmann 2014; Behzadi et al. 2017; Chaari et al. 2014).
- La « *flexibilité* », définie comme la capacité d'un système à prévoir de multiples moyens pour réussir son activité assurant ainsi sa capacité à changer d'organisation ou de processus pour répondre aux perturbations (Dolgui, Ivanov, and Sokolov, 2018).
- La « *réactivité* », définie comme la capacité d'un système à réagir à une perturbation en temps utile (Dreyer et al. 2015).
- L'« *innovation* », définie comme la capacité à mettre en place des nouveaux systèmes ou des nouvelles pratiques pour des systèmes existants (Alberts et Hayes 2003).

Ces deux derniers objectifs ne se réfèrent pas directement aux perturbations mais au changement. Cependant, nous considérons qu'un système peut faire face à un changement causé par les perturbations.

Certains travaux se basent sur l'objectif fédérateur d'agilité, défini comme la capacité à répondre rapidement et efficacement à tous types d'incertitudes (Shekarian, Nooraie, et Parast 2019). L'agilité intègre donc les objectifs présentés plus hauts (robustesse, réactivité, flexibilité ...) (Alberts et Hayes 2003).

Ces dernières années, un nouvel objectif a émergé. Il s'agit de la notion de « *résilience* » définie par la capacité d'un système à ajuster son fonctionnement avant, pendant et après l'occurrence des perturbations ou des événements imprévus (Hollnagel et al. 2011). Ce concept se base sur la capacité d'un système à anticiper les perturbations, à y répondre, et à récupérer ses fonctionnalités rapidement.

### 1.2.3. Décisions

La performance correspond à des objectifs précis, et face aux perturbations, et au travers de ses décisions, le système complexe doit être en mesure d'y répondre et d'y faire face afin de réaliser ses missions dans les meilleures conditions tout en assurant ses performances.

Définir ce qu'est une décision est délicat. Ce concept clé est à la frontière de plusieurs sciences (celles de l'optimisation, de l'analyse multicritère) et relève clairement de la dimension humaine. De nombreux paradoxes sont aussi identifiables dès lors que l'on considère possible ou impossible une prise de décision automatique, par un système non humain (certains chercheurs considèrent que la décision est le propre de l'homme). Sans vouloir entrer dans ce débat, il nous semble important de définir ce concept de décision. Par exemple, pour (Derigent, Cardin, et Trentesaux 2021) décider consiste essentiellement à réduire un ensemble de possibilités à un singleton (choix d'une alternative) selon différents critères. De notre point de vue, nous définissons une décision comme étant une action développée et mise en place par le décideur afin de répondre aux objectifs recherchés et de réagir aux perturbations.

Ainsi l'humain joue un rôle central dans la prise de décision dans les systèmes complexes, identifié comme le décideur ou le manager du système. Il évalue les situations auxquelles le système est confronté en se basant sur les objectifs définis et les performances attendues (Berrah 2013). Des études en ergonomie cognitive ont montré que dans les situations habituelles en absence de perturbations, les activités humaines sont fondamentalement anticipatrices, reposant sur la capacité cognitive de l'homme à s'adapter à la situation et à anticiper les incidents en se basant sur ses attentes en termes de décisions (Hoc et al. 2004; Hoc et Amalberti 2007; Rasmussen 1997).

En situation perturbée, il est plus compliqué pour l'opérateur humain ou le décideur de faire des hypothèses puisque l'environnement est moins prédictible (Kahneman et Tversky 1982). Ceci contredit la vision irréaliste de l'humain ou du décideur comme étant un "humain magique" (« *magic human* ») capable de réagir à des perturbations ou des événements imprévus (Pacaux-Lemoine et al. 2017). L'« humain magique » devient l'élément central de la prise de décision dans le contexte perturbé. Dans ce cas, l'humain (gestionnaire, superviseur, opérateur...) doit être capable de détecter la perturbation et de réagir rapidement et efficacement pour permettre au système de retrouver un état stable et maîtrisé. (Namdar et al. 2018) ont identifié "l'attitude de manager vis-à-vis des risques ou des perturbations". Cette notion d'attitude aura un impact dans la manière dont le décideur aura à gérer la perturbation dans le système étudié. Le décideur a ainsi son propre contexte (expérience, émotion, connaissances...) et sa propre attitude vis-à-vis de l'environnement perturbé. Dans certaines situations il peut par exemple décider de faire abstraction de la perturbation et continuer à appliquer les décisions déjà prises sans tenir compte de la perturbation. Dans d'autres situations, il peut décider d'intégrer la perturbation dans la prise de décision et même de l'anticiper. (Ramezani et Camarinha-Matos 2020) ont ainsi défini la notion d'« espace de décision » (« *Decision space* »). Ce sont les types de stratégies à développer pour répondre aux perturbations :

- **Eviter** - "*avoiding*": cette stratégie doit permettre de prévenir l'occurrence de la perturbation.
- **Réduire** - "*reducing*": cette stratégie doit permettre de réduire l'impact de la perturbation.
- **Gérer** - "*managing*": cette stratégie doit permettre de gérer le système et son environnement.
- **Découvrir** - "*discovering*" (*understanding the environment*): cette stratégie doit permettre de détecter les origines de la perturbation et d'évaluer la manière dont le système est amené à évoluer.
- **Apprendre/Ajuster** - "*Learning/Adapting*" : cette stratégie doit permettre d'apprendre de ce qui s'est passé et de réaliser des ajustements du système pour anticiper les futures perturbations.

- **Rien faire** - “*do nothing*”: cette stratégie est d’accepter les perturbations et ne faire aucune modification de ce qui a été prévue.

En science cognitive, (Rasmussen 1983) a défini trois niveaux de contrôle conscient exercé par un individu sur une activité selon son degré de familiarité avec le système et l’environnement. Il a ainsi défini le « *Skill-based behavior* » comme étant un comportement basé sur les compétences où la décision est prise sans contrôle conscient en se basant sur des actions préétablies et automatisées. Le niveau suivant est le « *Rule-based behavior* » comme étant un comportement basé sur des règles décrivant des situations familières construites à partir de savoir-faire d’autres individus ou préparées à l’occasion par la résolution consciente du problème rencontré. Or dans des situations non familières et face à un environnement pour lequel aucune règle de contrôle ni de savoir-faire ne sont disponibles, la décision doit se baser sur un niveau conceptuel plus élevé basé sur les connaissances et nommé « *Knowledge-based behavior* ». Ces travaux constituent un vaste domaine qui n’entrent pas dans nos travaux mais qui pourraient faire partie de nos perspectives de recherche.

Les perturbations provoquent la plupart de temps des situations nécessitant des réactions et peuvent se référer au concept de « prise de conscience de la situation » (« *situation awareness* ») (SA). Pour de telles situations, (Endsley 1995) a proposé un modèle d’aide à la décision composé des étapes suivantes : (1) la perception des données et des éléments actuels de la situation et du système ; (2) la compréhension de la situation et (3) la projection dans le futur des états et des événements. Ces travaux constituent un domaine intéressant pour le contexte décisionnel d’un système complexe soumis à des perturbations, mais nos travaux s’orientent vers la question suivante : « comment apporter une aide au décideur pour réussir à faire face à ce contexte perturbé dans sa prise de décision ».

Afin de voir l’articulation des décisions par rapport aux performances et aux perturbations, nous adoptons la définition d’un processus décisionnel proposée par (Simon 1962; Turban 1993; Turban, Sharda, et Delen 2011) qui se compose de cinq étapes :

- **Intelligence** (« *Intelligence* ») : identifier les situations nécessitant de prendre des décisions. Cette étape nécessite de collecter les données et les connaissances nécessaires pour comprendre le fonctionnement du système étudié et les perturbations impliquées.
- **Conception** (« *Design* ») : le décideur formalise et modélise les connaissances collectées et les perturbations détectées de façon à concevoir les différents choix et alternatives des solutions envisageables pour faire face à ces perturbations.
- **Choix** (« *Choice* ») : évaluer les alternatives développées à l’étape précédente afin d’identifier la meilleure solution pour anticiper ou réagir à la perturbation.
- **Implémentation** (« *Implementation* ») : implémenter la solution identifiée.
- **Evaluation** (« *Monitoring* ») : évaluer et contrôler les résultats des actions implémentées par rapport aux objectifs fixés.

En s’appuyant sur ce processus décisionnel, nous proposons la carte mentale suivante permettant de structurer un processus décisionnel (Figure 1-19). Nous considérons ainsi qu’au-delà de l’acte de décider, dans le domaine qui nous concerne, celui de l’automatique, il est important de placer la décision comme une activité relevant d’un processus plus global, ce processus décisionnel.

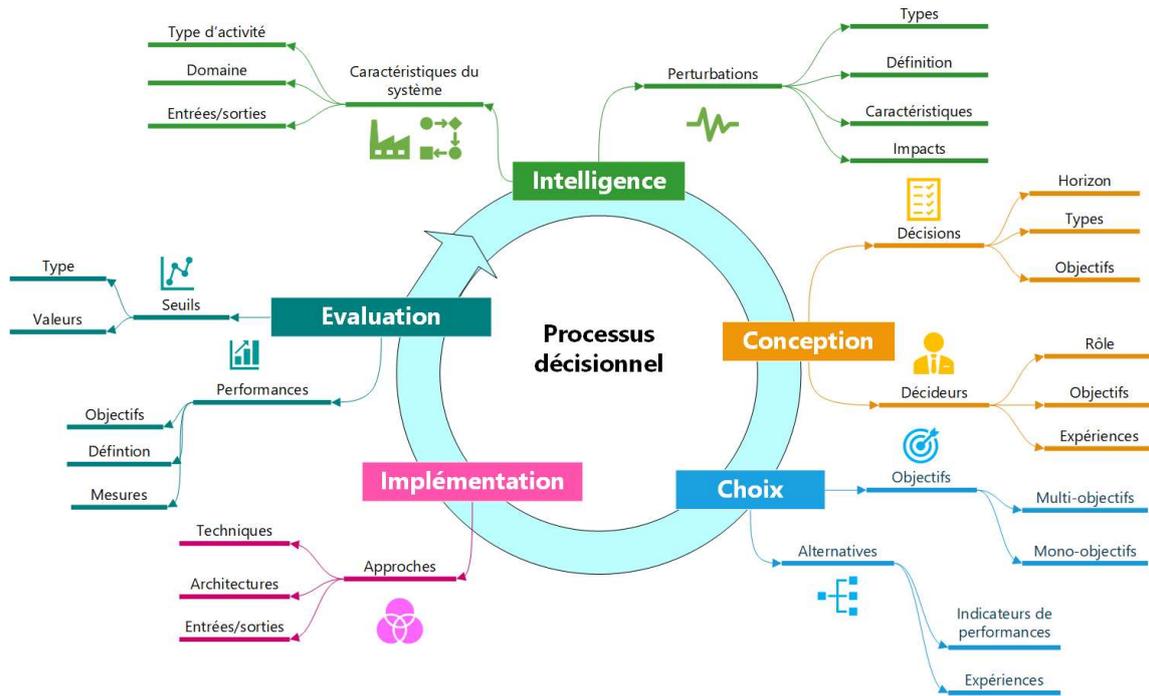


Figure 1-9. Processus décisionnel.

En s'appuyant sur son niveau d'expertise et d'expériences et de ses connaissances acquises à propos du système et des perturbations à prendre en compte, le décideur définit les objectifs recherchés face à ces perturbations et l'attitude à adopter.

Différents travaux de recherche mettent l'accent sur ce volet décisionnel. (Bradley 2014) propose une méthode améliorée basée sur le management des risques pour gérer des risques fréquents et des risques rares pour faire face aux perturbations catastrophiques en supply chain. Cette méthode comprend les étapes suivantes : (1) "identifier les risques" ; (2) "mesurer les risques" ; (3) "classer les risques par ordre de priorité en vue d'atténuer leur impact" ; (4) "évaluer les méthodes pour atténuer les risques sur le plan tactique" ; et (5) "mettre en œuvre ces méthodes au niveau tactique". Pour faire face aux risques rares et aux risques fréquents, l'auteur analyse les différences entre ces deux types de perturbations et améliore la mesure et la hiérarchisation des risques. L'amélioration de cette méthode se base sur l'intégration d'une méthode connue appelée "Analyse des modes de défaillance et de leurs effets et causes" (AMDEC). Elle intègre la notion de défaillance et la détection de celle-ci tout au long des étapes avec des mesures pour permettre d'hiérarchiser les risques.

(Behdani, Lukszo, et Srinivasan 2019) proposent de suivre un cycle basé sur les étapes suivantes : apprentissage, détection, réaction et récupération, pour répondre aux perturbations dans le domaine manufacturier en chimie. Ils intègrent en parallèle à ce cycle un autre cycle basé sur la gestion des risques en suivant les étapes suivantes : identification des risques, quantifications des risques, évaluation des risques et contrôle des risques.

Pour faire face aux perturbations aléatoires dans les réseaux des transports ferroviaires, (Azad, Hassini, et Verma 2016) se sont intéressés aux périodes avant et après la perturbation. Ils proposent une méthode comprenant 6 étapes : (1) Calculer les coûts d'une situation normale (sans perturbations) ; (2) Réaliser des scénarios de perturbation de chaque branche de service du réseau

et calculer le coût correspondant ; (3) Identifier les branches de service critiques ; (4) Appliquer des stratégies pour atténuer la criticité des services ; (5) Mettre à jour la structure du réseau en fonction des stratégies appliquées ; et (6) Recueillir des données, résoudre les problèmes après la perturbation et appliquer des stratégies de récupération.

(Sheffi et James 2005) proposent différentes actions associées aux différents moments définissant ce qu'ils appellent « le profil de l'évènement lié à la perturbation » (Sheffi 2005). Ces actions sont : (1) "Préparation" permettant de prédire la perturbation et préparer le système ; (2) "Première réponse" permettant de réduire immédiatement l'impact de la perturbation ; (3) "Préparation pour la récupération" permettant au système de préparer la récupération de son état ; (4) "Récupération" permettant au système de récupérer ses fonctionnalités.

Dans les études présentées nous avons pu identifier des décisions clés permettant de faire face aux perturbations à savoir : comprendre, apprendre, anticiper, réagir, et récupérer (Murino, Romano, et Santillo 2011 ; Behdani, Lukszo, et Srinivasan 2019 ; Hollnagel et al. 2011 ; Sheard 2008 ; Sheffi et James 2005).

De cette revue, on a également identifié trois périodes décisionnelles associées à une perturbation : avant, pendant et après l'occurrence de la perturbation (Sheard 2008 ; Azad, Hassini, et Verma 2016 ; Sheffi et James 2005). Le choix des actions est donc associé à ces périodes et au type de perturbation.

#### 1.2.4. Pilotage

Le concept de pilotage est au cœur de notre activité de recherche et au cœur de la discipline de l'automatique. L'Organisation Internationale de Normalisation (*International Standard Organization*) définit le pilotage des systèmes industriels comme suit : "*Factory control is defined as the actuation of a plant to make products, using the present and past observed state of the plant and demand from the market*" (ISO 1986). Pour nos travaux de recherche nous retenons la définition donnée par (Trentesaux, Campagne, et Erschler 2000) : "*Le pilotage consiste à décider dynamiquement des consignes pertinentes à donner à un système soumis à perturbation pour atteindre un objectif donné décrit en termes de maîtrise de performances. La notion de maîtrise intègre non seulement celle de maintien d'un niveau de performance donné, mais également celle de progrès (évolution vers un niveau de performance souhaité ou avec une amélioration continue)*". Cette définition a l'avantage de montrer le double rôle de pilotage face aux perturbations en adéquation avec les concepts clés identifiés. D'une part le pilotage permet de décider dynamiquement reliant ainsi le concept clé « pilotage » à celui de la « décision ». D'autre part il doit atteindre un objectif en termes de performance reliant ainsi le « pilotage » à « la performance ».

Le pilotage des systèmes complexes soumis à des perturbations est un des thèmes majeurs de recherche de notre laboratoire. Nous avons adopté le modèle de l'environnement de pilotage proposé par (Trentesaux, Campagne, et Erschler 2000) en y intégrant le système d'information comme proposé par (Lemoigne 1994). La figure 1-10 présente le modèle adapté.

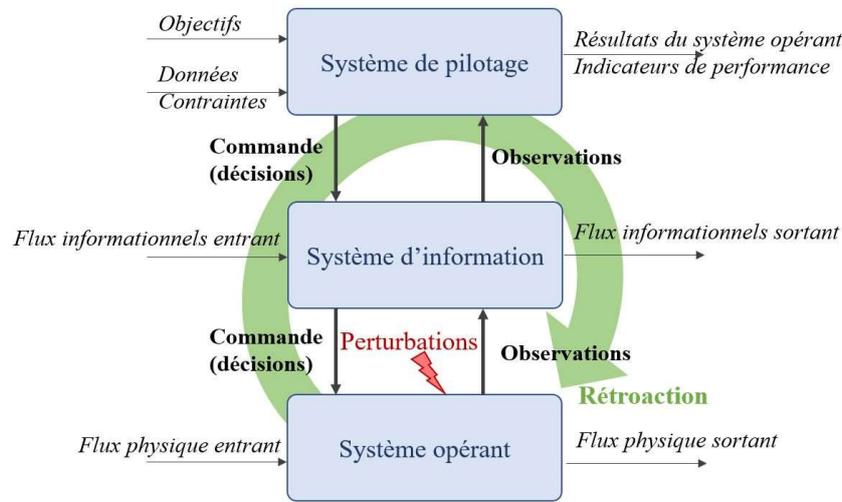


Figure 1-10. Modèle de l'environnement d'un système de pilotage.

Nous distinguons trois systèmes :

- **Le système de pilotage** : les entrées du système de pilotage sont les objectifs recherchés au niveau du système opérant, les données relatives au système et les contraintes régissant le fonctionnement du système opérant. Les décisions prises lors du pilotage transitent vers le système opérant via le système d'informations.
- **Le système d'informations** : gère les flux informationnels entrants en les transformant en flux informationnels sortants. Il assure le transfert des décisions prise par le système de pilotage vers le système opérant et de communiquer les observations du système opérant au système de pilotage.
- **Le système opérant** : il transforme un flux physique entrant en flux physique sortant. Des observations sont collectées alimentant ainsi le système d'information et constituant des informations pour le système de pilotage. Ces observations permettent au décideur de mesurer les indicateurs de performance et de réaliser des adaptations aux décisions afin de répondre aux objectifs du système opérant.

Cette vision historique évolue de nos jours de par le développement des systèmes cyber-physiques où la frontière entre matière et information devient de plus en plus difficile à identifier (Cardin, Derigent, et Trentesaux 2022a). Dans tous les cas, les systèmes sont bouclés sur la base d'un mécanisme de rétroaction permettent de réaliser et de mettre en place des actions pour faire face aux perturbations rencontrées et de maintenir la qualité des résultats.

### 1.3. Positionnement des travaux et verrous identifiés

Le génie industriel est devenu avec le temps un domaine très large, où le corpus scientifique ne cesse de s'accroître. De ce fait, nos travaux de recherche doivent être bornés. Tout d'abord, ils se concentrent sur les systèmes de production de biens (manufacturier) et de services (hospitalier, logistique). Ensuite, nous restreindrons notre étude aux perturbations fréquentes ayant un impact de type incident selon l'échelle présentée en figure 1-7. Ce sont des perturbations qui n'auront qu'un impact local sur le fonctionnement du système. Elles n'engendrent pas des situations de crises si elles sont prises en compte rapidement.

Nous considérons également le décideur uniquement aux niveaux tactique (à moyen terme) et opérationnel (à court terme). Ces niveaux permettent au système de répondre aux perturbations et d'y faire face afin d'éviter l'aggravation de la situation. Ces décisions concernent principalement l'anticipation de l'occurrence de la perturbation, la détection de la perturbation, la réaction à la perturbation et la gestion de la perturbation. L'attitude du décideur est de gérer et manager les perturbations en pilotant son système opérant de la façon la plus efficace afin de s'assurer de sa robustesse et sa résilience face aux perturbations.

« Piloter des systèmes de production soumis à des perturbations » soulève plusieurs verrous scientifiques que nous classons en 4 volets :

- **Humain** : ce volet traite des problématiques scientifiques relatives à l'humain en sa qualité de décideur ou d'utilisateur (opérateur, client, ...) son rôle et son comportement dans un contexte perturbé
- **Système opérant** : ce volet traite des problématiques scientifiques relatives au fonctionnement du système opérant dans le contexte perturbé
- **Système d'informations** : ce volet traite des problématiques scientifiques relatives aux données transitant dans le système complexe, leur modélisation et leur exploitation
- **Pilotage des systèmes de production de biens et de services** : ce volet traite des problématiques scientifiques de la conception et le développement des mécanismes de de pilotage qui s'articulent autour des concepts clés que nous avons identifiés

Ces différents verrous scientifiques sont schématisés par la figure 1-11. Nous les détaillons succinctement.

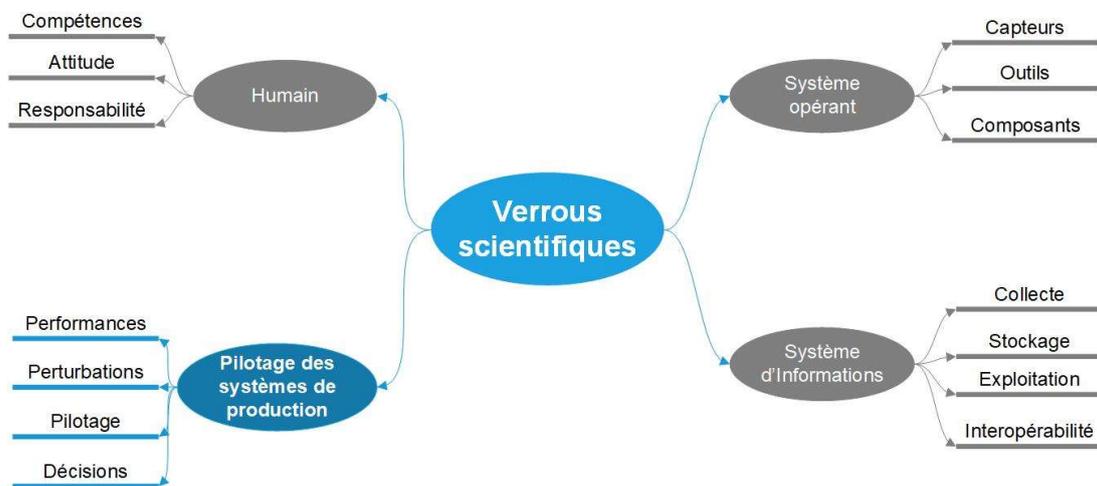


Figure 1-11. Verrous scientifiques.

### a) Volet « Humain »

L'humain est omniprésent dans toutes organisations ou tous systèmes industriels. Il joue un rôle important en sa qualité de décideur. Les verrous scientifiques peuvent s'articuler autour des questions suivantes :

- 1) Comment modéliser et améliorer les compétences de l'humain face aux perturbations en tenant compte de ses compétences et limites ?
- 2) Quelles sont les différents types d'attitude qu'un décideur pourra avoir face aux perturbations et comment évaluer leurs impacts sur le fonctionnement d'un système ?
- 3) Comment distribuer les responsabilités entre l'humain, le système et les machines pour gérer les perturbations et atténuer leurs effets et impacts ?

**b) Volet « Système opérant »**

Le système opérant est en première ligne face aux perturbations. L'objectif étant de maintenir un bon fonctionnement de ces systèmes, des verrous scientifiques relatifs à son contrôle et sa surveillance peuvent être cités :

- 1) Comment concevoir un système de contrôle/commande pour gérer les perturbations au niveau des composants d'un système industriels ?
- 2) Comment modéliser l'interopérabilité entre les différents systèmes de supervision pour la détection des perturbations ?
- 3) Comment optimiser la mise en place des capteurs pour la surveillance des systèmes ?

**c) Volet « Systèmes d'information »**

Le système d'information assure la transmission des données et des informations entre le système de pilotage et le système opérant. Nous pouvons citer les verrous scientifiques suivants :

- 1) Comment synchroniser la collecte des données relatives aux perturbations, les décisions et la mise en œuvre de ces décisions dans le système opérant ?
- 2) Comment stocker les données en temps réel en respectant les contraintes relatives à leurs confidentialités ?
- 3) Comment modéliser et exploiter les données relatives aux perturbations ?
- 4) Comment modéliser l'interopérabilité entre les différents systèmes de collecte de données (capteurs, système de saisi, ...) et le système d'information global ?

**d) Volet « Pilotage »**

Nos travaux de recherche entrent dans ce volet. Ce volet concerne la conception et le développement d'approches de pilotage de systèmes complexes afin d'améliorer la robustesse et la résilience de pilotage des systèmes de production de biens et de services face aux perturbations opérationnelles et récurrentes.

Trois grandes classes de verrous scientifiques relatifs au « pilotage » peuvent être organisées selon les trois périodes associées à une perturbation (cf. section 1.2.3):

- 1) *Avant l'occurrence de la perturbation* : Comment anticiper l'occurrence de la perturbation tout en assurant la performance du système en termes de robustesse et de capacité à détecter la perturbation à temps ? Comment évaluer la robustesse du pilotage face à des perturbations possibles ?

- 2) *Pendant l'occurrence de la perturbation* : Quels sont les mécanismes à mettre en place pour réagir face à la perturbation en minimisant son impact sur la performance du système et en s'assurant de retrouver rapidement un niveau de performance acceptable ?
- 3) *Après l'occurrence de la perturbation* : Comment apprendre des expériences ? Comment modéliser et assurer la résilience du pilotage et du système piloté face aux perturbations subies ?

La figure 1-12 présente le positionnement de ces verrous scientifiques par rapport au système de pilotage des systèmes de production de biens et de services.

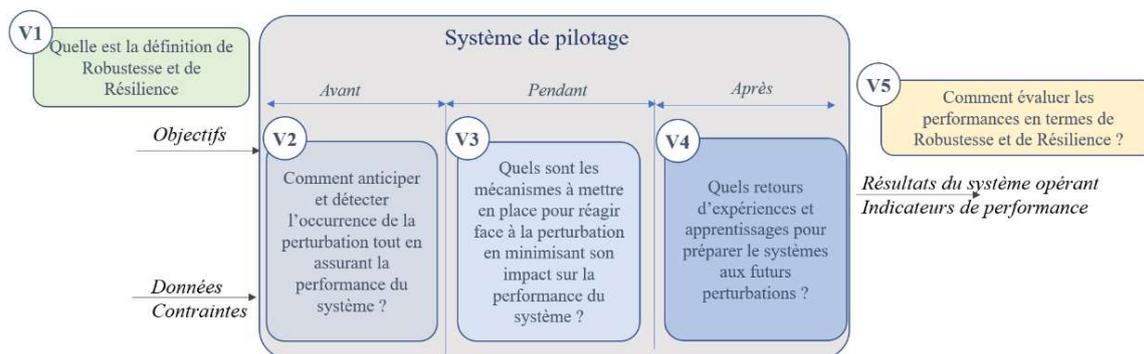


Figure 1-12. Stratégies de développement des travaux de recherche.

Nos travaux couvrent principalement les concepts de Pilotage et de performance pour permettre de prendre des décisions face aux perturbations.

## 1.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le positionnement scientifique de nos travaux de recherche. Nos travaux traitent les problèmes de pilotage des systèmes de production de biens et de services soumis à des perturbations fréquentes et récurrents ayant un impact de type incident. Nous nous focalisons sur les concepts de robustesse et de résilience en termes de performances recherchées. Nos travaux relèvent du volet pilotage et s'intéressent aux 5 verrous scientifiques identifiés : définition et évaluation des concepts de robustesse et de résilience et approches de pilotage selon les périodes de la perturbation (avant, pendant et après).

Le chapitre suivant présente ainsi une revue de littérature autour des trois classes de verrous scientifiques relevant du dernier volet. Cette étude nous permettra de positionner nos activités et ainsi de montrer leur originalité.



## Chapitre 2. Approches de pilotage des systèmes de production dans un contexte perturbé : robustesse et résilience

### Objectifs du chapitre

*Ce chapitre a pour objectif de présenter un état de l'art des travaux de recherche qui se sont intéressés à la problématique de pilotage des systèmes de production de biens et de services dans un contexte perturbé. Nos travaux se concentrent sur un type de perturbation qui sont des perturbations connues, prévues et fréquentes causant un dysfonctionnement des systèmes. Les objectifs de performance recherchés sont : la robustesse et la résilience.*

### 2.1. Organisation de l'état de l'art

Les systèmes de production de biens de services sont confrontés à différents types de perturbations impactant leurs bons fonctionnements. Ces perturbations sont devenues la « norme » comme le soulignent (Skobelev et Trentesaux 2017) dues aux nouvelles contraintes liées à la concurrence, aux besoins clients, à la complexité de fonctionnement des systèmes et aux exigences environnementales et réglementaires.

Les perturbations survenant au niveau opérationnel comme les pannes machines, le retard des approvisionnements, l'absence de matières premières, ... sont de plus en plus fréquentes impactant les performances du système de production et induisant des incidents qui peuvent s'aggraver si elles ne sont pas traitées à temps. La figure 2-1 montre l'impact de la perturbation sur le niveau de performance d'un système.

L'évolution du niveau de performance suit 4 tendances. La première est autour d'une situation qualifiée de stable avant l'occurrence de la perturbation (du point 0 au point 1). L'occurrence d'une perturbation fait dégrader le niveau de performance (de point 1 au point 2). Un point de rupture (point 2) renverse la tendance de cette dégradation vers une amélioration (du point 2 au point 3) jusqu'à l'atteinte d'une nouvelle situation jugée stable (à partir du point 3).

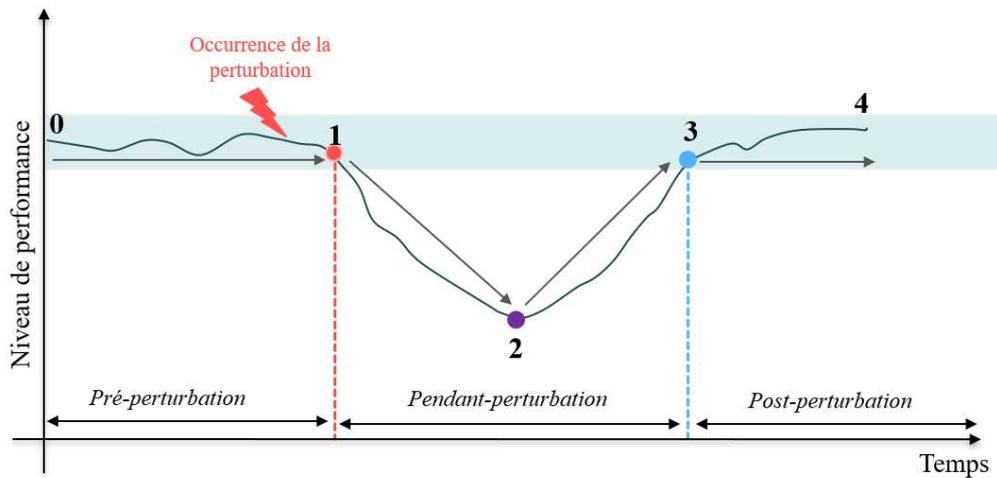


Figure 2-1. Evolution du niveau de performance en fonction du temps et de la période d'une perturbation.

Inspiré des travaux de (Aini et Fakhru-Razi 2010) sur les situations de catastrophes, l'évolution du niveau de performance met en évidence trois périodes liées à l'occurrence de la perturbation (Chaabane et Trentesaux 2019) (cf. Figure 2-1) :

- *Période de pré-perturbation* : cette période précède l'occurrence de la perturbation et prend la forme d'une situation que nous pouvons qualifier de « normale » ou « attendue » où le niveau de performance est autour de sa valeur attendue. Cette période se compose des quatre phases suivantes :
  - (1) Phase de fonctionnement : point de départ où le système commence son fonctionnement.
  - (2) Phase d'incubation : accumulation de défaillances latentes, des déviations, des écarts et des alertes par rapport aux normes.
  - (3) Phase de pré-alerte : un ou plusieurs signes précurseurs apparaissent durant la période d'incubation pour signaler les anomalies.
  - (4) Phase d'activation : action ou événements spécifiques directement identifiables causant un ou plusieurs dysfonctionnements.
- *Période de pendant-perturbation* : cette période est déclenchée à l'occurrence de la perturbation et prend la forme d'une situation que nous pouvons qualifier de « Dégradée » où le niveau de performance a une valeur plus basse que sa valeur maximale ou sa valeur attendue. C'est la période au cours de laquelle le (ou les) dysfonctionnement(s) est (sont) présent(s). Elle se compose des phases suivantes :
  - (1) Phase d'apparition : début du dysfonctionnement après son activation par un événement déclencheur.
  - (2) Phase de réponse et de récupération : c'est l'intervention d'urgence incluant la détection immédiate et la caractérisation de la perturbation, puis la mise en place des actions pour l'atténuer et éliminer les impacts de la perturbation
- *Période de post-perturbation* : cette période vient après le retour du niveau de performance à sa valeur maximale ou sa valeur attendue. C'est le temps après lequel les opérations et les actions d'atténuation sont terminées. Cette période comporte les phases suivantes :

- (1) Phase d'enquête et de rapports : enquêtes après l'occurrence de la perturbation pour identifier les causes et rechercher des recommandations pour éviter que la perturbation ne se reproduise.
- (2) Phase de retour d'informations : mise en œuvre des recommandations de l'enquête par l'organisation concernée exposée à une perturbation similaire.
- (3) Phase de définition des responsabilités et des actions judiciaires : les conclusions et les rapports des enquêtes menées sont utilisés pour établir les responsabilités et les mesures judiciaires à mettre en place.
- (4) Phase de réforme sociale et législation : formation d'entités spécialisées, préparations de nouvelles législations ou modifications des lois et règlements en vigueur.

Nos travaux de recherche s'intéressent au niveau de performance d'un système soumis à des perturbations et plus précisément à répondre à la question suivante : **Comment piloter un système de production de biens et de services soumis à des perturbations fréquentes prévues ou imprévues afin d'assurer ses objectifs en termes de performances ?**

Nous présentons l'état de l'art des travaux qui se sont intéressés à cette question de recherche selon les deux concepts clés : Performance et Pilotage en adéquation avec les verrous scientifiques identifiés dans le chapitre précédent.

L'état de l'art sera organisé en 3 parties présentées dans la figure 2-2.

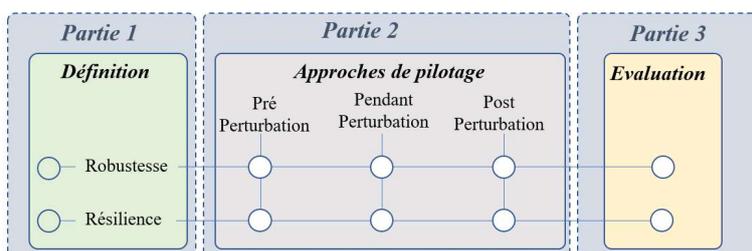


Figure 2-2. Structuration de l'état de l'art.

La première partie se concentre sur les concepts de robustesse et de résilience identifiées comme les principaux objectifs de nos approches de pilotage. Cette partie de l'état de l'art nous permettra de faire un tour d'horizon des définitions trouvées dans les papiers scientifiques.

La deuxième partie de l'état de l'art sera focalisée sur les approches de pilotage pour chaque période de perturbation. Nous nous concentrons sur les approches développées dans le cadre de notre périmètre de recherche précisé dans le chapitre 1, pour les problèmes de pilotage des systèmes de production de biens et de services soumis à des perturbations fréquentes et récurrents ayant un impact de type incident.

La troisième partie présentera les méthodes d'évaluation de la robustesse et de la résilience des systèmes de production.

Nous terminons ce chapitre par la présentation des projets nationaux et internationaux ainsi les groupes de recherche qui travaillent sur ces différents verrous scientifiques.



terme « Robustesse est bien relié également à la performance, au système, au management et à la production. Cette première recherche confirme la pertinence de ce terme dans le thème qui nous intéresse.

Différents articles ont étudié la définition de la robustesse dans les systèmes de production selon plusieurs points de vue. Nous nous appuyons sur les travaux de (Stockmann, Winkler, et Kunath 2021) qui ont identifié plusieurs définitions de la robustesse dans le domaine de la production synthétisés dans la table 2-1.

**Table 2-1. Définition de la « Robustesse » (Stockmann, Winkler, et Kunath 2021).**

Référence	Définition	Eléments Clés
(Schleinkofer et al. 2019)	<i>'[Robustness] describes the ability of a system to perform a function with a consistently high quality even under the influence of disturbance parameters... From a statistical point of view, robustness is defined as the ability of a product or process to perform its function at the target level with minimal variance.'</i>	- Capacité à exécuter une fonction avec <b>une qualité élevée et constante</b> , même en cas de perturbations. - D'un point de vue statistique : capacité d'un produit ou d'un processus à exécuter sa fonction au <b>niveau cible avec une variance minimale.</b> "
(Egri et al. 2016)	<i>'A production plan is considered robust if it achieves an acceptable level of the selected performance indicators even when unpredictable disruptions occur during the execution of the plan.'</i>	Un plan de production est considéré comme robuste s'il permet d'atteindre <b>un niveau acceptable des indicateurs de performance sélectionnés</b> , même lorsque des perturbations imprévisibles se produisent pendant l'exécution du plan".
(Stricker et al. 2015)	<i>'Robustness describes the stability against different varying conditions. The stability, regarding a certain production system, is mostly related to preselected KPIs. For a robust production system the chosen KPIs would not deviate much under varying conditions.'</i>	La robustesse décrit la <b>stabilité face à différentes conditions variables</b> . La stabilité, en ce qui concerne un certain système de production, est principalement liée à des <b>indicateurs clés de performance présélectionnés</b> . Pour <b>un système de production robuste</b> , les indicateurs choisis ne <b>s'écarteraient pas beaucoup dans des conditions variables</b> .
(Luft et Besenfelder 2014)	<i>'[Robustness is] a property of a system which allows it to satisfy a fixed set of requirements, despite changes occurring after the system has entered service, in the environment or within the system itself, from the nominal or expected environment or the system design parameters' (based on (Saleh, Hastings, et Newman 2001)).</i>	La robustesse est <b>une propriété d'un système</b> qui lui permet de <b>satisfaire un ensemble fixe d'exigences, malgré les changements</b> qui surviennent après la mise en service du système, dans l'environnement ou au sein du système lui-même, par rapport <b>à l'environnement nominal ou attendu ou aux paramètres de conception du système</b> .
(Mondal, Ray, et Maiti 2014) (Mondal, Maiti, et Ray 2010)	<i>'A robust manufacturing process is defined to be a process which maintains its acceptable performance consistently in a desired level even if there may be significant and substantial changes occurring in the levels of input variables and noise parameters during a given period of time or planning horizon.'</i>	<b>Un processus de fabrication robuste</b> est défini comme un processus qui <b>maintient ses performances acceptables de manière constante à un niveau souhaité</b> , même si des changements importants et substantiels peuvent se produire
(Stricker et Lanza 2014)	<i>'... this paper considers the robustness of a production system as its ability to remain working on a stable and high performance level despite the given risks.'</i>	'... ce document considère la robustesse d'un système de production comme <b>sa capacité à continuer à fonctionner à un niveau de performance stable et élevé malgré les risques.</b> '

(Tolio, Urgo, et Váncza 2011)	'...robustness refers to 'quality robustness', i.e., the insensitivity of the plan in terms of target performance. Hence, the robustness of the production plan relies on the possibility and capability of modifying the plan with little or no penalty with regard to the value of the objective function. '	'...la robustesse fait référence à la <b>"robustesse de la qualité"</b> , c'est-à-dire à <b>"l'insensibilité du plan en termes de performance cible"</b> . Ainsi, la robustesse du plan de production repose sur la possibilité et la capacité de modifier le plan avec peu ou pas de pénalité par rapport à la valeur de la fonction objectif. '
(Sabuncuoglu et Goren 2009)	' [Robustness] refers to the insensitivity of scheduling performance to the disruptions. A schedule whose performance does not deteriorate much in the face of disruptions is called robust. '	'[La robustesse] fait référence à <b>"l'insensibilité des performances de l'ordonnement aux perturbations"</b> . Un <b>ordonnement</b> dont les performances ne se détériorent pas beaucoup face aux perturbations est dit <b>robuste</b> . '

Nous avons construit un nuage de mots mettant en évidence les mots clés de ces différentes définitions (Figure 2-5).



Figure 2-5. Nuage de mots des définitions « Robustesse » dans le domaine de la production.

Le nuage de mots met en évidence des mots communs entre les différentes définitions comme la performance, les indicateurs de performances, les perturbations... Nous remarquons que la définition de la robustesse est très liée à la mesure de la performance. Donc on répond à la question : robuste par rapport à quoi ? Une compréhension commune du terme « Robustesse » peut être identifiée, affirmant que la robustesse permet de maintenir la performance ou la fonction d'un système de production ou d'un plan de production à un niveau au moins acceptable face à des perturbations (Stockmann, Winkler, et Kunath 2021). Ceci soulève la question de définition de niveau « acceptable » que certains travaux traduisent par la mesure de plusieurs indicateurs de performance clés et leurs évaluations par rapport à des seuils prédéfinis. Pour certains auteurs la mesure de l'indicateur ne doit pas dévier beaucoup du seuil prédéfini (Sabuncuoglu et Goren 2009; Stricker et al. 2015; Schleinkofer et al. 2019). D'autres auteurs proposent que la mesure doive se maintenir au-dessus du seuil (Mondal, Maiti, et Ray 2010; Mondal, Ray, et Maiti 2014; Egri et al. 2016). (Stricker et Lanza 2014) proposent que la mesure doive remplir les deux exigences susmentionnées face aux perturbations.

## 2.2.2. Définition de la résilience

Le deuxième concept qui nous intéresse est le concept de « résilience ». La première utilisation du mot « résilience » date de 1901 dans le domaine de la « résistance des matériaux » avec les travaux de (Charpy 1901). Il a défini la résilience comme étant la résistance aux chocs des matériaux dans le but de classer les matériaux. Il montre que la qualité des matériaux tient à la fois de l'élasticité et de la fragilité et la résilience se manifeste par la capacité des matériaux à retrouver leur état initial à la suite d'un choc ou d'une pression continue.

La première définition de la résilience date de 1973 avec les travaux de (Holling 1973) en écologie : *“Resilience determines the persistence of relationships within a system and is a measure of the ability of these systems to absorb changes of state variables, driving variables, and parameters, and still persist. In this definition resilience is the property of the system and persistence or probability of extinction is the result.”*. D'autres définitions ont suivi ces 40 dernières années avec une production scientifique abondante qui ne fait qu'augmenter chaque année sur le thème de la résilience (figure 2-6).

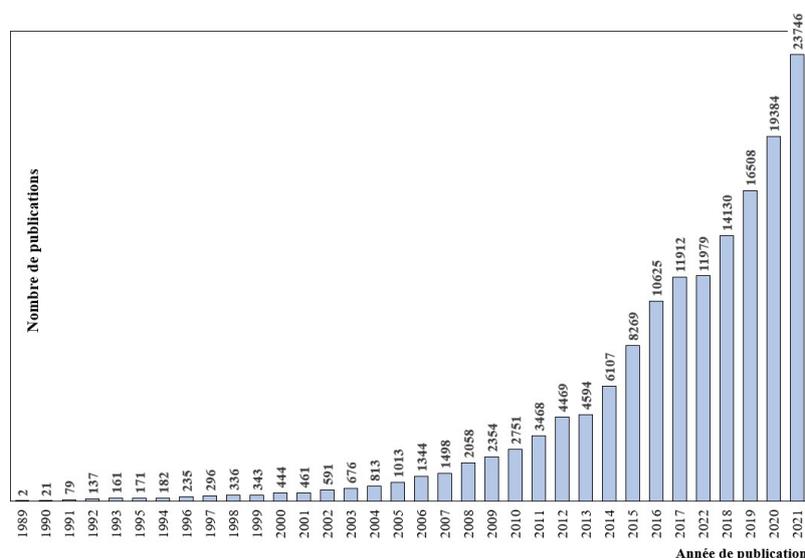


Figure 2-6. Nombre de publications du concept « Résilience » par année.

La résilience a été étudiée dans plusieurs domaines comme en témoigne la figure 2-7, résultats de nos recherches sur « web of science » en utilisant le mot clé « Résilience ».



*absorb, recover and reorganize*. Nous observons également la présence des mots faisant référence aux perturbations : *disturbance, changes, shocks...*

(Mujjuni et al. 2021) a recensé plusieurs caractéristiques communes présentes dans différentes définitions. Il a classé ces définitions selon deux catégories : Ontologique (qu'est-ce que c'est ?) et fonctionnelle (que fait-elle ?).

La classe Ontologique fait référence à la propriété de la résilience. (Holling et Walker 2003) présentent la résilience comme une "quantité" : "*The **amount** of change the system can undergo and still retain the same controls on function and structure (still be in the same state - within the same domain of attraction)*". La résilience a été définie comme une "mesure" (Schlink 1919) : "[Resilience] ...may be taken as a **measure** of its excellence [reference to systems] as regards the invariance of its indications.". Enfin, (Carpenter et al. 2001) utilise le terme "magnitude" : "*Resilience is the **magnitude** of disturbance that can be tolerated before a socioecological system (SES) moves to a different region of state space controlled by a different set of processes.*".

La classe fonctionnelle fait référence à une "aptitude" ("*the system's **ability** to recover online after adversarial events occur.*" (Zhu et Başar 2015)); ou une "capacité" ("*the **capacity** of a system to absorb disturbance and re-organize while undergoing change so as to still retain essentially the same function, structure, identity and feedbacks*". (Woods et Branlat 2012)). Les définitions fonctionnelles de la résilience dominent la littérature scientifique faisant souvent référence à une propriété des systèmes sociaux et écologiques (Zhang et Luttervelt 2011).

Au début du 21<sup>e</sup> siècle, le terme a été repris par le monde des affaires et utilisé pour décrire la capacité à réinventer de manière dynamique les modèles et les stratégies d'entreprise en fonction de l'évolution des circonstances. (Aldea et al. 2020) définissent la résilience dans le domaine des architectures d'entreprise comme suit : "*the **ability of an organization** to identify and assess the **vulnerabilities of enterprise resources** in its integrated architecture and **prepare for disruptions, by designing specific measures** in an Enterprise Architecture to increase its capabilities to **adapt to new or changing circumstances and restore full capability after an unexpected disruption.***". Nous remarquons que le concept de la résilience a été adapté au domaine et sa définition ne s'est pas limitée à la réponse aux perturbations et au retour vers un état prédéfini, mais aller vers une transformation du système. Cette définition montre les différentes facettes de la résilience : objectif, mesure et actions.

Les définitions du concept de la résilience ont évolué au cours des années et selon les besoins des domaines étudiés. (Hollnagel, David, et Leveson 2006) définissent dans la première édition de leur livre la résilience comme étant : "*The essence of resilience is therefore the **intrinsic ability of an organisation (system)** to maintain or regain a dynamically stable state, which allows it to continue operations after a major mishap and/or in the presence of a continuous stress.*". Cette définition a évolué dans la 4<sup>ème</sup> édition de ce même livre (Hollnagel et al. 2010) : "*The **intrinsic ability of a system** to adjust its functioning prior to, during, or following changes and disturbances, so that it can sustain required operations under both expected and unexpected conditions.*". On remarque que dans cette nouvelle définition on ne se limite plus aux risques et aux menaces qui ont été remplacés par les notions de changements et des perturbations prévues et imprévues. L'accent est également passé de "maintenir ou retrouver un état stable sur le plan dynamique" à la capacité de "soutenir les opérations requises". La modification des définitions a consisté à élargir la portée de la résilience. Les travaux de Hollnagel et Woods ont fait émerger un nouveau concept appelé "*ingénierie de la résilience*" d'où le titre de leur ouvrage. L'idée derrière

est non seulement de permettre au système de réagir aux perturbations mais de les accepter et de faire évoluer ses capacités pour y faire face. L'ingénierie de la résilience est définie comme étant les actions à mener pour faire évoluer le système vers un système résilient face à tous types de perturbations prévues ou imprévues, de comprendre ces perturbations et d'en profiter comme opportunités pour transformer le système.

Nous constatons que la résilience a attiré l'attention de plusieurs chercheurs dans tous les domaines et plusieurs définitions ont été apportées avec des similitudes et des adaptations selon les domaines. De façon générale le concept de résilience est bien lié aux perturbations et son objectif est d'apporter des réponses aux différentes périodes de perturbations.

### 2.3. Approches de pilotage des systèmes de production en différentes périodes de perturbation

La deuxième partie de notre état de l'art (Figure 2-9) se concentre sur les approches de pilotage des systèmes de production de biens et de services soumis à des perturbations opérationnelles fréquentes.

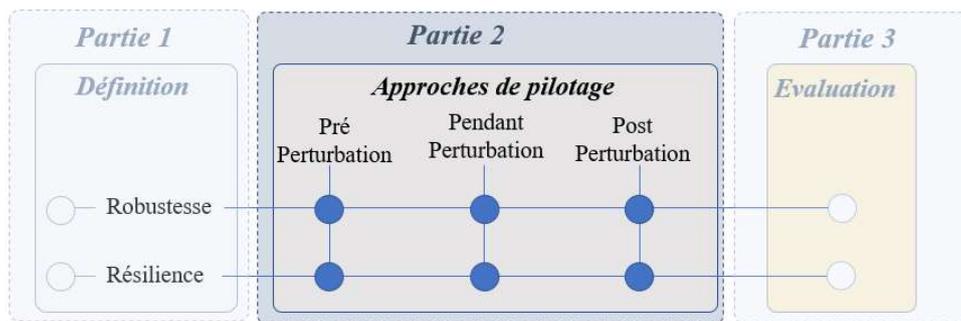


Figure 2-9. Partie 2 : approches de pilotage de systèmes de production.

Nous présentons des approches selon la période de la perturbation : (1) pré-perturbation, (2) pendant la perturbation et (3) post-perturbation. La recherche bibliographique s'est basée sur les requêtes définies dans la table 2-2 que nous appliquons dans la base de *scopus*.

Table 2-2. Requête de recherche bibliographique.

Approches de pilotage		
Pré-perturbation	Pendant-perturbation	Post-perturbation
("production system" and ("perturbation*" OR "disruption*" or "uncertain*" or "event*" or "disturbance*") and ("robustness*" or "resilience")) and ("engineering" or "computer science" or "decision science")		
Classification		
"anticip*" or "predict*" or "prepar*" or "prevent*" or "avoid*" or "Forecast"	"react*" or "manage*" or "control*" or "monitor*" or recover	"learn*" or "recover*"

Nous classifions les approches selon la période en s'aidant des différents verbes qui correspondent à l'objectif de chaque période. Par exemple pour la période avant la perturbation,



*Problem*) en tenant compte d'un type de panne machine. La première phase consiste à définir un premier ordonnancement sans prendre en compte les pannes machines et y intégrer des temps-morts permettant d'absorber par la suite les perturbations dues aux pannes. Deux critères ont été optimisées : le *Makespan* et la stabilité de l'ordonnancement. (Xiong, Xing, et Chen 2013) proposent un algorithme évolutionnaire multi-objectif pour résoudre un ordonnancement robuste pour un FJSP avec des pannes de machines aléatoires. Deux objectifs sont considérés simultanément : *Makepan* et robustesse. D'autres travaux se sont intéressés aux problèmes de la maintenance. (Paprocka 2019) propose une méthode basée sur la théorie des probabilités pour l'ordonnancement de la maintenance intégrant des défaillances prévisibles. Pour les défaillances imprévues, une méthode de replanification est également proposée. Un module d'évaluation de la dégradation de chaque mesure de performance et la stabilité d'un calendrier est proposé. (Xia et al. 2022) propose une politique d'optimisation collaborative de la production et de la maintenance en tenant compte des interruptions stochastiques et de l'exploitation des données de contrôle pour la réduction du coût total de production. Grâce au pronostic, les intervalles de maintenance optimaux sont dérivés de manière dynamique par le biais d'un modèle de taux de coût. Pour l'optimisation de la production, un algorithme de recherche de voisinage (VNS) est développé pour obtenir un plan de production optimal ou proche de l'optimal. L'approche proposée permet la modification de ce plan par la modification de la production en déterminant de manière exhaustive le cycle de maintenance rentable. (Zonta et al. 2022) proposent une approche qui permet de créer et combiner des indices de dégradations à l'aide de modèles de similarité qui permettent d'identifier les défaillances temporelles dans les problèmes d'ordonnancement en exploitant les aux données bruitées. Différents modèles basés sur des réseaux neurones profonds (DNN) et des réseaux de neurones récurrents (RNN).

D'autres travaux se sont intéressés aux données relatives aux événements qui ont eu lieu et à leur exploitation afin d'anticiper l'occurrence de ces événements. Nous pouvons citer la prédiction des demandes de production qui a fait l'objet de plusieurs publications. (Punia et Shankar 2022) proposent un modèle d'analyse prédictive big-data capable de traiter une grande quantité de données sur la demande et de fournir des prévisions de demande à court, moyen et long termes à un détaillant. La méthode proposée combine les méthodes *LSTM* et le *Random Forest*. (Alon, Qi, et Sadowski 2001) ont utilisé les réseaux de neurones artificiels pour prédire les ventes globales dans les magasins de détail pour permettre de capturer la tendance dynamique non linéaires et saisonnières des données de vente. (Punia et Shankar 2022) présentent des travaux proposant des modèles de prédiction hybrides. Ces approches proposent la combinaison des séries chronologiques et des modèles de régression (comme *machine learning*) pour modéliser les différentes formes de demandes. (Arunraj et Ahrens 2015) propose un modèle combinant auto-régression saisonnière et un modèle SARIMAX avec des variables externes. (Pai et Lin 2005) proposent une méthodologie hybride qui exploite la force du modèle ARIMA et du modèle SVMs dans la prévision des problèmes de coûts de stockage.

**La période pendant-perturbation** concerne l'intervalle séparant la détection de la perturbation jusqu'au rétablissement du système vers un état acceptable (état normal, état optimal, ou état désiré). Il englobe les approches qui permettent au système de détecter les perturbations et de réagit aux perturbations pour réduire leur impact sur le système. Il permet également de restaurer l'état du système vers un état normal, généralement celui d'avant la perturbation. Nous trouvons dans cette catégorie les modèles de détection des situations anormales et les approches réactives.

La détection des situations anormales d'un système constitue une étape importante dans la période pendant la perturbation car c'est cette détection qui déclenche le démarrage de de cette période. La nécessité d'une détection rapide et précise des situations anormales a attiré l'attention de chercheurs de différents domaines (Hwang et al. 2010; Isermann 2006; Venkatasubramanian et al. 2003). Nous proposons de classifier ces techniques en deux principales classes : les approches à base de données et les approches à base de modèles (Hwang et al. 2010; Qin 2012). Les approches de détection des anomalies à base de données exploitent directement les données du système surveillé (Venkatasubramanian et al. 2003). Parmi les approches nous pouvons citer les approches quantitatives comme l'analyse en composantes principales ACP (Jolliffe 2013; Mnassri 2012), les réseaux de neurones (Subbaraj et Kannapiran 2010) et les méthodes de reconnaissance de formes (Ondel 2006). Nous trouvons également des approches qualitatives comme les systèmes experts qui utilisent une information heuristique pour lier les symptômes aux pannes (défauts) (Adeli 2003) et l'analyse qualitative de la tendance (*Qualitative Trend Analysis*, QTA) basée sur les signaux mesurés comme une séquence de formes de base (Balasko, Banko, et Abonyi 2007). La détection d'anomalie basée sur un modèle est effectuée en comparant les variables mesurées du système avec les informations obtenues à partir d'un modèle (Dai et Gao 2013; Isermann 2006). Dans cette catégorie nous trouvons des modèles quantitatifs comme l'estimation paramétrique qui permet d'identifier les paramètres du fonctionnement réel à partir des mesures effectuées sur le système (Lehmann et Romano 2005) et la méthode des observateurs qui permet de reconstruire la sortie du système à partir des observateurs comparée à la sortie réelle (Larroque 2008). Nous trouvons également des modèles qualitatifs comme 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).

Les approches réactives ont été étudiées dans plusieurs publications scientifiques. Elles sont souvent utilisées dans des systèmes de production soumis à des perturbations sans anticipation (Cardin et al. 2017). Dans un tel contexte une solution de référence peut rapidement s'avérer inefficace face aux perturbations. L'avantage de telles approches est leur rapidité à résoudre les problèmes avec des stratégies compréhensibles par les décideurs. Beaucoup de travaux ont proposé des approches réactives basées sur des règles de priorités, qui consistent à sélectionner la ressource disponible pour une activité selon un critère prédéfini. Ces critères peuvent être optimisés selon les décisions à prendre au moment de l'activité (Rajendran et Holthaus 1999). (Shafaei et Brunn 1999) ont présenté une étude de simulation visant à étudier la performance d'un certain nombre de règles d'ordonnancement sur la base d'une approche d'horizon temporel glissant pour l'ordonnancement dynamique d'un atelier de production. (Jain et Elmaraghy 1997) ont proposé une méthode de réordonnancement permettant de refaire l'ordonnancement des travaux suite à l'occurrence une des perturbations suivantes : des pannes de machines imprévues, l'augmentation de la priorité des commandes, l'arrivée de commandes urgentes et les annulations de commandes. (Dewa, Van der Merwe, et Matope 2020) ont proposé une approche basée sur l'ingénierie des connaissances pour résoudre un problème d'ordonnancement de la production pour faire face aux coupures d'électricité lors des délestages fréquents. Des stratégies ont été générées suite à des enquêtes avec des experts et de la littérature.

D'autres approches réactives basées sur des modèles de simulation multi-agents ou des métaheuristiques ont émergées pour proposer des approches plus performantes. (Cowling, Ouelhadj, et Petrovic 2004) ont développé une architecture multi-agents intégrant un ordonnancement dynamique dans l'industrie de l'acier. Elle permet à plusieurs agents hétérogènes d'être autonomes et de générer localement des ordonnancements en utilisant des méthodes d'optimisation en considérant plusieurs objectifs pour faire face à des perturbations locales. La

coopération entre les agents est basée sur le protocole de « *contract net* » avec engagement de durée. Les perturbations concernent la non disponibilité des produits ou l'arrivée de commandes urgentes. (Pach et al. 2014a) ont proposé une architecture combinant l'optimisation pour le mode normal et une approche réactive pour le mode perturbé. Les entités sont composées d'un « optimiseur » local et d'une partie physique (e.g., un robot, un sous-système de transport, un produit, une machine). Si une entité détecte une perturbation, le système bascule en mode perturbé afin de contrôler complètement le comportement de l'entité perturbée. Une optimisation locale et réactive est alors appliquée pour déterminer les meilleures stratégies de réaction. Les auteurs ont développé un simulateur multi-agents basés sur les champs de potentiels pour gérer et contrôler les perturbations en mode réactive. (Jimenez et al. 2017) ont proposé une architecture de contrôle hybride dynamique (DHCA) pour les systèmes job shop flexibles nommée Pollux. Un des composants de l'architecture est le mécanisme de “switch” qui permet de basculer d'un mode normal vers un mode perturbé permettant au système de réagir aux perturbations. Les techniques de basculement sont basées sur les algorithmes génétiques qui permettent d'identifier les nouvelles conditions opératoires et de chercher des nouvelles solutions face aux perturbations. Les pannes machines ont été considérées dans les expérimentations.

**La période post-perturbation** concerne la période après laquelle les opérations et les actions d'atténuation des perturbations. Il englobe les actions concernant les rapports d'enquête et les « feedbacks » après les perturbations. (Chang et al. 2012) ont analysé quantitativement des données de production temps-réel pour étudier l'impact des temps d'arrêts sur la performance en temps réel du système et sur le coût global. (Li et Chang 2022) ont proposé une méthode de contrôle pour des systèmes de production à plusieurs étages afin de modifier dynamiquement les temps de cycle de chaque machine pour augmenter l'efficacité globale du système. La méthode intègre un schéma de contrôle à rétroaction distribuée et un schéma de contrôle par apprentissage par renforcement.

La table 2-3 présente les principales méthodes de pilotage identifiées dans la littérature. Nous remarquons que certaines méthodes précisent des mesures de la robustesse dans la période précédant les perturbations.

**Table 2-3. Synthèse des approches de pilotage.**

Publications	Perturbation			Perf.		Description
	Pré	Pendant	Post	Robustesse	Résilience	
						<b>Problème, perturbations, approches</b>
(Nouiri et al. 2017)	•			•		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ordonnancement robuste d'un job-shop flexible</li> <li>- Pannes des machines</li> <li>- PSO (<i>Particle Swarm Optimization</i>)</li> </ul>
(Xiong, Xing, et Chen 2013)	•			•		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ordonnancement robuste pour un FJSP</li> <li>- Pannes des machines</li> <li>- Un algorithme évolutionnaire multi-objectif</li> </ul>
(Paprocka 2019)	•			•		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ordonnancement de la maintenance</li> <li>- Défaillances prévisibles et imprévues</li> <li>- Une méthode de résolution basée sur la théorie des probabilités</li> </ul>

(Xia et al. 2022)	•			•		<ul style="list-style-type: none"> <li>– Planification de la production et de la maintenance</li> <li>– Interruptions stochastiques de la production</li> <li>– un algorithme de recherche de voisinage (VNS)</li> </ul>
(Zonta et al. 2022)	•					<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ordonnancement de la maintenance</li> <li>– Les dégradations des machines</li> <li>– Modèles de prédiction basés sur les réseaux de neurones profonds et réseaux de neurones récurrents.</li> </ul>
(Punia et Shankar 2022)	•					<ul style="list-style-type: none"> <li>– Prédiction de la demande</li> <li>– Prévision de la demande court, moyen et long termes d'un détaillant.</li> <li>– Combinaison des méthodes de LSTM et le <i>Random Forest</i></li> </ul>
(Alon, Qi, et Sadowski 2001)	•					<ul style="list-style-type: none"> <li>– Prédiction des ventes</li> <li>– Données avec tendance dynamique non linéaires et saisonnières</li> <li>– Réseaux de neurones artificiels</li> </ul>
(Shafaei et Brunn 1999)		•		•		<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ordonnancement sous incertitudes</li> <li>– Conditions de chargement des ateliers et les machines goulet d'étranglement</li> <li>– Simulation des règles de priorité</li> </ul>
(Jain et Elmaraghy 1997)		•				<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ordonnancement sous incertitudes</li> <li>– Pannes de machines imprévues, augmentation de la priorité des commandes, arrivée de commandes urgentes et annulations de commandes.</li> <li>– Règles de priorité</li> </ul>
(Dewa, Van der Merwe, et Matope 2020)		•				<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ordonnancement d'un atelier de production</li> <li>– Coupures électriques (délestage)</li> <li>– Ingénierie des connaissances</li> </ul>
(Cowling, Ouelhadj, et Petrovic 2004)		•				<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ordonnancement dynamique ne industrie de l'acier</li> <li>– Non disponibilité des produits et arrivée des commandes urgentes</li> <li>– Simulation Multi-agents</li> </ul>
(Pach et al. 2014a)		•				<ul style="list-style-type: none"> <li>– Pilotage d'une cellule flexible sous incertitudes</li> <li>– Pannes machines</li> <li>– Simulation multi-agents et champs de potentiels</li> </ul>
(Jimenez et al. 2017)		•				<ul style="list-style-type: none"> <li>– Pilotage réactif d'une cellule flexible</li> <li>– Pannes machines</li> <li>– Architecture Pollux avec un mécanisme de switch basé sur les algorithmes génétiques</li> </ul>
(Chang et al. 2012)			•			<ul style="list-style-type: none"> <li>– Etude de l'impact des temps d'arrêts des machines</li> <li>– Temps d'arrêts des machines</li> <li>– Méthode d'analyse quantitative</li> </ul>
(Li et Chang 2022)			•			<ul style="list-style-type: none"> <li>– Performance d'un système de production Multi-étages</li> <li>– Temps de cycle des machines</li> <li>– Méthode de contrôle et apprentissage par renforcement</li> </ul>

Nous avons rempli les différentes périodes pour différents systèmes de production. Différents types de perturbations ont été étudiés. La mesure de la robustesse a été réalisée dans les approches de pré-perturbation. Aucune approche n'a intégré l'évaluation de la résilience qui fera l'objet de la section suivante.

## 2.4. Evaluation de la robustesse et de la résilience

Nous présentons dans cette section les différentes méthodes d'évaluation de la robustesse et de la résilience.

### 2.4.1. Evaluation de la robustesse

(Kouvelis et Yu 1997) ont défini trois critères de robustesse qui peuvent être évalués :

- Robustesse absolue : cherche la fonction « *objectif* » maximale pour tous les scénarios.
- Déviation robuste : calculer l'écart entre la fonction « *objectif* » d'un scénario I et la valeur optimale de la solution  $x$  sur ce scénario.
- Robustesse relative : détermine le ratio entre la valeur de la fonction objectif du scénario

Pour déterminer une solution robuste à partir de l'un des critères définis ci-dessus, il est nécessaire de calculer le minimum. Ces critères se placent dans le pire des cas pour mesurer la robustesse d'une solution.

(Sevaux et Sørensen 2004) ont défini la moyenne de tous les scénarios comme étant une fonction d'évaluation robuste. L'inconvénient de cette mesure est qu'elle peut conduire à privilégier des solutions éloignées de la solution optimale pour un scénario donné. De plus, elle ne permet pas de discriminer entre deux solutions qui ont la même valeur d'évaluation.

(Kalai et Lamboray 2007) ont défini la robustesse comme la capacité d'une solution à garantir une performance qui ne dépasse pas un certain seuil de l'optimum, quelle que soit l'instance de  $P$ . Ce seuil est noté  $\beta$ .

### 2.4.2. Evaluation de la résilience

La résilience a été étudiée dans plusieurs domaines. (Hosseini, Barker, et Ramirez-Marquez 2016) ont présenté deux principales classes de méthodes d'évaluation de la résilience : quantitatives et qualitatives. Ils ont souligné que les méthodes quantitatives sont les moins explorées, en particulier dans les systèmes de production, et qu'elles sont identifiées comme un programme de recherche pour l'ingénierie de la résilience.

**Les méthodes quantitatives** ont proposé des modèles mathématiques. (Caputo, Pelagagge, et Salimi 2019) ont proposé une méthode composée de sept étapes pour calculer la résilience dans une usine de production. Une fonction de capacité dépendant du temps lié au débit des sorties de production et à la perte économique a été utilisée. (Youn et al. 2011) ont défini une approche à trois niveaux. Le premier niveau concerne le problème d'allocation pour intégrer les décisions de compromis concernant la fiabilité, l'efficacité et la redondance des composants. Le deuxième niveau s'appuie sur l'optimisation de la fiabilité pour déterminer la conception optimale des composants. Le troisième niveau établit le pronostic et la gestion de la santé pour permettre de respecter l'efficacité et la fiabilité de l'allocation du premier niveau. (Hu, Li, et Holloway 2013) ont proposé un modèle mathématique pour mesurer la résilience en minimisant les coûts de perte de demande, de production et de stockage dans un système de production. (Farid 2015) a évalué la résilience d'un système de fabrication flexible en utilisant la théorie des graphes. L'objectif est de déterminer le nombre de chemins qui peuvent être utilisés pour fournir un service.

**Les méthodes semi-qualitatives** pour mesurer la résilience opérationnelle du système de production ont été développées. (McFarlane et al. 2018) ont proposé un cadre pour évaluer la

maturité de la résilience opérationnelle dans le pilotage de la production. Quatre niveaux ont été définis. Le niveau 0 correspond à l'appréciation directe des perturbations dans les opérations quotidiennes. Le niveau 1 fait référence à une appréciation générale des perturbations. Le niveau 2 est une compréhension quantitative détaillée des perturbations. Enfin, le niveau 3 est une approche basée sur l'apprentissage en temps réel pour améliorer la résilience. (Stolker, Karydas, et Rouvroye 2008) ont utilisé une théorie de l'utilité multi attributs pour concevoir un arbre de valeur de la résilience permettant d'obtenir un score de la performance de la gestion de la résilience de l'entreprise. Les scores obtenus à partir de toutes les mesures de performance permet de déterminer le score global de la résilience.

D'autres travaux ont proposé **des indicateurs de performance** pour mesurer la résilience. (Gu et al. 2015) ont défini les mesures suivantes : la perte de production, le temps de rétablissement du débit et le temps total de sous-production pour mesurer la résilience. (Galaske et Anderl 2016) ont proposé une aide à la décision basée sur la simulation pour le processus de gestion des perturbations dans un système de production cyber-physique résilient. Un ensemble de scénarios d'événements perturbés sont modélisés et simulés. Les résultats de la simulation pour chaque scénario sont évalués à l'aide des indicateurs clés de performance suivants : le débit horaire, le temps de séjour moyen et le taux de valeur ajoutée. (Guizzi et al. 2020) ont utilisé le temps de séjour, la moyenne et l'écart type du temps de cycle et l'utilisation des ressources pour évaluer la résilience d'un système de production. (Ribeiro et al. 2021) ont évalué l'efficacité globale des équipements en utilisant le pourcentage du temps de production réellement productif.

## 2.5. Contributions nationales internationales

Le pilotage des systèmes de production soumis à des perturbations et les concepts de robustesse et de résilience ont attiré l'attention de plusieurs communautés scientifiques et laboratoires de recherche nationaux et internationaux. Pour ne pas alourdir cette section nous avons fait le choix des groupes les plus représentatifs sans chercher à être exhaustifs.

Tout d'abord nous présentons les principaux laboratoires de recherche qui travaillent sur le sujet de recherche qui nous intéresse selon l'ordre géographique suivant : local, régional, national, européen et international. Ensuite, nous listons les groupes de recherche que nous avons pu identifier et les conférences qui ont dédié des éditions aux problématiques de pilotage sous incertitudes et aux concepts de robustesse et résilience. Enfin, nous exposons les appels à projets récents autour des concepts de robustesse et de résilience pour le pilotage des systèmes de production.

### 2.5.1. Laboratoires de recherche

Sur le plan local, le **LAMIH UMR CNRS 8201**, notre laboratoire de recherche, est un laboratoire pluridisciplinaire composé de 4 départements : automatique, informatique, mécanique et sciences de l'homme et du vivant. Nos travaux de recherche s'intègrent dans les activités du département automatique qui portent sur la conception, la commande et la surveillance des systèmes humain-machines, autonomes et sociotechniques, industriels ou de services. Les problématiques de pilotage qui nous intéressent font partie des travaux de recherche menés dans le thème SIC : « Systèmes intelligents et coopérants ». Le thème SIC appréhende la complexité des systèmes par le développement des outils au niveau décisionnel comme la modélisation des connaissances, de classification, de simulation à événements discrets et d'optimisation. Des approches de pilotage prédictives, proactives et réactives ont été développées pour des systèmes de

production de biens et de services basées sur des algorithmes et techniques d'optimisation (Nouiri et al. 2017; Chargui et al. 2019; Essghaier et al. 2023), de simulation (Zambrano Rey et al. 2014), des systèmes multi-agents (Pach et al. 2014b; Pach et al. 2014c; Pach et al. 2015) et de l'intelligence artificielle (Usuga Cadavid et al. 2020a; Usuga Cadavid et al. 2020b; Nguyen et al. 2023). Des travaux se sont intéressés également aux approches hybrides prédictives-Réactives ou proactives-réactives (Jimenez et al. 2017; Cardin et al. 2017). D'autres travaux se sont intéressés aux concepts de robustesse et de résilience, nous pouvons citer les travaux de (Essghaier et al. 2023; Enjalbert, Ribeiro, et Vanderhaegen 2020). Les applications visent les systèmes de transport, l'internet physique et la logistique, les systèmes manufacturiers, les systèmes hospitaliers et depuis plusieurs années l'industrie 4.0.

Le laboratoire **LGI2A UR 3926** (Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois) (<https://www.lgi2a.univ-artois.fr/>) est une équipe d'accueil située à l'Université d'Artois à Béthune. Ses activités de recherche structurée autour de deux thèmes prioritaires : Optimisation des Systèmes Complexes, Décision et Fusion d'Informations. Le thème Optimisation des Systèmes Complexes concentre ses efforts principalement sur les méthodes de résolution de problèmes réputés difficiles à résoudre et souvent de nature combinatoire que l'on rencontre dans les systèmes logistiques. Il s'intéresse aux problèmes de pilotage des systèmes complexes comme la chaîne logistique, les systèmes de transports et les systèmes hospitaliers sous incertitudes. Les techniques de recherche opérationnelles sont majoritairement utilisées pour résoudre ces différents problèmes. Nous pouvons citer (Yahiaoui, Afifi, et Allaoui 2023) qui proposent une approche de recherche locale itérative améliorée pour les problèmes de tournée et d'ordonnancement des techniciens de maintenance. Certains travaux se sont intéressés au concept de robustesse comme par exemple les travaux de (Amraoui, Harbi, et Nait Sidi Moh 2022) qui proposent deux formulations de la robustesse d'une solution d'ordonnancement dans le cas d'hospitalisation à domicile.

Le laboratoire **GEMTEX** (laboratoire de recherche en textile) (<https://www.gemtex.fr/>) s'intéresse à l'industrie du textile et aux problématiques de chaînes logistiques associées. Les travaux sur le pilotage des systèmes de production s'intègrent dans le thème HCD (*Human-Centred Design*, Conception Centrée sur l'Humain) où les chercheurs proposent des approches basées sur la recherche opérationnelle, les méthodes de simulation et les techniques d'intelligence artificielle. (He et al. 2022) proposent un système d'apprentissage par renforcement multi-agents pour optimiser le processus de production de textile en prenant en compte plusieurs objectifs à optimiser. L'ouvrage (Tran 2022) a regroupé les travaux sur l'application des techniques de *machine learning* dans les systèmes d'aide à la décision.

**CRISAL**, Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille, est une unité mixte de recherche (UMR 9189) (<https://www.cristal.univ-lille.fr/>). Le groupe OPTIMA (OPTImisation, Modèles et Applications) travaille sur la proposition de nouveaux modèles et méthodes de résolution des problèmes d'optimisation complexes. Des nouvelles approches basées sur les métaheuristiques, les techniques d'optimisation et les bases de connaissances ont été développées montrant leur efficacité pour résoudre les problèmes d'optimisation comme en témoigne la revue de littérature (José-García et al. 2023).

**ICube** est le laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (UMR7357) (<https://icube.unistra.fr/>). L'équipe CSIP (Conception, Système d'information et Processus inventifs) s'intéresse à la compréhension, l'étude et le développement des nouveaux modes de conception produits/systèmes/services tout au long du cycle de vie y compris les pages inventives. Les applications concernent les produits manufacturiers, les systèmes de production et

d'information. Nous pouvons citer les récents travaux impliquant les méthodes de simulation et la collecte et l'utilisation automatisées des données d'entrées pour le pilotage des services d'urgence (Mogollon et al. 2023). Le concept de la résilience des systèmes cyber-physiques en industrie 4.0. commence à émerger dans les travaux de l'équipe (Goepp et al. 2022) avec une vision entreprise.

Le CRAN, Centre de Recherche en Automatique de Nancy, est une unité mixte de recherche (UMR 7039) commune à l'Université de Lorraine (UL) et au CNRS - Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INS2I). Une des trois orientations de son département ISET (Ingénierie des Systèmes Éco-Techniques) est la modélisation et le pilotage des systèmes cyber-physiques industriels. (Derigent, Cardin, et Trentesaux 2021; Cardin, Derigent, et Trentesaux 2022b) présente l'apport des systèmes holoniques dans le pilotage des systèmes industriels cyber-physiques et l'industrie 4.0. Des architectures de pilotage innovantes avec l'implication des acteurs et des interactions entre les acteurs dans un contexte évolutif comme l'industrie 4.0. ont été proposées dans les travaux récents de l'équipe (Derigent et al. 2022).

G-SCOP est un laboratoire pluridisciplinaire des sciences pour la conception, l'optimisation et la production à Grenoble (<https://g-scop.grenoble-inp.fr/>). Ses travaux couvrent des problématiques allant de la conception des produits à la gestion des systèmes de production en s'appuyant sur des compétences en optimisation. Son équipe DOME2S (*Design, operations Management and Enginnering of Systems and Services*) mène des activités de recherche sur la gestion et la conduite des systèmes de production de biens et de services par le développement des modèles, méthodes et algorithmes d'optimisation des performances tout en garantissant le bon fonctionnement face aux aléas et aux perturbations. Les travaux récents proposent des revues de littérature sur l'apport des techniques et technologies de *data mining* pour les problèmes de planification et d'ordonnancement des systèmes cyber-physiques dans le contexte de l'industrie 4.0. (Seeger, Yahouni, et Alpan 2022). Des méthodes de résolution proposées sont spécifiques aux systèmes à événements discrets et à la recherche opérationnelle, déterministe et stochastique (chaînes de Markov, réseaux de files d'attente, réseaux de Petri stochastiques ...) dans différents domaines applicatifs (Torbali et Alpan 2023; Martinez, Espinouse, et Di Mascolo 2024).

Le LISTIC, Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (<https://www.univ-smb.fr/listic/>), mène des travaux de recherche sur l'apprentissage automatique et la fusion d'information ainsi que sur les réseaux et les systèmes. Ses activités portent sur la modélisation, la spécification et le développement de théories et d'algorithmes pour extraire et gérer des connaissances. Nous pouvons citer les publications récentes sur l'éthique industrielle, sujet d'actualité, qui a commencé à émerger dans notre communauté scientifique (Jimenez et al. 2022; Berrah et al. 2021a). Le concept de résilience a également fait l'objet des travaux récents (Goepp et al. 2022; Goepp, Berrah, et Caillaud 2024).

Le laboratoire DISP, Décision & Information pour les Systèmes de Production à Lyon (<https://www DISP-lab.fr>), mène des recherches sur la conception et le développement des méthodes d'aide à la décision et de systèmes d'information. Son objectif est d'améliorer la performance, l'agilité et la résilience des systèmes de production de biens et de services et des chaînes logistiques globales. L'axe Gestion et optimisation des opérations traite ces sujets dans un contexte dynamique et incertain. Les récents travaux sur les problématiques d'ordonnancement des ateliers de production (Paredes, Montoya-Torres, et Botta-Genoulaz 2022; Paredes-Astudillo, Botta-Genoulaz, et Montoya-Torres 2023) qui s'intéressent aux effets d'apprentissage (*learning effects*), qui contribuent à l'amélioration des durées d'ordonnancement, des différents algorithmes d'ordonnancement d'un flow shop minimisant le *Makespan*. Le concept de « *Digital Twin* »

représente également les travaux actuels de l'équipe avec le projet ANR Juneau et les publications récentes des approches basées sur les systèmes multi-agents dans le milieu hospitalier (Moyaux et al. 2023).

Le LIS, Laboratoire d'Informatique et Systèmes à Marseille (<https://www.lis-lab.fr/>) est une unité mixte de recherche rattachée à l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INS2I). L'équipe MOPS (Pilotage et Optimisation des Systèmes de Production) travaille sur la modélisation et le développement d'outils d'aide à la décision basés sur la recherche opérationnelle pour le pilotage et l'optimisation des systèmes de production. Les travaux s'intéressent aux systèmes reconfigurables par la proposition des méthodes évolutionnaires basées sur des approches multi-objectives (Touzout et al. 2021).

Le LIMOS, Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes à Clermont-Ferrand (<https://limos.fr/>), est une unité mixte de recherche en informatique, et plus généralement en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC). L'axe ODPS (Outils Décisionnels pour la Production et les Services) s'intéresse à l'identification des problématiques organisationnelles nouvelles, à proposer des modèles adaptés. Les champs applicatifs sont les systèmes de production de biens et de services, les systèmes de transport, les systèmes hospitaliers, les systèmes de fabrication microélectronique et les chaînes logistiques. (Yadegari, Lamy, et Delorme 2023) proposent une approche réactive basée sur un algorithme génétique pour traiter des problèmes d'ordonnancement de job-shop flexible avec des arrivées des nouveaux jobs. Une session spéciale : "*Contemporary Advances in Industry 4.0 Technologies and Theories for Manufacturing Sustainability*" a été publiée dans le journal *Sustainability*, ([https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special\\_issues/Manufactur\\_Sustainability](https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/Manufactur_Sustainability)).

Le CIS, Centre Ingénierie et Santé à Saint-Etienne, regroupe l'ensemble des activités de recherche, d'innovation et d'enseignement en santé. Son département I4S (Ingénierie des Systèmes de Soins et des Services de Santé) s'intéresse à l'optimisation du parcours de soins à l'hôpital, à la planification et la logistique dans les systèmes de soins et de santé et l'exploitation des données médicales. Les approches sont basées sur les techniques d'optimisation, la simulation des flux et les techniques d'apprentissage automatique. (Bargetto, Garaix, et Xie 2023) proposent une nouvelle méthode de résolution d'un problème intégré de planification et d'ordonnancement basée sur un algorithme de *branch-and-prince-and-cut* en prenant en compte des nouvelles contraintes liées aux ressources humaines. (Lay et al. 2023) ont développé une approche à deux phases basée sur le *process-mining* et la simulation à événements discrets afin de dimensionner une unité de réanimation dédiée aux patients de COVID-19 à l'hôpital.

Le CGI, Centre Génie Industriel à IMT Albi (<https://imt-mines-albi.hal.science/CGI>), applique des approches et méthodes issues de l'intelligence artificielle au monde du génie Industriel. Les travaux de l'axe ingénierie organisationnelle pour la santé s'intéresse aux problématiques de pilotage en proposant des modes d'organisation du système de santé plus robustes, coopératifs et performants. (Dessevre et al. 2023) propose une approche résiliente basée sur la centralisation et le partage des informations dans une organisation d'un centre d'hospitalisation à domicile (HàD). (Zhang et al. 2019) ont présenté un prototype BLPAD comme pour l'aide à la décision pour la coordination des HàD. Un jumeau numérique, nommé HospiT'win, a été développé pour la définition et la prédiction des parcours patients dans un hôpital (Karakra et al. 2019).

Le **LAAS**, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes à Toulouse (<https://www.laas.fr/public/>), est une unité propre du CNRS rattachée à l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS) et à l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INS2I). Ses travaux visent à une compréhension fondamentale des systèmes complexes tout en considérant l'usage qui peut en découler. L'équipe ROC (Recherche Opérationnelle, Optimisation Combinatoire, Contraintes) sont des branches de la Recherche Opérationnelle et/ou de l'Intelligence Artificielle. Les récents travaux de (Portoleau, Artigues, et Guillaume 2024) ont proposé un algorithme pour résoudre des problèmes d'arbres de décision robustes. (Riviere, Artigues, et Fargier 2024) ont étudié les performances d'une approche en deux étapes de l'ordonnancement en cas d'incertitude, en utilisant des séquences de groupes d'opérations permutable.

Le **IMS**, *Integration: from Material to Systems* à Bordeaux (<https://www.ims-bordeaux.fr/>), est une unité de recherche CNRS rattachée à l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (INSIS) et à l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INS2I). Son groupe de recherche Production Engineering travaille sur des problématiques de modélisation d'entreprise, de pilotage des systèmes de production et de l'ingénierie de conception. Parmi les récents travaux nous pouvons citer (Dupas et al. 2023) qui propose une approche d'optimisation dans un réseau de transport de la ville de Bordeaux.

Le **LS2N**, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (<http://www.ls2n.fr/>), est une unité de recherche CNRS rattachée à l'Institut des Sciences de l'Information et de leurs Interactions (INS2I), ainsi qu'à l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS) et l'Institut des Sciences Biologiques (INSB) et aux différents établissements dont il dépend. Son équipe CPS3, Conception, Pilotage, Surveillance et Supervision des systèmes, mène des travaux de recherche dans la conception, le pilotage, la surveillance et la surveillance des systèmes complexes. Les travaux de l'équipe s'intéressent au pilotage des systèmes cyber-physiques (Cardin 2019), l'apport des systèmes holoniques dans le pilotage des systèmes de production et l'industrie 4.0 (Cardin, Derigent, et Trentesaux 2022b) et le paradigme de Digital Twin (Abdoune et al. 2023) dans les systèmes manufacturiers durables.

Le **CGS**, Centre de Gestion Scientifique de Mines Paris (<https://www.cgs.minesparis.psl.eu/>), s'intéresse à l'analyse et l'accompagnement de la transformation de différentes organisations par la recherche de nouvelles formes de modélisation. Nous pouvons citer les travaux sur le concept d'internet physique (Pan et al. 2021) et les récents travaux menés sur les systèmes de distributions et l'apport du *Cognitive Digital Twin* concept (Liu et al. 2023).

Loin de chercher l'exhaustivité, la figure 2-11 présente la répartition géographique des laboratoires identifiés montrant une bonne couverture des régions françaises. Ceci nous montre la faisabilité des consortiums pour répondre à des appels à projets nationaux ou internationaux.



Figure 2-11. Laboratoires de recherche français travaillant sur le pilotage des systèmes de production soumis à des perturbations.

Nous avons présenté dans cette section les principaux laboratoires de recherche que nous avons identifiés comme étant des laboratoires contribuant aux problématiques de pilotage qui nous intéressent. Notre objectif est de montrer l'intérêt porté à ces problématiques de la part des laboratoires de recherche français et la diversité des approches et des orientations scientifiques. Nous remarquons une diversité des recherches relevant des différentes communautés scientifiques et principalement : recherche opérationnelle, génie industriel, intelligence artificielle. Ceci nous conforte dans l'idée de la place de nos travaux sur le plan national.

Le tableau suivant présente les principaux projets réalisés avec certains des laboratoires cités.

Table 2-4. Projets réalisés avec des laboratoires partenaires.

Projets	Laboratoires partenaires
2021-2023 action GDR MACS : « Amélioration de la résilience des systèmes complexes dans un contexte de perturbations » ( <a href="https://gdr-macs.cnrs.fr/index.php/node/3131">https://gdr-macs.cnrs.fr/index.php/node/3131</a> )	LAMIH / ICUBE / LISTIC
2014-2018 ANR Pi-Nuts (a Physical InterNet cross-docking hUb control System)	LAMIH / CGS / CIRRELT – Université Laval, Québec
2012-2015 ANR HOST (Hôpital : Optimisation, Simulation et évitement des Tensions)	LAMIH / CRISTAL / LIMOS / CIS / EA2694
2002-2003 Action Spécifique « Gestion Hospitalière Coopérante », n°63 du RTP 47 du département STIC CNRS, financé par le CNRS	LAMIH / DISP / LS2N / LAAS / G-SCOP / LIMOS / LASPI
2003-2006 Projet de Recherche Hôpitaux : Regroupement, Partage et Pilotage (HRP2), financé par la région Rhône-Alpes	DISP / G-SCOP / LASS / LASPI
2000-2003 Projet de Recherche Hospital Resource Planning (HRP), financé par la région Rhône-Alpes	DISP / G-SCOP / LASS / LASPI

Nous avons identifié les laboratoires internationaux suivants qui travaillent sur les problématiques de pilotage des systèmes de production.

Le laboratoire **DIAL**, *Distributed Information and Automation Laboratory* à l'université de Cambridge en Angleterre (<https://www.ifm.eng.cam.ac.uk/research/dial/>), a pour mission d'aider les entreprises à profiter des opportunités offertes par cette nouvelle ère en appliquant des technologies intelligentes aux systèmes de production, à la logistique et aux services, de préparer l'avenir avec des systèmes industriels plus réactifs et résilients, à quantifier la valeur d'une information pour une meilleure prise de décision... Les projets actuels s'intéressent à la digitalisation, au pilotage intelligent et à la résilience des systèmes (<https://www.ifm.eng.cam.ac.uk/research/dial/research-projects/current-projects/>).

Le centre de recherche **CeDRI**, *Centre in Digitalization and Intelligent Robotic* à Bragança au Portugal (<https://cedri.ipb.pt/>), est une unité de recherche appliquée regroupant des chercheurs dans les domaines de l'électronique, de l'informatique et des mathématiques. Ils développent des connaissances scientifiques et des applications dans des systèmes technologiques à fort impact sur l'industrie. Un des principaux thèmes de recherche est la modélisation, la simulation et l'optimisation pour les systèmes de décision ayant pour objectif de développer des méthodes numériques basées sur les systèmes multi-agents et les modèles mathématiques utilisés pour la simulation et la caractérisation du comportement industriel.

L'institut de recherche **VRAIN**, *Valencian Research Institute for Artificial Intelligence* à Valence en Espagne (<https://vrain.upv.es/#ResearchAreas>), est composé de 8 groupes de recherche dont le groupe GTI-IA (*Information Technology and Artificial Intelligence*) et spécialisé dans l'application et le transfert des techniques d'intelligence artificielle. Il s'intéresse à l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle pour des systèmes manufacturiers ayant pour objectifs de conserver l'énergie et les ressources naturelles et d'assurer la sécurité des employés et des communautés. Il travaille sur les systèmes manufacturiers intelligents l'un des axes de recherche des usines du futur et de l'industrie 4.0, en proposant des approches basées sur les "agents" logiciels qui peuvent coopérer afin de résoudre des problèmes complexes.

Le **LIST**, *Luxembourg Institute of Science and Technology* (<https://www.list.lu>), est une Organisation de Recherche et de Technologie (RTO) dont la mission est de développer des prototypes de produits/services compétitifs et orientés marché à destination d'acteurs publics et privés. Les travaux du groupe RDS (*Reliable Distributed Systems*) s'intéressent à la robustesse et la résilience des systèmes numériques interconnectés. Leur groupe '*Optimisation and Decision Systems*' travaille sur l'optimisation multi-objectifs et multi-disciplinaires pour optimiser l'utilisation des ressources et sur le développement des approches d'intelligence artificielles pour l'amélioration des processus.

Le **CIS**, Centre des Systèmes Intelligents de l'EPFL à Lausanne en Suisse (<https://www.epfl.ch/research/domains/cis/>), rassemble des chercheurs travaillant sur différents aspects de la création de systèmes intelligents. Six piliers de recherche intégrative ont déjà été lancés depuis la création du CIS : "*AI for Medicine*", "*Intelligent Assistive Robotics*", "*Decentralized edge AI Infrastructure*", "*Digital Twin*", "*AI For Molecular Design*" et "*AI for Environmental Processes*". Des approches basées sur les techniques d'IA sont utilisées pour répondre à différentes problématiques industrielles. Vue la diversité des approches nous retrouvons des techniques et des paradigmes utilisés dans les systèmes de pilotage qui nous intéressent.

Le laboratoire **Numérix**, laboratoire de recherche sur l'ingénierie des organisations dans un contexte d'entreprise numérique à Montréal au Canada (<https://www.etsmtl.ca/laboratoires/numerix>), se concentre les organisations manufacturières et les

services, dans un contexte numérique, durable et innovant. Ses activités de recherche en transformation numérique concernent l'intégration efficace des technologies numériques dans les organisations pour la conception des produits ou des services et le design des systèmes de fabrication (conception 3D et simulation), le design des chaînes d'approvisionnement ainsi que l'optimisation des flux, la planification des opérations manufacturières, d'entreposage et de transport (optimisation mathématique et analytique des données).

### 2.5.2. Groupes de recherche

Nous présentons dans cette section les différents groupes de recherche qui rassemblent des laboratoires et des chercheurs autour des problématiques de pilotage des systèmes de production et des concepts de robustesse et de résilience associés.

Au niveau régional nous présentons le **GRAISyHM**, un groupe d'Intérêt Scientifique de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Homme-Machine (<https://webvm.uphf.fr/graisyhm/content/presentation>). Il regroupe 11 établissements de la région Hauts-de-France. Les actions du GRAISyHM se concentrent sur la définition de modèles, méthodes et outils pour l'automatisation des systèmes sociotechniques avec des applications en industrie 4.0, les systèmes de transports et l'ingénierie hospitalière. Ses activités sont organisées autour de 4 thèmes, dont le thème « Aide à la décision en milieu incertain » ayant pour objectif de travailler sur l'application des techniques d'intelligence artificielle pour le pilotage des systèmes complexes dans un environnement incertain. Des sessions spéciales et des séminaires ont été organisés autour de ce thème, la dernière en date la session spéciale : « Artificial Intelligence and Data Science for Smart Decision Making in Manufacturing », MIM 2022, IMT – Nantes, (<https://hub.imt-atlantique.fr/mim2022/>). Les laboratoires participants à ce thème sont : LAMIH CNRS8201, GEMTEX et LGI2A que nous avons présentés dans la section précédente.

Le **GDR MACS**, Groupe de recherche « Modélisation, analyse et conduite des systèmes dynamiques » (<https://gdr-macs.cnrs.fr/node/3160>), repose sur un réseau d'équipes membres travaillant sur des thématiques identifiées autour de la modélisation des processus, les systèmes de décision, la performance, les méthodes de résolution et les outils numériques. Parmi les applications nous trouvons les systèmes cyber-physiques, le transport, la santé... Parmi les membres, nous retrouvons les laboratoires identifiés dans la section précédente.

Le **SAGIP**, Société d'Automatique, de Génie Industriel et de Productique (<http://www.sagip.org/fr/presentation>), a pour objectif de structurer et de promouvoir les disciplines représentées dans ses domaines d'activités par l'organisation des colloques et des séminaires, la production des ouvrages, l'organisation des thèmes en sous-domaines thématiques animés par des groupes de travail ... La communauté Productique est regroupée sous le terme STP (Sciences et Techniques de la Production de biens et de services). Elle aborde des problématiques liées aux systèmes de production de biens et de services par le développement des modèles, des méthodes et des outils issus de l'automatique, de l'informatique et de la recherche opérationnelle. Les problématiques qui nous intéressent sont portées par les comités techniques suivantes :

- **FL** : Gestion et pilotage des Flux industriels et Logistiques
- **GISEH** : Gestion et ingénierie des systèmes hospitaliers
- **IMS2** : Intelligent Manufacturing & Services Systems
- **IngeFutur** : INGénierie pour l'industrie responsable du FUTUR : méthodes, modèles et outils
- **SED** : Systèmes à Événements Discrets
- **SIMPA** : SIMulation, Performance et Amélioration continue

L'IFAC, The International Federation of Automatic Control (<https://www.ifac-control.org/>), regroupe des chercheurs internationaux travaillant sur tous les aspects du contrôle : systèmes et signaux, méthodes de conception, informatique, cognition et communication, systèmes cyber-physiques, systèmes de transport, ... Son objectif est d'organiser et parrainer des réunions techniques, de veiller à la fiabilité des publications dans le domaine de l'automatique et de contribuer à promouvoir les travaux de la communauté auprès du grand public. Nous pouvons citer le comité coordinateur CC5 : Cyber-Physical Manufacturing Enterprises organisé en 4 comités techniques suivants :

- **TC 5.1. Manufacturing Plant Control**: traite de la modélisation, des méthodologies, des outils et des applications liés à l'automatisation et aux technologies de l'information et de la communication appliquées à la gestion et au pilotage des systèmes cyber-physiques et des systèmes industriels.
- **TC 5.2. Management and Control in Manufacturing and Logistics**: traite des systèmes d'aide à la décision de gestion dans les systèmes de production et de chaîne logistique résilients et durables à l'ère de l'industrie 4.0, basés sur la combinaison du génie industriel, de la RO et de la science des données.
- **TC 5.3. Integration and Interoperability of Enterprise Systems (I2ES)**: traite de la recherche sur l'intégration des entreprises, l'interopérabilité des entreprises et les architectures d'entreprise.
- **TC 5.4. Large Scale Complex Systems** : traite de l'étude des réseaux complexes à grande échelle, inspirée en grande partie par l'étude empirique des réseaux du monde réel.

Le CIRP, le College International pour la Recherche en Productique (<https://www.cirp.net/>), regroupe 600 chercheurs internationaux travaillant sur des problématiques relatives à la science de production modernes et les technologies. Ses objectifs sont de promouvoir les travaux scientifiques sur les systèmes manufacturiers, l'automatique et la conception des produits et des processus, de réaliser des collaborations, de promouvoir les applications industrielles des travaux de recherche fondamentale, ... Son groupe scientifique STC O Systèmes de production et organisations (*Production systems and organizations*) s'intéresse à la conception, l'optimisation, la modélisation et le management des systèmes de production. Il organise tous les ans la conférence CIRP *Manufacturing Systems Conferences* (CMS series). Dans son rapport annuel de 2022, le groupe met en avant deux nouvelles orientations qui ont été proposées en août 2022 (<https://www.cirp.net/scientific-groups/stc-scientific-technical-committees/stc-o-production-systems-and-organizations/1292-stc-o-2022-annual-report.html>) : Intelligence artificielle pour le management et le pilotage de la production et prise de décision pour une augmentation rapide de la productivité des systèmes de production.

L'association de l'ingénierie de la résilience (*Resilience Engineering Association*) (<https://www.resilience-engineering-association.org/>), rassemble plus de 600 membres et non-membres, issus du monde universitaire et de l'industrie, pour apprendre et collaborer autour de l'ingénierie de la résilience, une perspective transdisciplinaire. Elle s'intéresse au développement de théories et de pratiques permettant la continuité des opérations et des activités sociétales afin de fournir des services essentiels face à une dynamique et une incertitude croissante. Elle organise des rencontres comme le *bi-annual Resilience Engineering Symposium* qui a eu lieu à Sophia-Antipolis, France en juin 2023 <http://www.resilience-engineering10.org/>. Elle permet d'accéder aux publications sur l'ingénierie de la résilience comme par exemple : <https://github.com/lorin/resilience-engineering>.

### 2.5.3. Appels à projets

Nous présentons dans cette section les appels à projets que nous avons identifiés comme étant des appels qui pourront intéresser les chercheurs travaillant sur les thématiques de pilotage

des systèmes complexes soumis à des perturbations et qui s'intéressent aux concepts de robustesse et de résiliences associés.

Au niveau de la Région Hauts-de-France, l'appel à **projets collaboratifs d'innovation Industrie du Futur** (<https://www.hautsdefrance-id.fr/appele-a-projets-collaboratifs-dinnovation-industrie-du-futur/>) a pour objectif de permettre à des entreprises, centres techniques et laboratoires de recherche situés en région Hauts-de-France de travailler ensemble sur des projets à fort degré d'innovation, portant sur les grands leviers de compétitivité de l'industrie. Parmi les thèmes décrits dans le référentiel national Industrie du Futur, nous retrouvons les nouvelles approches de l'homme au travail / organisation et management innovants et usines et lignes/îlots connectés, pilotés et optimisés.

Dans l'appel à projets génériques 2024 de l'Agence Nationale de Recherche, nous pouvons cibler l'axe **H19 : Industrie et usine du futur : Homme, organisation, technologies**. Cet axe de recherche est ouvert à des projets de recherche fondamentale et à des projets de recherche industrielle afin d'aider à concevoir et à réaliser les systèmes de production industrielle du futur. Les projets attendus devront contribuer à lever des verrous scientifiques et/ou organisationnels selon les thématiques suivantes :

- l'humain dans les nouvelles organisations productives,
- les modes de production et technologies numériques, l'usine connectée, les écosystèmes industriels connectés,
- l'industrie et l'usine virtuelles,
- la flexibilité et l'agilité des nouveaux modes de management et des systèmes productifs.

Dans les **appels à projets européens** (<https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/home>) nous pouvons citer les projets suivants :

- HORIZON-CL4-2024-TWIN-TRANSITION-01-03 (07/02/2024): *Manufacturing as a Service (MaaS): Technologies for customised, flexible, and decentralised production on demand*. Développer et intégrer les technologies nécessaires à la mise en œuvre du MaaS. En particulier plateformes d'échange rapide de données et automatisation continue des processus interentreprises au-delà des limites de l'usine, en s'appuyant sur les données et les normes.
- HORIZON-CL4-2023-TWIN-TRANSITION-01-07 (20/04/2023): *Achieving resiliency in value networks through modelling and Manufacturing as a Service (Made in Europe Partnership) (RIA)*. Aborder le MaaS du point de vue du réseau de valeur, visant à exploiter la flexibilité et la résilience intrinsèques fournies par la possibilité d'utiliser des ressources distribuées et programmables à la demande, dans des conditions réelles caractérisées par une grande volatilité de l'offre, des exigences du marché et des contraintes externes.
- CEF-T-2023-SAFEMOBGEN-RESILIENCE-WORKS (30/01/2024): *Improving transport infrastructure resilience: studies, works or mixed*. Améliorer la résilience des infrastructures de transport, en particulier pour adapter/mettre à niveau les infrastructures ou installer des systèmes de surveillance intelligents en raison du changement climatique et/ou des catastrophes naturelles.

## 2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art relatif à chaque verrou scientifique identifié dans le chapitre 1. Tout d'abord, nous avons présenté les différentes définitions de la

robustesse et la résilience. Ensuite, nous avons identifié les approches de pilotage des systèmes de production soumis à des perturbations opérationnelles et fréquents et selon les périodes de la perturbation : avant, pendant et après l'occurrence d'une perturbation. Nous avons défini les différentes méthodes d'évaluation de la robustesse et de la résilience appliquées dans les différents travaux de recherche. Nous avons terminé le chapitre avec l'identification des laboratoires, des groupes de recherche et des appels à projets qui se sont intéressés aux mêmes problématiques scientifiques identifiées. Les chapitres suivants présenteront nos contributions scientifiques pour répondre aux différents verrous de recherche.



## Chapitre 3. Contributions scientifiques : Définition et évaluation de la robustesse et de la résilience

### Objectifs du chapitre

Partant des verrous scientifiques identifiés en fin de chapitre 1 et de la structuration des travaux présentée en chapitre 2, ce chapitre a pour objectif de détailler nos contributions scientifiques. Il se focalise sur nos travaux et résultats concernant la définition et l'évaluation des concepts de robustesse et de résilience.

### 3.1. Organisation des contributions

Dans le chapitre 1 nous avons identifié les verrous scientifiques relatifs à nos activités de recherche selon lesquels nous avons organisé l'état de l'art dans le chapitre 2. La figure 3-1 présente l'organisation de nos contributions combinant les mêmes schémas que le chapitre 1 et le chapitre 2.

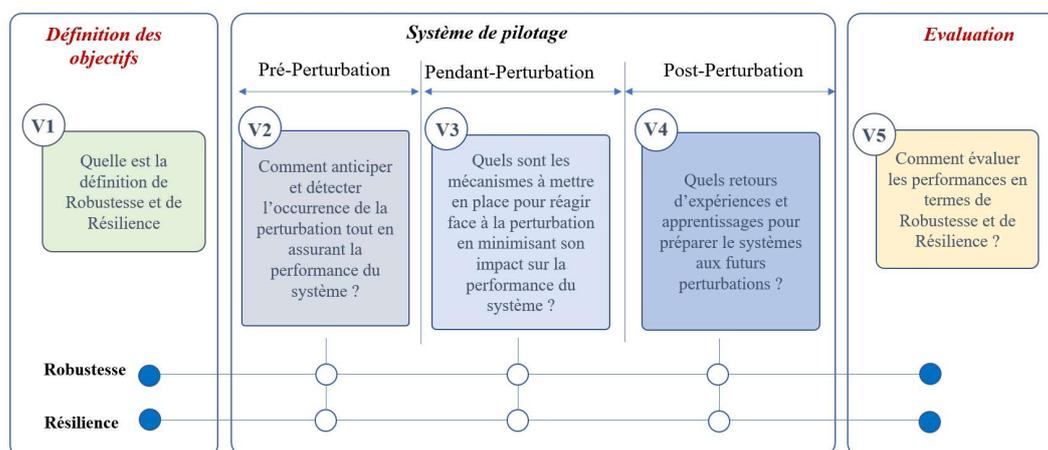


Figure 3-1. Organisation des contributions.

Ce chapitre présente une première partie de nos contributions pour répondre aux verrous scientifiques V1 (**définition de la robustesse et définition de la résilience**) et V5 (**évaluation de la robustesse et évaluation de la résilience**). Ces travaux ont été menés dans le cadre des thèses de : M. Chaari, M. Kadri et M. Attajer.

La figure 3-2 présente la répartition de ces travaux dans le temps et les verrous scientifiques couverts. Un exemple de lecture d'un élément de la figure : « thèse de T. Chaari ». Cette thèse était réalisée en partie dans le cadre du projet PHC Utique entre novembre 2007 et mars 2010, totalisant une durée de 28 mois. Les travaux se sont intéressés au concept de la robustesse et ils ont couvert : les verrous 1, 2 et 5.

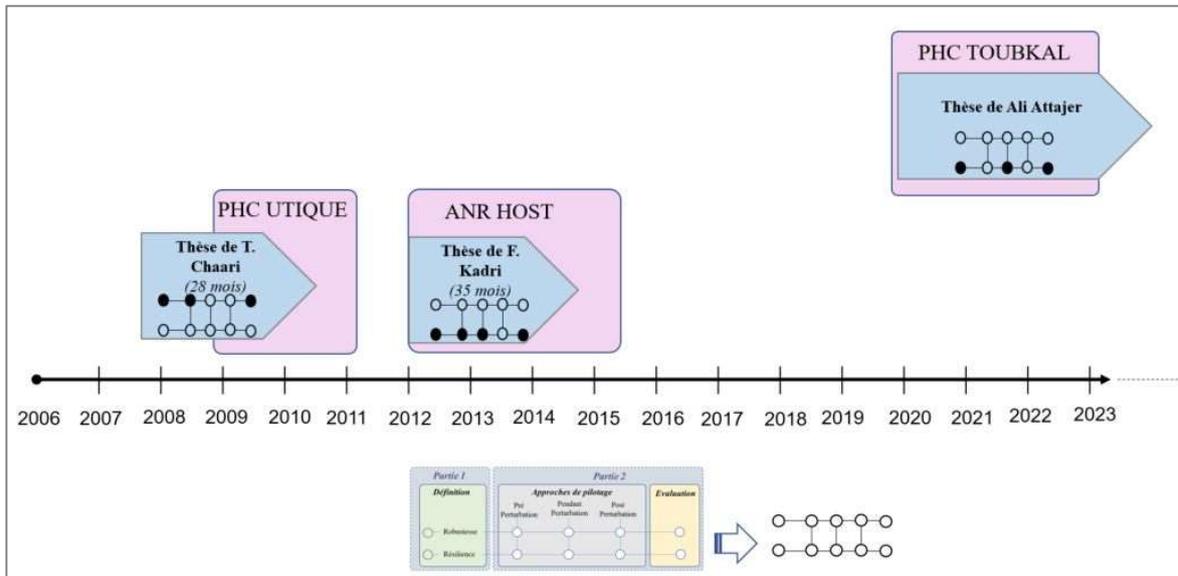


Figure 3-2. Répartitions de nos contributions dans le temps et selon les verrous scientifiques V1 et V2.

Nous détaillerons dans la section suivante nos différentes contributions et résultats.

## 3.2. Définition des concepts de robustesse et de résilience

Nous avons abordé les définitions de la robustesse et de la résilience dans le cadre des travaux suivants que nous détaillons dans cette section :

- Thèse de T. Chaari ([Chaari 2010](#)) sur l'ordonnancement robuste d'un système de production sous incertitudes.
- Thèse de F. Kadri ([Kadri 2014](#)) sur la gestion de situations de tension au sein des systèmes hospitaliers où nous avons défini la résilience des systèmes sociotechniques et la résilience organisationnelle.
- Thèse de M. Ali Attajer ([Attajer et al. 2022a](#)) sur la gestion des perturbations dans les systèmes cyber-physiques où nous avons défini la résilience opérationnelle des systèmes cyber-physiques.

### 3.2.1. Définition de la robustesse en ordonnancement des systèmes de production sous incertitudes.

Les systèmes de production sont confrontés à plusieurs types d'incertitudes perturbant ainsi son fonctionnement et impactant ses performances. Face à ce contexte perturbé le terme « Robustesse » a été très utilisé dans le cadre des problèmes d'ordonnancement. Les travaux de ([Roy 2004](#)) soulèvent la question : Robustesse de quoi ? Pour l'auteur, dans le domaine de l'aide à

la décision, il s'agit de la robustesse de la solution face aux changements. C'est la même orientation que nous avons donnée à nos travaux menés en début de ma carrière (2007-2010) lors des travaux de thèse de M. Tarek Chaari (Chaari 2010) sur l'ordonnancement robuste des systèmes de production sous incertitudes (qui constituent une forme de perturbations). Plusieurs travaux ont présenté des définitions de la robustesse d'un ordonnancement. (Jorge Leon, David Wu, et Storer 1994) définissent un ordonnancement robuste comme un ordonnancement peu sensible aux perturbations de l'atelier, pour un pilotage donné. (Le Pape 1995) définit la robustesse d'un ordonnancement comme étant sa capacité à répondre aux exigences de performance de manière prévisible dans un environnement incertain. (Davenport et Beck 2000) présentent une compréhension générale informelle de ce qu'est la robustesse en tant que « *capacité d'un ordonnancement prédictif d'être performant, malgré des évènements inattendus* ». (Jensen 2001) définit la robustesse comme étant une qualité acceptable de l'ordonnancement face à quelques changements imprévus. Aucun consensus n'a été retrouvé concernant la définition de la robustesse en ordonnancement de production, toutes les définitions citées précédemment sont différentes, mais complémentaires.

Nous reprenons la conclusion de (Stockmann, Winkler, et Kunath 2021) qui définit une compréhension commune de la robustesse selon laquelle la *robustesse permet de maintenir la performance ou la fonction d'un système de production ou d'un plan de production à un niveau au moins acceptable face à des perturbations*. Cette définition précise l'objectif recherché en termes de robustesse. Deux questions adjacentes ont été identifiées. La première concerne « *la robustesse de quoi* » ? Nous nous alignons à la même réponse donnée par (Roy 2004) qui est la robustesse de la solution et dans notre cas c'est la robustesse de pilotage. La deuxième question concerne « *la robustesse par rapport à quoi* ? » cette question souligne la composante « *mesure* » de performance de la robustesse où nous devons définir un ou plusieurs indicateurs de performance clés, leurs mesures et leurs seuils définissant les niveaux de performance attendus et les différents états de notre système (état normal ou dégradé).

La figure 3-3 résume les trois dimensions de la robustesse en termes : d'objectifs, de résultats et de moyens.

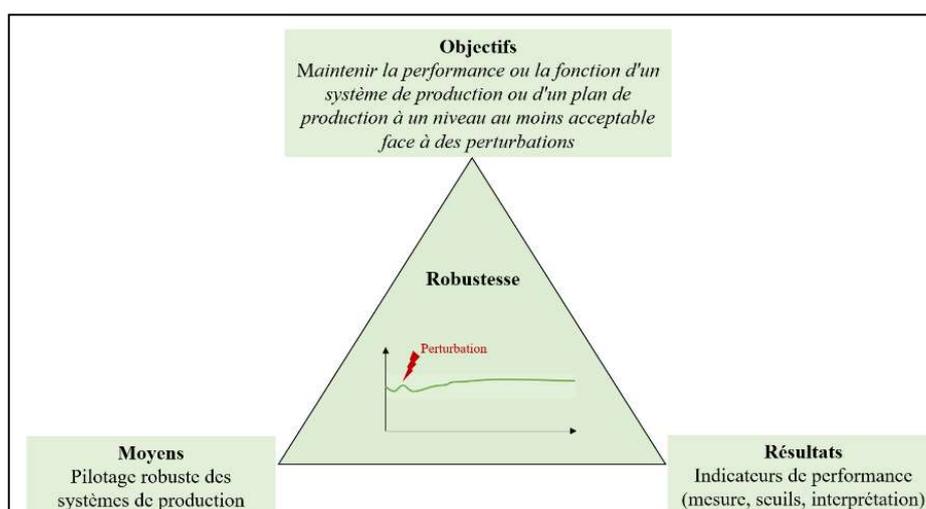


Figure 3-3. Triangle de la performance « Robustesse » pour le pilotage des systèmes de production soumis à des perturbations.

Nous avons adopté la définition proposée par (Billaut, Moukrim, et Sanlaville 2005), un ordonnancement est robuste si sa performance est peu sensible à l'incertitude des données et aux aléas. Notre objectif est de maintenir la performance de notre système de production à un niveau acceptable face à des perturbations. Pour y arriver nous devons développer des approches de pilotage robuste permettant de construire un ordonnancement robuste peu sensible aux perturbations. Des indicateurs de performance seront construits afin de surveiller l'atteinte de l'objectif.

### 3.2.2. Résilience des services d'urgences en situation de tension

Les travaux de M. Farid Kadri se sont intéressés à la gestion des situations de tensions dans un système de production de services qui est le service d'urgences (Kadri 2014). Ces situations sont caractérisées par un important flux de patients sur une longue période perturbant le bon fonctionnement du service et mettant les ressources humaines, non préparées à ce flux, devant des situations de stress et de tension. Nous avons donc identifié la résilience comme étant un des thèmes de ces travaux dont il est nécessaire de le définir.

La première définition du terme résilience date de 1901 avec les travaux de (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. Différentes définitions ont été par la suite établies dans différents domaines comme en témoigne la table 3-1.

Table 3-1. Résilience et domaines d'application (Kadri 2014).

Domaine	Définition de la résilience	Références
Sciences des matériaux	La capacité des matériaux à résister aux chocs grâce à leur qualité en termes d'élasticité et à retrouver leur état initial à la suite d'un choc ou d'une pression continue.	(Charpy 1901), (Tanguy 2005; 2001)
Psychologie	L'aptitude d'un individu à surmonter un traumatisme (invulnérabilité) et à y faire face en être affecté ultérieurement. C'est aussi sa capacité à se reconstruire et rétablir son équilibre émotionnel dans des situations de stress.	(Luthans, Vogelgesang, et Lester 2006), (Békaert, Masclet, et Caron 2011)
Informatique	La tolérance d'un système informatique aux pannes et aux failles et sa capacité de fonctionner malgré des bogues.	(Luo et Yang 2002), (Chen, Lin, et Chen 2007), (Nakayama et al. 2007)
Ecologie	La capacité d'un système écologique à supporter l'amplitude maximale des perturbations sans que son fonctionnement ne soit affecté. C'est aussi l'aptitude d'un écosystème à se remettre plus ou moins vite d'une perturbation.	(Holling 1996; Pimm 1984) (Carpenter et al. 2001) ( Walker et al. 2002)
Economie	La capacité d'un système à surmonter les turbulences économiques critiques (chocs pétroliers, crises financières)	(Fiksel 2003) (Cox, Prager, et Rose 2011)
Système sociotechnique (Organisation)	La capacité d'un système à maintenir, ou retrouver rapidement un état stable, lui permettant de continuer à fonctionner pendant et après une perturbation majeure.	(Erik Hollnagel, Woods, et Leveson 2007) (Cimellaro, Reinhorn, et Bruneau 2010) (Ouedraogo 2013)

Certains chercheurs associent la notion de résilience à la prise en charge des événements majeurs, imprévus et inhabituels, qui sortent du domaine prévu (Lundberg et Johansson 2007; Woods 2006). Pour d'autres auteurs, le concept de résilience est plus vaste incluant la gestion des événements prévus et imprévus et s'intéressant aux variations plus ou moins importantes de la performance d'un système face à ces événements (Hollnagel 2011; Westrum 2006). Nos travaux s'intègrent dans cette deuxième catégorie.

Le service d'urgences (SU) constitue une organisation complexe qui doit faire face à des événements prévus et des événements imprévus. Les événements prévus peuvent générer des flux patients importants et 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. Dans ce contexte nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la résilience organisationnelle en adoptant la définition de (Hollnagel, Paries, et Woods 2010) présentant une organisation résiliente comme étant un système combinant des caractéristiques d'anticipation, de réaction et de récupération face à une perturbation.

Nous avons donc défini la résilience d'un service d'urgences comme étant : « 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 » (Kadri 2014). Cette résilience se base sur trois types d'actions présentés dans la figure 3-4.



Figure 3-4. Concepts clés de la résilience d'un service d'urgences (SU).

Un SU résilient doit être capable de :

- **Anticiper** les perturbations par une détection précoce des perturbations grâce à la surveillance de l'évolution des performances du SU et de planifier les actions correctives à appliquer afin de le maintenir le SU dans son état normal.
- **Adapter** et **réagir** à des perturbations régulières ou irrégulières, prévisibles ou imprévisibles.
- **Comprendre** et **apprendre** des historiques des perturbations, le SU doit être capable de proposer des nouvelles actions adaptées aux perturbations futures

Nous observons la double vision de la résilience. La première vision concerne l'objectif de maintenir le niveau de performance de système de production, ici le service d'urgences, à un niveau

acceptable avant, pendant et après la perturbation. La deuxième vision concerne les actions à mettre en place pour atteindre l'objectif.

### 3.2.3. Résilience opérationnelle des systèmes de production

Dans les travaux de thèse de Ali Attajer (Attajer 2023; Attajer et al. 2022a) nous nous sommes intéressés à l'intégration de la résilience dans l'amélioration de la réactivité d'un système cyber-physiques de production (*Cyber-Physical Production System* CPPS) dans la gestion des opérations face aux perturbations et aux risques. Ceci a fait émerger le concept de la « *résilience opérationnelle* ». (McFarlane et al. 2018) définissent ce concept comme étant la capacité d'un système d'assurer et de maintenir la continuité des flux et des opérations de production face à des perturbations. (Srinivasan, McFarlane, et Thorne 2016) décrivent un CPPS résilient comme étant un système capable d'identifier la perturbation, de réagir pour réduire l'impact de la perturbation, d'apprendre des perturbations déjà rencontrées et de prédire les futures perturbations. La résilience opérationnelle d'un CPPS doit donc intégrer les modèles et les méthodes pour modéliser, analyser et évaluer la résilience du système dans son environnement perturbé (Patriarca et al. 2018; Bromiley et al. 2015). (McFarlane et al. 2018) proposent un cadre basé sur quatre dimensions pour assurer la résilience opérationnelle dans les processus décisionnels pour le pilotage des opérations dans le CPPS présenté dans la figure 3-5.



Figure 3-5. Cadre de la résilience opérationnelle (McFarlane et al. 2018).

Nous trouvons les 4 dimensions suivantes :

- La **prise de conscience** (*Awareness*) qui fait référence aux perturbations potentielles passées ou futures ;
- La **préparation** (*Preparation*) qui représente la prédiction des perturbations potentielles ;
- La **gestion** (*Management*) qui fait référence à la prise de décision et au traitement de l'information à mettre en place pour gérer la perturbation ;
- La **réponse** (*Response*) qui fait référence aux actions qui peuvent être prises pour faire face à la perturbation.

Nous nous sommes donc appuyés sur ces définitions pour proposer une approche de pilotage distribué pour intégrer et évaluer la résilience opérationnelle dans un CPPS.

### 3.3. Evaluations de la robustesse et de la résilience

Dans cette section nous présentons nos méthodes et nos métriques d'évaluation de la robustesse et de la résilience dans les différents travaux menés.

#### 3.3.1. Fonction d'évaluation robuste appliqué au problème d'ordonnancement des systèmes de production sous incertitudes

Lors des travaux de thèse de M. Tarek Chaari (Chaari et al. 2011; Chaari 2010), nous avons défini une fonction d'évaluation des solutions à un problème d'ordonnancement basée sur un nouveau critère de robustesse. Ce nouveau critère est le résultat d'une agrégation de deux objectifs permettant de trouver une solution de bonne performance au problème d'ordonnancement étudié et peu sensible aux incertitudes.

Soit  $x$  une solution du problème d'ordonnancement étudié. La qualité de la solution  $x$  est calculée par une fonction d'évaluation  $f(x)$ .  $I$  est un scénario initial qui représente les caractéristiques (inputs) du problème d'ordonnancement étudié. Alors, la fonction d'évaluation de la solution  $x$  du scénario  $I$  s'écrira  $f_I(x)$ .

Pour calculer une solution robuste, la fonction d'évaluation  $f(x)$  est remplacée par une nouvelle fonction d'évaluation robuste  $f^r(x)$  (ou nouveau critère de robustesse) représentée dans la figure 3-6.

Nous avons choisi la modélisation par scénario afin de représenter les incertitudes sur les caractéristiques du problème (par exemple : temps d'exécution des tâches incertain. L'ensemble de ces scénarios, noté par une fonction  $\xi$ , est représenté par une fonction d'échantillonnage à partir de l'instance initiale  $I$ .

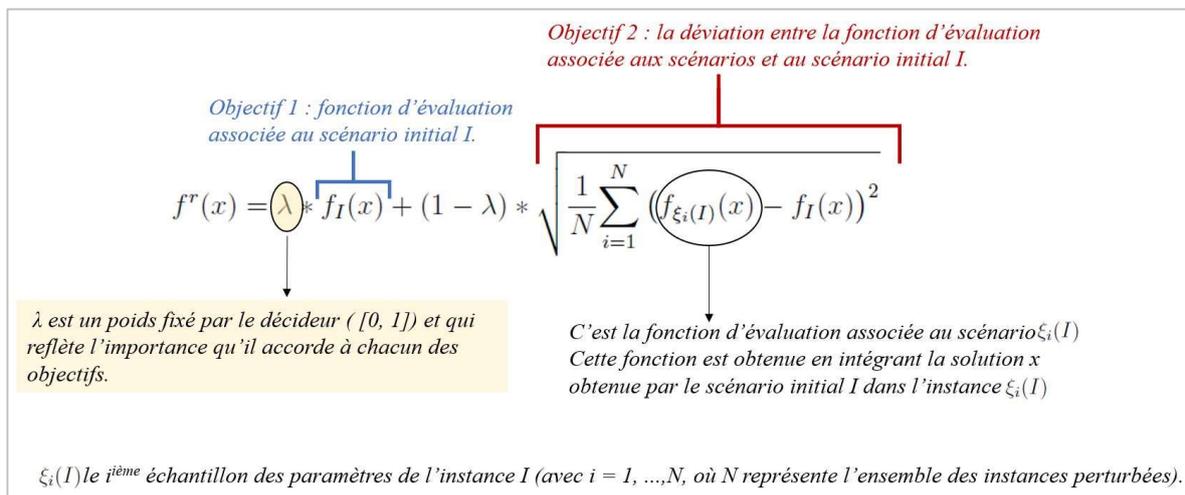


Figure 3-6. Fonction robuste.

Ce critère de robustesse a pour objectif de minimiser simultanément la fonction d'évaluation du scénario initial et la déviation entre la fonction d'évaluation de tous les scénarios et le scénario initial. Cette déviation permet de mesurer la dispersion des valeurs de la fonction d'évaluation des scénarios perturbés autour de la valeur de la fonction d'évaluation du scénario initial.

Ce critère de robustesse est générique et peut être utilisé dans plusieurs environnements de production (flow shop, job shop, job shop flexible, etc.). Il peut être appliqué sur différents critères de performance (le *makespan*, le retard maximal, le retard moyen, le retard algébrique...). En effet, il suffit de remplacer la fonction d'évaluation  $f$  par le critère approprié.

### 3.3.2. Evaluation de la résilience d'un service d'urgences

Un service d'urgences est soumis à plusieurs types de perturbations qui impactent sa performance. Cette performance est définie par la mesure  $V_e$  d'un indicateur de performance.

Nous avons identifié trois principaux états du SU (Kadri, Chaabane, et Tahon 2014a) :

- Etat normal : la capacité de production de soins est supérieure à la charge de soins.
- Etat dégradé : la capacité de production de soins est inférieure à la charge de soins suite à un important flux des patients et des actions sont nécessaires pour remettre le SU à l'état normal. La valeur de  $V_e$  est supérieure au seuil  $V_{se}$  correspondant à l'état dégradé défini par le décideur.
- Etat critique : la capacité de production de soins ne réponds plus à la charge de soins suite à un flux très important au quel le SU ne peut pas satisfaire. La valeur de  $V_e$  dépasse le seuil  $V_{Cr}$  correspondant à l'état critique défini par le décideur.

Nous avons défini un niveau de performance  $Q(t)$  est défini comme étant le pourcentage d'écart entre la mesure de l'indicateur à l'instant  $t$  et la valeur cible (notre objective de performance). Nous avons représenté l'évolution dans le temps de niveau de performance  $Q(t)$  du SU après l'occurrence d'une perturbation dans la figure 3-7.

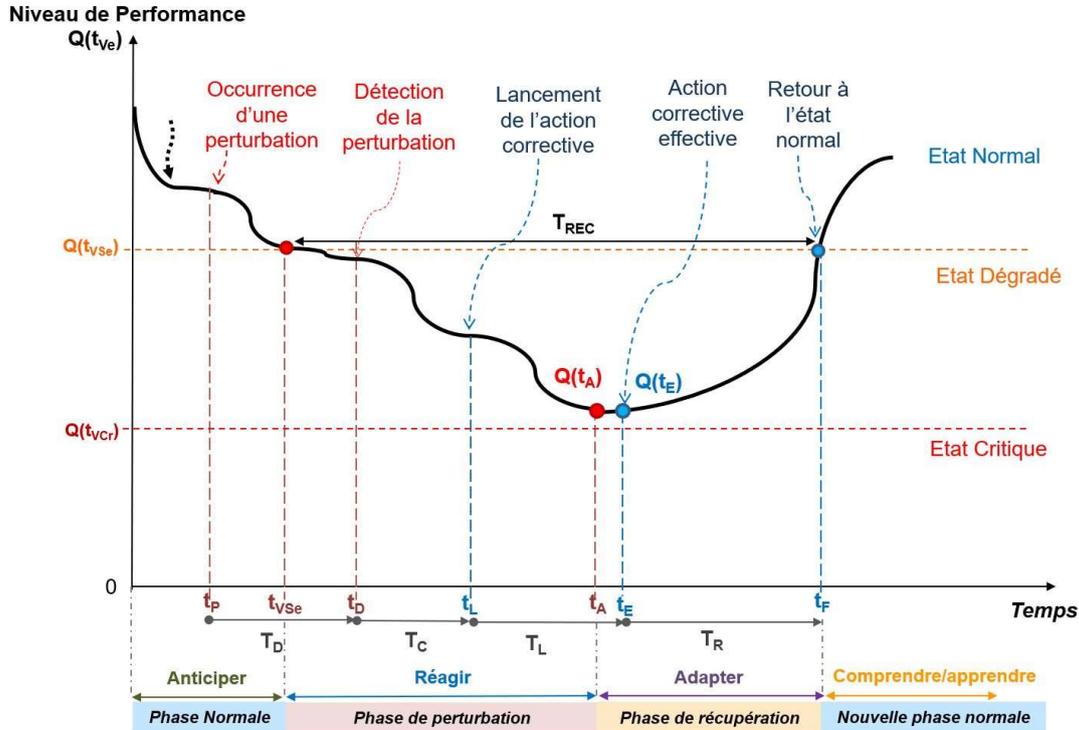


Figure 3-7. Evolution de la performance d'un SU après l'occurrence d'une perturbation.

La figure 3-7 représente le cas de l'occurrence d'une perturbation et son impact sur le fonctionnement du SU. Nous distinguons ici les différentes phases de la perturbation : avant l'occurrence de la perturbation (phase normale), pendant la perturbation (phase perturbée et phase de récupération) et après la perturbation (nouvelle phase normale). Nous retrouvons également les différents concepts clés de la résilience identifiée dans la définition de la résilience d'un SU (figure 3-4)

La table 3-2 présente les notations utilisées et la définition des différents dates et temps.

**Table 3-2. Notations de la figure 3-7 (Kadri 2014).**

Notations	Définition
<b>Niveaux de la Performance</b>	
$Q(t)$	Valeur courante du niveau de la performance du SU pour l'indicateur mesuré $V_e$
$Q(t_{V_{Se}})$	Valeur du niveau de la performance lorsque le SU passe en l'état dégradé à l'instant $t_{V_{Se}}$ (seuil $V_{Se}$ )
$Q(t_{V_{Cr}})$	Valeur du niveau de la performance lorsque le SU passe en état critique à l'instant $t_{V_{Cr}}$ (seuil $V_{Cr}$ )
$Q(t_A)$	Le niveau de la performance le plus bas entre $t_{V_{Se}}$ et $t_F$
$Q(t_E)$	Valeur de la performance lorsque l'action corrective est effective
<b>Dates</b>	
$t_p$	Date d'occurrence de la perturbation
$t_{V_{Se}}$	Date à laquelle la mesure $V_e$ atteint le seuil $V_{Se}$ , donc $Q(t)$ atteint la valeur $Q(t_{V_{Se}})$ 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 corrective est choisie et lancée
$t_A$	Date à laquelle le niveau de la performance du SU est le plus bas
$t_E$	Date à laquelle l'action corrective 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
<b>Temps</b>	
$T_D$	Temps nécessaire pour détecter la perturbation ( $T_D = t_D - t_p$ )
$T_C$	Temps nécessaire pour identifier et choisir une action corrective ( $T_C = t_L - t_D$ )
$T_L$	Temps nécessaire pour lancer l'action corrective ( $T_L = t_E - t_L$ )
$T_R$	Temps de récupération : temps nécessaire pour que le SU retrouve son état normal après application effective de l'action corrective ( $T_R = t_F - t_E$ )
$T_{REC}$	Temps de recouvrement : temps nécessaire pour que le SU retrouve son état normal après lancement d'une action corrective à $t_{V_{Se}}$ ( $T_{REC} = t_F - t_{V_{Se}}$ )

Pour évaluer la résilience, nous représentons le niveau de la performance  $Q(t)$  par la mesure d'un critère de performance sélectionné (ou par une agrégation des critères : moyenne, moyenne pondérée, ...).

Pour la mesure de la résilience  $R$  du SU, une quantification selon différents paramètres a été proposée.

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

$$R_{T_R} = \int_{t_E}^{t_F} [Q(t_{V_{Se}}) - Q(t)] dt \quad (3.1)$$

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

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

$$R_{REC} = \int_{t_L}^{t_F} [Q(t_{VSe}) - Q(t)] dt \quad (3.2)$$

La résilience correspondant au temps nécessaire pour retrouver un fonctionnement normal après le passage du SU à l'état dégradé.

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

$$R_D = \int_{t_D}^{t_F} [Q(t_{VSe}) - Q(t)] dt \quad (3.3)$$

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 de  $t_p$  à  $t_F$ :**

$$R_P = \int_{t_p}^{t_F} [Q(t_{VSe}) - Q(t)] dt \quad (3.4)$$

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

Pour mettre en place ces différentes équations et calculs de la résilience du SU nous avons proposé une procédure, présentée dans la figure 3-8, qui permet d'évaluer la résilience d'un service d'urgences.

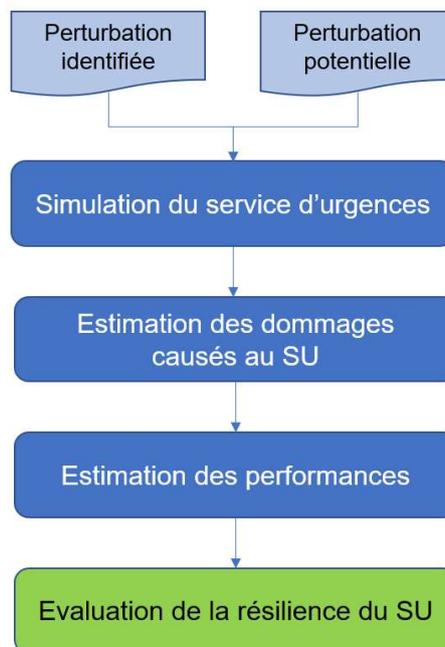


Figure 3-8. Procédure générale d'évaluation de la résilience d'un SU.

L'évaluation de la résilience d'un SU se base sur l'analyse de comportement du SU face à des perturbations déjà rencontrées (perturbations identifiées) ou des perturbations potentielles (susceptibles de se produire au sein du SU).

La deuxième étape consiste à simuler le comportement du SU face à une perturbation pour visualiser et évaluer les actions mises en place pour faire face aux perturbations (Kadri, Chaabane, et Tahon 2014b).

La troisième étape consiste à estimer l'impact de la perturbation en termes de dommages et de pertes en mesurant des indicateurs de performance.

L'estimation des performances, quatrième étape, est réalisée en construisant les vecteurs  $Q(t)$  correspondants aux indicateurs de performance utilisés. Cette analyse permet de constituer la base des connaissances qui sera utilisée dans l'outil d'aide à la décision.

Enfin, la collecte des différentes mesures est utilisée pour l'évaluation de la résilience du SU selon une des équations présentées plus haut.

### 3.3.3. Evaluation de la résilience opérationnelle d'un système cyber-physique de production

Nous avons développé une approche d'évaluation de la résilience opérationnelle d'un système cyber-physique de production soumis à des perturbations prévues et imprévues (Attajer 2023). Cette approche a été conçue de manière que nous puissions modéliser la dégradation de différents indicateurs clés de performance au cours de la période d'une perturbation. La figure 3-9 présente les différentes étapes adoptées dans l'approche d'évaluation.

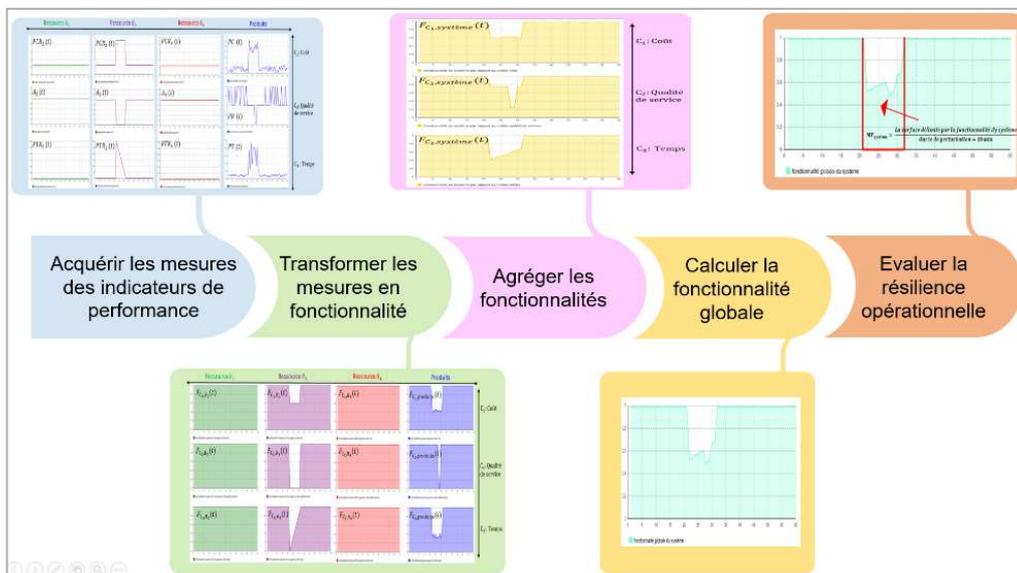


Figure 3-9. Approche d'évaluation de la résilience opérationnelle d'un CPPS.

La première étape a pour objectif **d'acquérir les mesures des indicateurs de performance** selon les critères de performance définies ( $C_1 \dots C_n$ ). Ceci consiste à construire les indicateurs de performances qui permettent de mesurer les impacts des perturbations sur les entités d'un système de production comme par exemple le nombre de panne d'une ressource, le taux d'occupation des machines, ... Toutes les données permettant la mesure de ces indicateurs de performance sont

collectées permettant de suivre la variation des indicateurs de performances dans le système en présence d'une perturbation au niveau d'une entité donnée.

La deuxième étape est de **transformer les indicateurs en une mesure de continuité de fonctionnalité** définie comme étant les caractéristiques ou les propriétés qui font que chaque entité de production puisse remplir sa fonction. Il peut s'agir des opérations et des services qui peuvent être réalisés sur les ressources du système (e.g., montage, stockage, nettoyage). Dans cette étape, notre objectif est de déterminer dans quelle mesure les fonctionnalités attendues peuvent être impactées par une perturbation. Afin de garantir l'uniformité et de faciliter l'analyse, les fonctionnalités, notée  $F$ , seront comprises entre 0 et 1.

La troisième étape consiste à **agréger les fonctionnalités pour calculer la fonctionnalité du système**. Nous modélisons d'abord les poids de chaque entité de système qui représentent son degré d'importance par rapport à la continuité du service au moment de la perturbation. Les poids des entités du système dépendent de la décision de pilotage prise par l'entité décisionnelle (le décideur, le produit intelligent...). Nous notons les poids d'une entité par  $W_q(\text{perturbation}, \text{décision})$ , ( $W_q \in [0, 1]$ ), 1 si une entité est importante pour assurer la continuité de service en cas de perturbations, 0 sinon. Etant donné les fonctionnalités de chaque entité  $q$  ( $q \in [1 .. Q]$ , avec  $Q$  : nombre des entités considérées d'un système de production) par rapport à un critère  $C_n$ , ( $F_{C_n,1}, \dots, F_{C_n,Q}$ ), la fonctionnalité du système est une fonction qui caractérise sa capacité à assurer la continuité de flux de service. Cette fonction est dynamique et évolue avec le temps et tient compte des différentes fonctionnalités de chaque entité. La fonctionnalité du système est calculée en utilisant l'Equation (3.5) :

$$F_{C_n, \text{système}}(t) = \frac{1}{\sum_{q \in \{1, Q\}} W_{C_n, q}(t)} \sum_{q \in \{1, Q\}} W_{C_n, q}(t) \times F_{C_n, q}(t) \quad (3.5)$$

La quatrième étape est de **calculer la fonctionnalité globale du système** en utilisant la formule:

$$F_{\text{système}}(t) = \sum_{n \in \{1, N\}} w_{C_n} \times F_{C_n, \text{système}}(t) \quad (3.6)$$

Enfin nous évaluons la résilience opérationnelle du système en calculant une mesure de performance, noté  $MP_{\text{système}}$ . Cette mesure doit être évaluée sur l'intervalle du temps  $[t_o, t_o + T]$  avec  $t_o$  date d'occurrence de la perturbation et  $T$  la durée de la perturbation. Nous utilisons ainsi la formule (3.7) pour calculer la  $MP_{\text{système}}$ :

$$MP_{\text{système}}(\text{perturbation}) = \frac{\int_{t_o}^{t_o+T} F_{\text{système}}(t) dt}{T} \quad (3.7)$$

La mesure  $MP_{\text{système}}$  est relative au rapport de l'aire de la surface délimitée par la fonctionnalité globale du système pendant la durée de perturbation. Cette représentation nous permet de suivre la dégradation de fonctionnalité du système et d'évaluer la résilience opérationnelle du système pendant tout le cycle de vie d'une perturbation.

### **3.4. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté nos contributions pour répondre aux verrous scientifiques suivants : V1 (**définition de la robustesse et définition de la résilience**) et V5 (**évaluation de la robustesse et évaluation de la résilience**). Nous avons réalisé un état de l'art détaillé pour la définition des concepts de robustesse et de résilience. Cette étude nous a permis d'identifier la définition la plus appropriée pour la problématique identifiée et le champ applicatif utilisé. Nous nous sommes intéressés à des problématiques scientifiques différentes : ordonnancement sous incertitudes, gestion et management des situations de tensions et gestion des perturbations opérationnelles dans un système cyber-physiques de production.

Nous avons travaillé dans deux domaines différents : les systèmes manufacturiers et les systèmes de soins et de santé, montrant notre volonté d'apporter des contributions génériques sans limitation du domaine applicatif. Nous avons également contribué à proposer des approches quantitatives pour l'évaluation de la robustesse et de la résilience permettant ainsi d'apporter une aide aux décideurs pour le pilotage des systèmes de production dans un contexte perturbé. Le chapitre suivant va se focaliser sur les verrous scientifiques 2, 3 et 4 qui concernent les approches de pilotage avant , pendant et après l'occurrence de la perturbation en cohérence avec les définitions des concepts présentées dans ce chapitre et en appliquant les modes d'évaluation de la robustesse et de la résilience.



# Chapitre 4. Contributions scientifiques : approches de pilotage

**Objectifs du chapitre**

*Ce chapitre a pour objectif de détailler nos approches de pilotage des systèmes complexes soumis à des perturbations opérationnelles et récurrentes. Nous présentons tout d'abord le cadre conceptuel des approches et les verrous scientifiques auxquels nous devons répondre. Nous détaillons ensuite les différentes approches selon les phases de la perturbation (avant, pendant et après la perturbation). Nous présentons une synthèse des travaux et une discussion autour de l'évolution des approches développées. Nous terminons ce chapitre par une conclusion.*

## 4.1. Cadre conceptuel des approches de pilotage d'un système de production soumis à des perturbations

Ce chapitre est consacré aux approches de pilotage développées permettant à différents systèmes complexes de faire face à différents types de perturbations. Nous répondons aux verrous scientifiques V2 (**anticiper et détecter l'occurrence des perturbations**), V3 (**réagir aux perturbations**) et V4 (**apprendre des perturbations**).

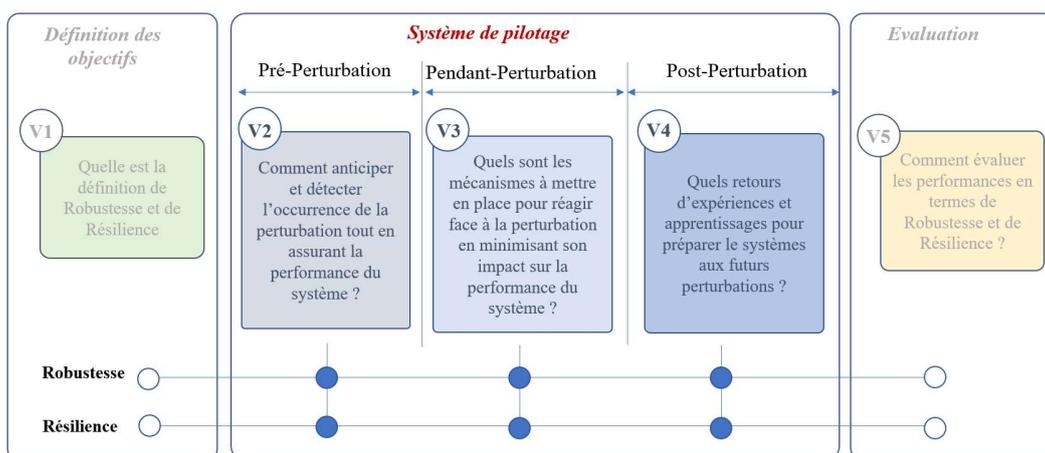


Figure 4-1. Organisation des contributions.

Nous avons adopté le même exercice pour positionner toutes nos contributions dans la figure 4-2 en précisant les points développés dans chaque contribution selon ces verrous scientifiques.

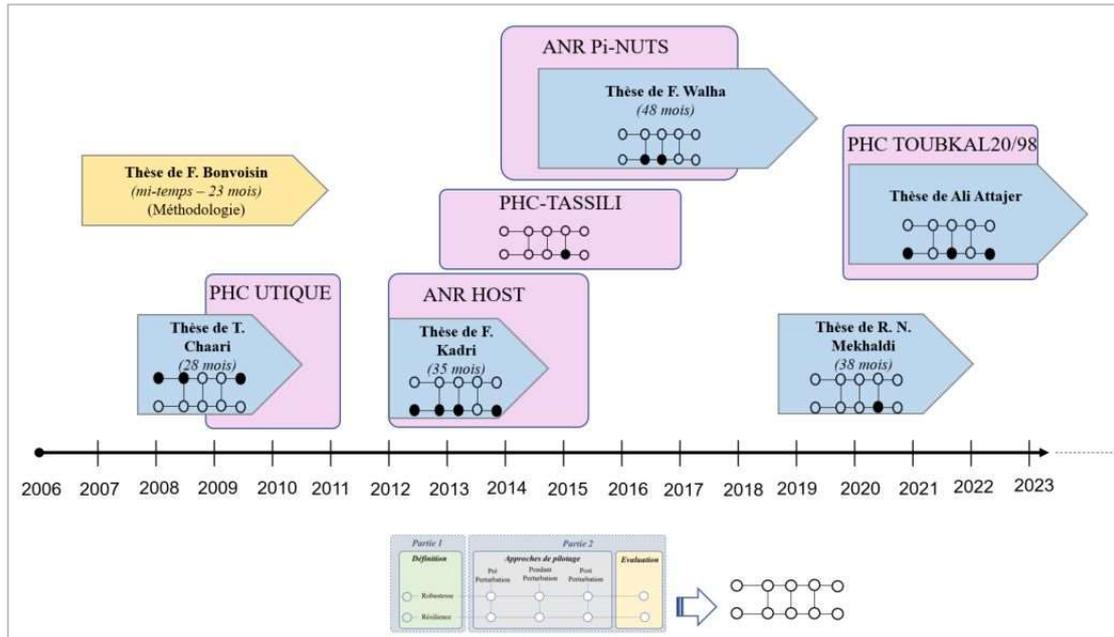


Figure 4-2. Répartitions de nos contributions dans le temps et selon les verrous scientifiques identifiés.

Nous avons proposé un cadre (*framework*) afin de positionner les différents travaux de recherche autour du pilotage des systèmes de production de biens et de services soumis à des perturbations (Sondes Chaabane et Trentesaux 2019). Notre *framework* a été conçu en fonction des périodes de perturbation (pré, pendant et post-perturbation), des niveaux et des étapes des processus de décision (stratégique, tactique, opérationnel et en temps réel). Ce *framework*, est présenté dans la figure 4-3.

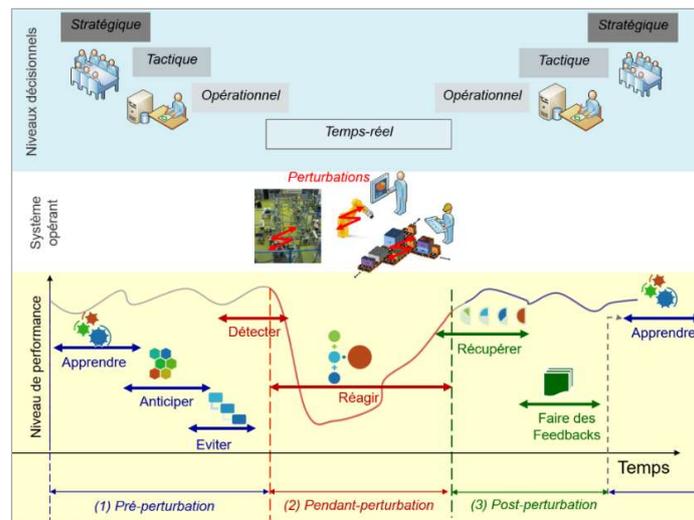


Figure 4-3. Cadre de positionnement des approches de pilotage (Chaabane et Trentesaux 2019).

Durant la période « pré-perturbation », le système de production doit être en mesure de se préparer et d'anticiper différentes actions avant l'occurrence de la perturbation. Il peut aussi profiter de cette période pour apprendre des perturbations passées afin de les éviter ou les détecter rapidement.

Durant la période « pendant-perturbation », le système doit être en capacité de réagir aux perturbations et de les gérer. Il doit mettre en place des actions lui permettant de retrouver son état normal.

La période « post-perturbation » est consacrée à la récupération et les retours d'expérience de ce qui s'est passé durant la perturbation.

Nous allons détailler nos travaux réalisés selon ce *framework*.

## 4.2. Contributions des systèmes de pilotage dans la phase de pré-perturbation

Dans cette section, nous présentons nos contributions des approches développées pour le pilotage des systèmes de production de biens et de services lors de la phase « pré-perturbation ». Elle s'inscrit dans la première partie de notre *framework* permettant d'apprendre, d'anticiper et d'éviter l'occurrence d'une perturbation.

Nous avons travaillé des approches permettant d'anticiper et d'éviter des perturbations avant leur occurrence :

- 1- Ordonnancement robuste avec des incertitudes des temps opératoires des travaux dans le cas d'un flow shop hybride.
- 2- Prédiction de nombre d'arrivées journalières des patients dans un service d'urgence pendant les périodes épidémiques afin d'anticiper ces situations.
- 3- Pilotage proactif d'un service d'urgence pour anticiper les situations de tension.

### 4.2.1. Ordonnancement robuste : cas d'un flow shop hybride

L'ordonnancement sous incertitudes est un thème de recherche qui a intéressé plusieurs chercheurs dans différentes disciplines scientifiques (Chaari et al. 2014). Lors des travaux de thèse de M. Chaari (Chaari 2010; Chaari et al. 2011), nous avons considéré le problème d'ordonnancement robuste dans le cas d'un flow shop hybride sous incertitudes. Les incertitudes ont porté sur les durées d'exécution des travaux (jobs) sur les machines. Nous avons défini des scénarios afin de modéliser ce type d'incertitudes. L'objectif de nos travaux est de proposer un algorithme génétique permettant d'obtenir une solution robuste de bonne performance, qui est peu sensible à ces incertitudes selon la définition de robustesse présentée dans le chapitre précédent.

Nous avons développé un algorithme intégrant une fonction d'évaluation robuste. La détermination de cette dernière est basée sur un critère de robustesse agrégeant deux objectifs. Ceci consiste à évaluer, à chaque génération, dans l'algorithme génétique, tous les chromosomes sur un ensemble de scénarios perturbés (c'est-à-dire que la population est générée aléatoirement et les nouveaux enfants mutés sont évalués sur les mêmes scénarios perturbés). Cet ensemble de scénarios change d'une génération à une autre. Cet algorithme permet de générer une séquence

robuste qui minimise le *makespan* du scénario initial et la déviation entre ce *makespan* et le *makespan* des scénarios perturbés. Le processus de l'algorithme génétique pour l'ordonnancement robuste est illustré dans la figure 4-4.

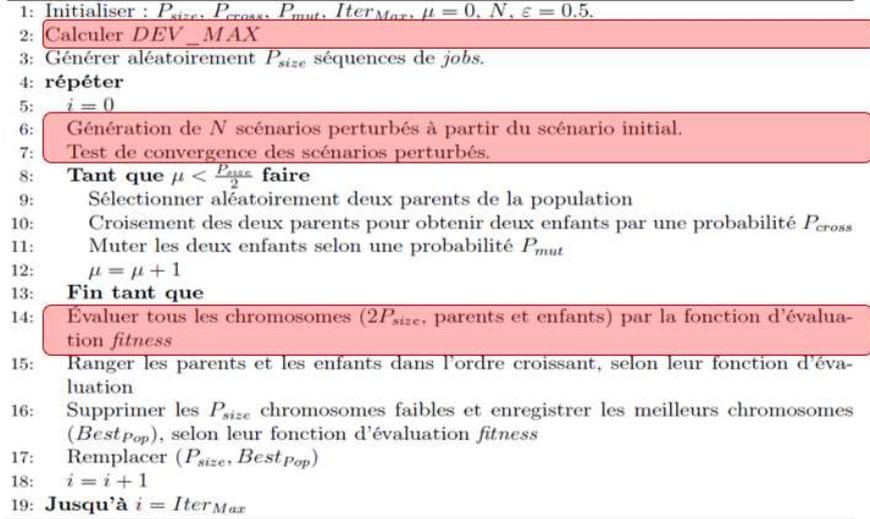


Figure 4-4. Algorithme génétique pour l'ordonnancement robuste (Chaari 2010; Chaari et al. 2011).

Le critère de performance utilisé dans ces travaux est le *makespan*, nous avons donc évalué la robustesse en utilisant l'équation présentée dans la figure 3-6 du chapitre 3. Ceci nous a permis de définir l'équation de robustesse normalisée suivante (figure 4-5).

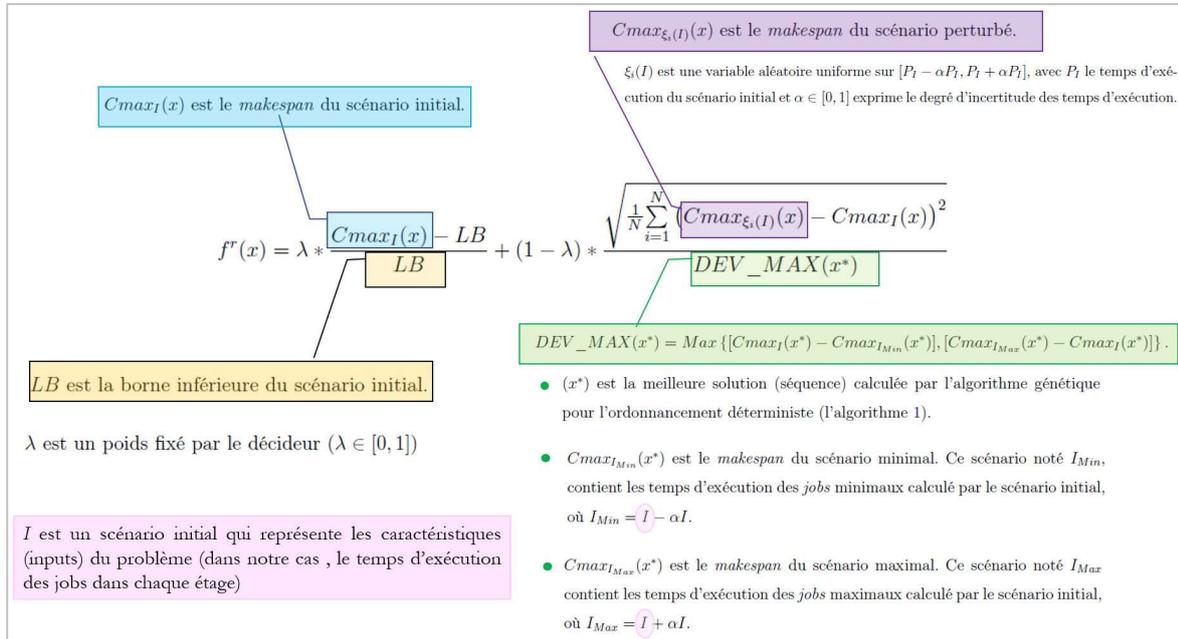


Figure 4-5. Fonction robuste (*makespan*) (Chaari et al. 2011).

La fonction d'évaluation robuste consiste à minimiser simultanément le *makespan* du scénario initial et la déviation entre le *makespan* des scénarios perturbés et le *makespan* du scénario

initial. Cette déviation permet de mesurer la dispersion des *makespan* des scénarios perturbés autour du *makespan* du scénario initial.

Afin de valider notre approche nous avons réalisé une démarche expérimentale basée sur la simulation et illustrée dans la figure 4-6.

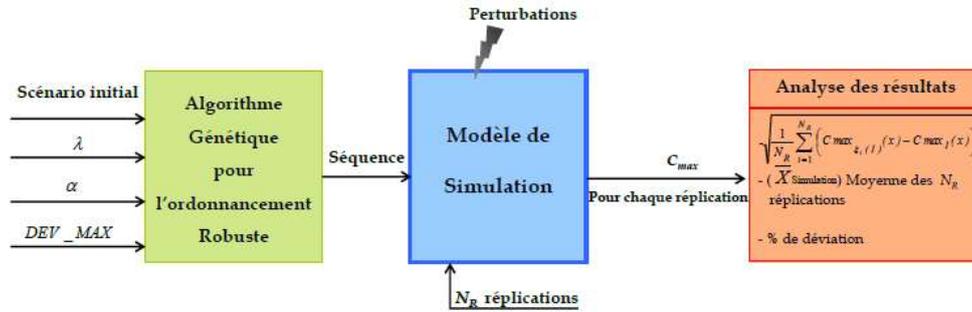


Figure 4-6. Démarche expérimentale pour la validation de l'AG robuste.

Les résultats obtenus sur les benchmarks utilisés montrent la robustesse de notre approche face aux perturbations. Nous illustrons certains des résultats dans la figure 4-7.

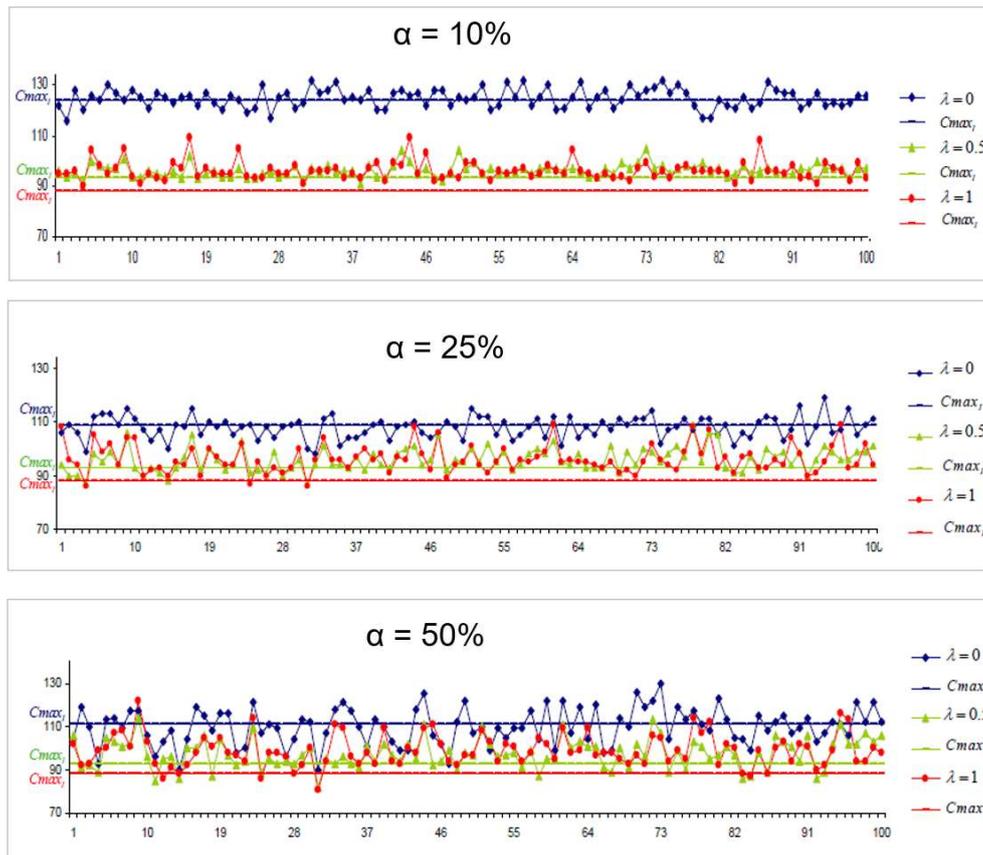


Figure 4-7. Résultats de Exemple des 100 répliques pour le scénario J10c5a2 avec un degré d'incertitude  $\alpha$  (resp. 10%, 25% et 50%).

Nous remarquons que, pour différents degrés d'incertitude  $\alpha$ , le pourcentage de déviation diminue quand  $\lambda$  diminue. Ceci montre la confiance accordée à la solution robuste, même dans le

cas d'un *makespan* du scénario initial plus élevé. Quand le degré d'incertitude augmente, les ordonnancements robustes résistent plus comparés aux ordonnancements non robustes. Ceci prouve qu'un ordonnancement non robuste deviendra plus rapidement inefficace avec les incertitudes comparé à un ordonnancement robuste.

La table 4-1 synthétise pour chaque valeur de  $\lambda$  la valeur de la déviation moyenne (% *deviation*) de toutes les instances en fonction des différents degrés d'incertitude  $\alpha$ .

**Table 4-1. Pourcentage de déviation moyenne de toutes les instances (Chaari 2010).**

		$\alpha$		
		10%	25%	50%
$\lambda$	1	7.31	7.64	8.52
	0.5	2.47	2.32	3.78
	0	0.42	0.24	0.61

Les résultats montrent que l'écart entre  $\lambda=1$  et  $\lambda=0.5$  est plus élevé que celui entre  $\lambda=0.5$  et  $\lambda=0$ .

Au vu des résultats obtenus pour les deux objectifs et présentés plus haut, le meilleur compromis entre l'efficacité et la robustesse correspond à  $\lambda \in [0.5, 1[$ .

Le temps de calcul (CPU) d'un algorithme génétique pour l'ordonnancement robuste est plus élevé que dans le cas sans incertitudes. Ce résultat s'explique par la nouvelle fonction d'évaluation robuste qui exige un nombre important de scénarios perturbés à chaque itération. Nous avons relevé une moyenne égale à 291,2 secondes sur toutes les instances contre 0.2 secondes pour le cas sans perturbations.

#### 4.2.2. Séries chronologiques pour la prévision de nombre d'arrivées journalières au SUP

La prévision de flux patients constitue un élément crucial pour l'anticipation et le management des situations de tension causées par un flux important de patients dans un service d'urgence. Les méthodes de modélisation des séries chronologiques ont montré leur intérêt pour la prédiction des demandes de soins aux urgences hospitalières en raison de leur facilité d'utilisation, de mise en œuvre et d'interprétation.

Dans les travaux de thèse de F. Kadri (Kadri, Chaabane, et al. 2014b; 2014a; Kadri 2014) nous avons proposé un modèle de prévisions de nombre d'arrivées journalière des patients selon la méthode présentée dans la figure 4-8.

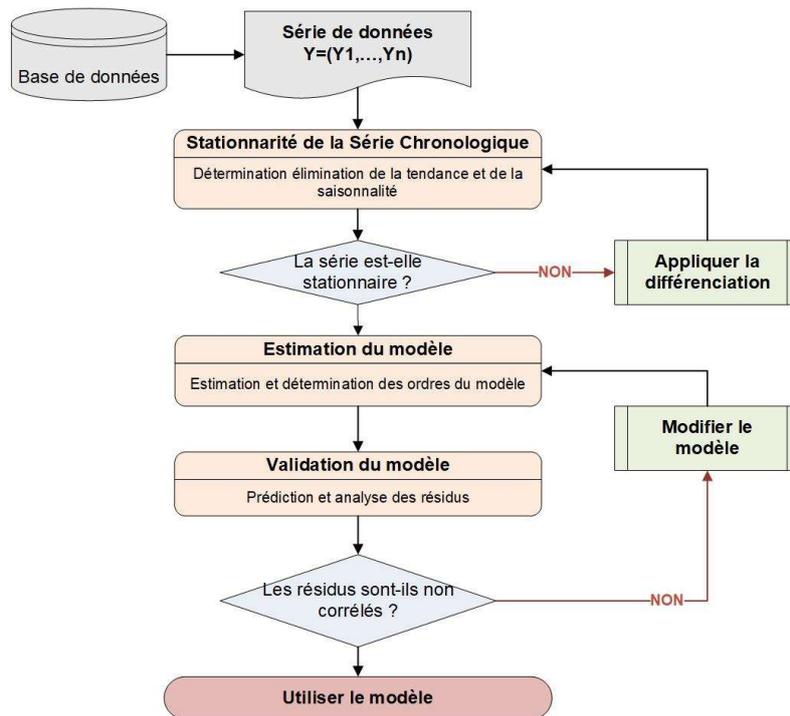


Figure 4-8. Méthode de modélisation des séries chronologiques en utilisant la procédure de (Box et Jenkins 1976).

Nous commençons par identifier la structure de la série temporelle en observant sa stationnarité. La non-stationnarité de la série temporelle est visible sur la tendance de la série (augmentation ou diminution de la tendance). Dans ce cas on applique la différenciation qui remplace la série originale par la série des différences des points adjacents.

Une fois la stationnarité d'une série est observée, nous déterminons les ordres du modèle sélectionné. Dans notre étude nous nous sommes intéressés au modèle ARMA (*Autoregressive-Moving-Average*), Autorégressif et moyenne mobile. Il est présenté comme étant 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).

Le modèle Autorégressif et moyenne mobile, ARMA (p, q) combine une partie autorégressive (AR) et une partie moyenne mobile (MA) (Kadri 2014) (figure 4-9).

$$Y_t = \underbrace{\sum_{i=1}^p a_i Y_{t-i}}_{AR(p)} + \underbrace{\sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j}}_{MA(q)} + \underbrace{\varepsilon_t}_{\text{Bruit blanc}}$$

Figure 4-9. Paramètres du modèle ARMA (p,q).

Dans l'analyse des séries chronologiques, l'opérateur de retard B, défini 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, nous pouvons définir l'équation (4-1) comme suit :

$$\begin{aligned} \emptyset(B)Y_t &= \Theta(B)\varepsilon_t, \\ \emptyset(B) &= (1 - a_1B - a_2B^2 - \dots - a_pB^p) \\ \Theta(B) &= (1 - b_qB - b_qB^2 - \dots - b_qB^q) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4-1})$$

Où :

- $\emptyset(B)$  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).

Les données utilisées sont divisées en deux ensembles : un ensemble d'apprentissage qui permet de construire le modèle et un ensemble de tests qui permet de valider le modèle final. L'analyse des résidus est l'étape la plus importante dans cette validation. Elle consiste à évaluer les propriétés de la distribution des résidus en utilisant des tests statistiques et des graphes.

Le modèle final sera utilisé par la suite pour anticiper la gestion et la planification des interventions pour la gestion des flux des services d'urgence.

Nous avons appliqué cette démarche aux arrivées journalières au service d'urgence pédiatrique (SUP) au CHU de Lille pour l'année 2012. L'analyse préliminaire des données nous a permis de considérer les types de patients selon le groupe d'études multicentriques des services d'accueil GEMSA correspondant à des modes d'admission imprévus : patients de classe GMSA2 (notée G2) (patient non convoqué, arrivée inattendue, retour à domicile après les soins d'urgences) et patient de classe GEMSA4 (notée G4) (patient non convoqué, arrivée imprévue, hospitalisation après prise en charge aux urgences. Nous avons également retenu la série correspondant au nombre total d'arrivées au SUP (notée Total).

Afin d'identifier les modèles, les données des trois séries sont divisées en deux ensembles : un ensemble de **données d'apprentissage** pour construire le modèle et un ensemble de **données de test** pour valider le modèle final.

Nous avons observé aucune périodicité apparente dans les fonctions d'auto-corrélation (ACF) correspondantes 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. Les séries étant stationnaires, 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 ( $p, q$ ).

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 4-2.

**Table 4-2. Modèles ARMA retenus.**

Série	Modèle ARMA( $p,q$ )	Equation
G2 (GEMSA 2)	ARMA(2,1)	$(1 - 0,36B - 0,07B^2)Y_t^{G2} = (1 - 0,40B)\varepsilon_t$
G4 (GEMSA 4)	ARMA(1,1)	$(1 - 0,24B)Y_t^{G4} = (1 - 0,23)\varepsilon_t$
Total	ARMA(2,1)	$(1 - 0,22B - 0,01B^2)Y_t^{Total} = (1 - 0,23B)\varepsilon_t$

Pour valider les modèles sélectionnés nous avons utilisé l'erreur quadratique moyenne (EQM) et le coefficient de détermination ou  $R^2$  :

- *Evaluation avec le critère EQM* : c'est l'écart moyen des valeurs prédites par rapport à celles observées, il est défini comme suit :

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum(\hat{Y}-Y)^2}{n}} \quad (\text{Eq. 4-2})$$

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

- *Evaluation avec le critère  $R^2$*  : ce critère est défini comme suit :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{Eq. 4-3})$$

où  $Y_i$  présente les valeurs observées,  $\hat{Y}_i$  représente les valeurs prédites et  $\bar{Y}$  est la moyenne des données observées.  $R^2 = 1$ , indique que le modèle s'adapte parfaitement aux données. Le degré d'ajustement, diminue au fur et à mesure que cette  $R^2$  rapproche de zéro.

**Table 4-3. Mesures de validation statistiques appliquées aux données des trois modèles.**

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 4-3, 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. La normalité des résidus a été vérifiée par l'analyse de la droite de Henry et de l'histogramme. L'absence d'auto-corrélation entre les résidus a été également vérifiée. Les différents tests ont montré que les résidus sont normalement distribués et non corrélés. Ces résultats valident donc les trois modèles proposés (Kadri et al. 2014).

Nous avons utilisé les modèles ARMA développés pour les séries G2, G4 et Total pour la prévision du nombre d'arrivées journalières de patients au SUP. Les résultats de la prévision sont ensuite comparés avec les valeurs réelles. Les prévisions du nombre d'admissions quotidiennes au SUP sur un horizon d'une semaine de sept jours ( $H=7$ ) sont présentées dans la figure 4-10.

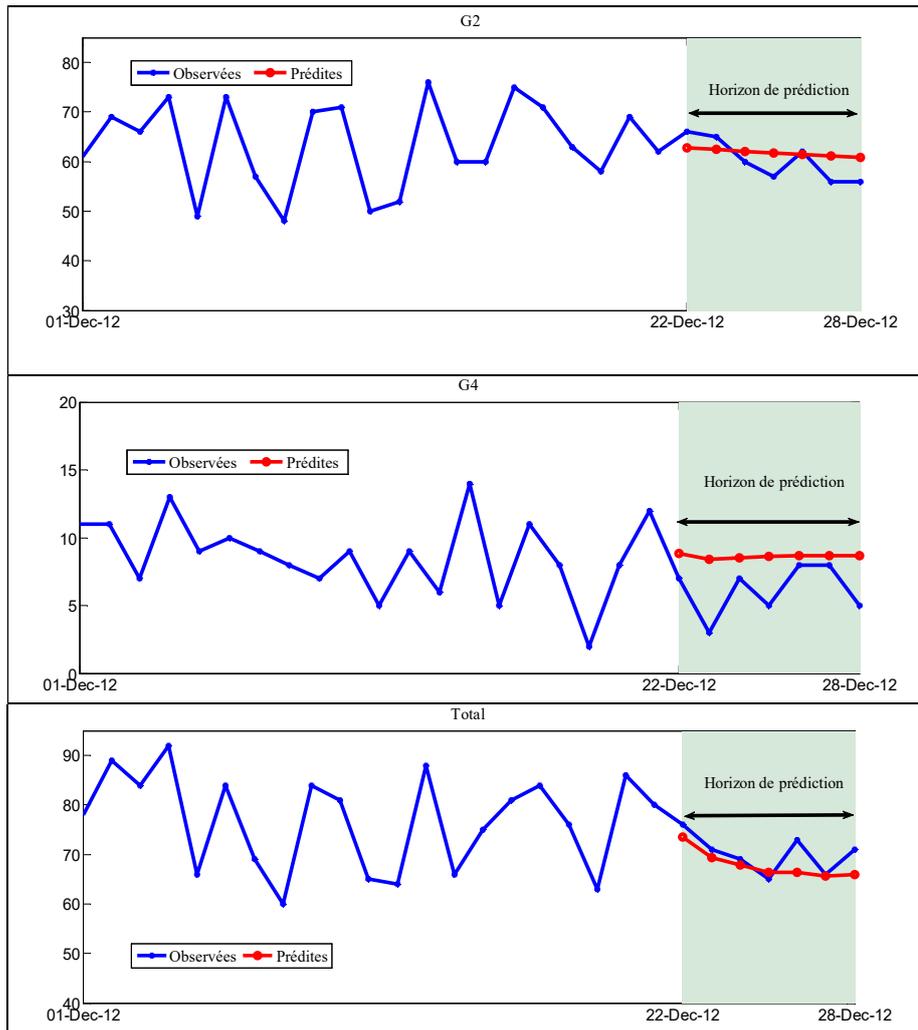


Figure 4-10 : Prédiction à un horizon  $H = 7$  jours, séries G2, G4 et Total.

Les résultats indiquent que les modèles des trois 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 permettent d'estimer les arrivées futures de patients au SUP ce qui offre au responsable du SUP des informations utiles pour mieux anticiper l'organisation et la planification des ressources et mieux gérer les patients en leur offrant une meilleure prise en charge.

#### 4.2.3. Pilotage Proactif d'un service d'urgence

Le service d'urgence constitue un des principaux points d'entrée d'un hôpital. Il est ainsi à la première ligne pour absorber un important flux de patients lors des périodes épidémiques. Nous avons défini les situations de tension d'un service d'urgence comme étant un déséquilibre entre l'offre de soins et la demande. Ces situations impactent fortement les performances du service et perturbent son fonctionnement. Afin de préparer le service à gérer et manager ces situations et perturbations, nous avons proposé et développé un système de pilotage proactif basé sur la simulation à événements discrets (Kadri, Chaabane, et Tahon 2014a).

Notre approche s'appuie sur la méthodologie présentée dans la figure 4-11.

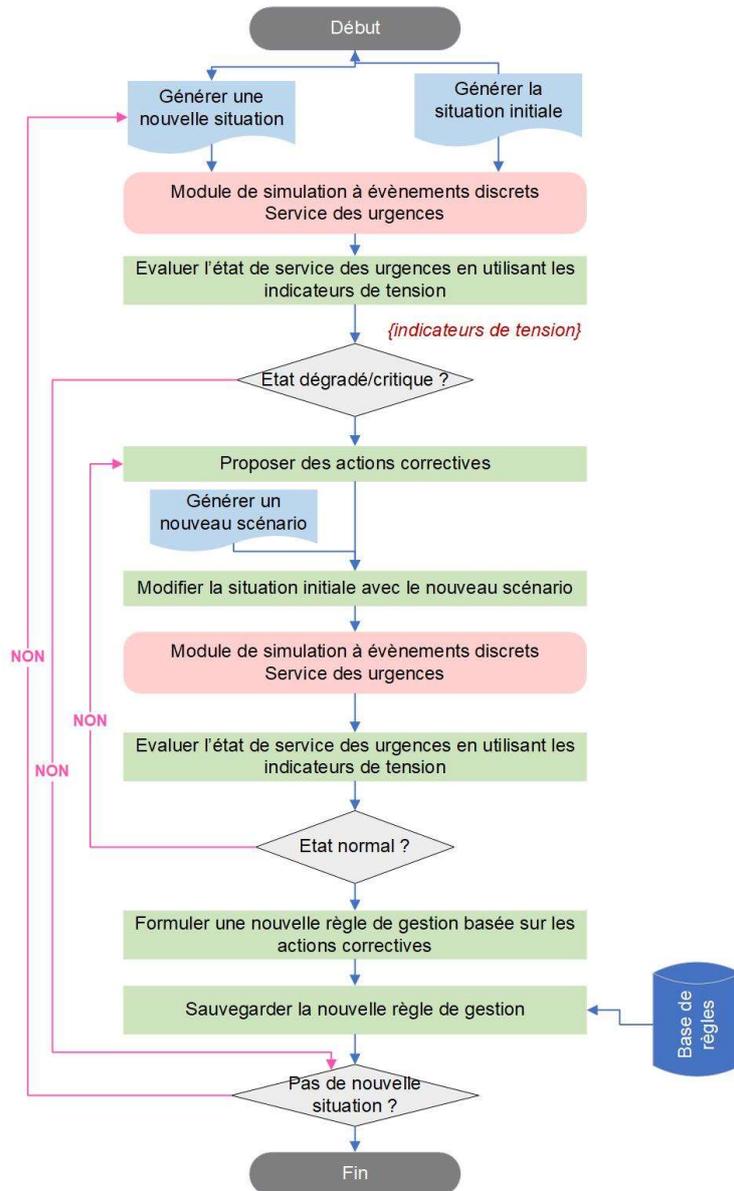


Figure 4-11 : Méthodologie de pilotage proactif d'un service d'urgence.

Le processus de prise en charge des patients dans le SUP est décrit dans la figure 4-12. Ce processus a été élaboré suite à des observations du terrain et des interviews du personnel.

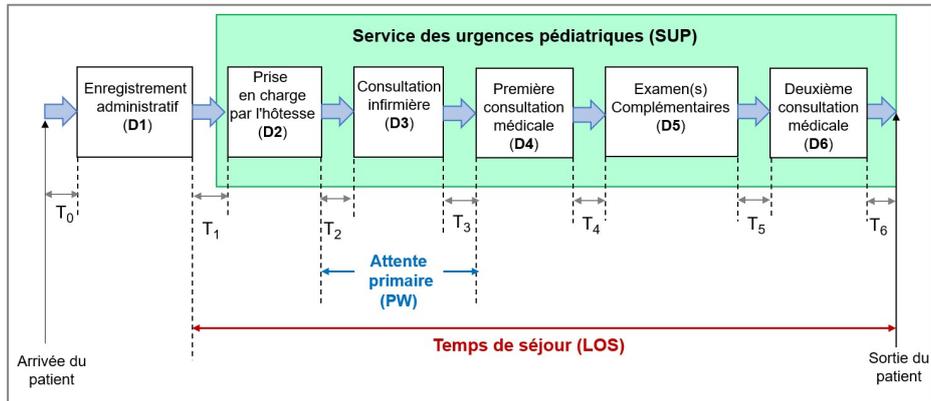


Figure 4-12 : Processus de prise en charge des patients au SUP.

Le processus a permis d'identifier des indicateurs de tension. Nous présentons dans ce qui suit les résultats concernant un de ces indicateurs : *PW* « Attente primaire - *Primary Waiting* » : temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et le premier examen médical.

Nous avons suivi l'évolution des variables d'état de *PW* après l'apparition d'une perturbation (augmentation du nombre d'arrivées de patients) sans application d'actions correctives et avec l'application d'une action corrective. Nous avons identifié les seuils relatifs à *PW* (état normal :  $PW < 60$  min ; état dégradé :  $60 \leq PW < 90$  ; état critique :  $90 \leq PW$ ).

Nous avons implémenté cette méthodologie dans le cas de service d'urgence pédiatrique de Lille (SUP) en utilisant le logiciel de simulation ARENA 16.0 (figure 4-13).

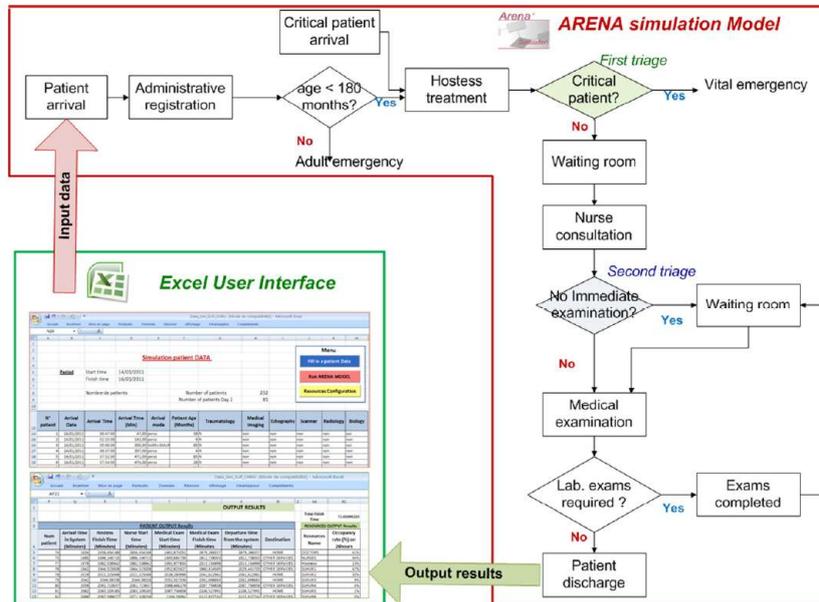


Figure 4-13 : Pilotage proactif de SUP (publiée dans (Kadri, Chaabane, et Tahon 2014a))

Nous avons réalisé différents scénarios pour étudier le comportement du SUP avec des actions correctives que nous avons classé en deux catégories :

- Actions sur les ressources humaines – Alternative A : seules les ressources humaines sont modifiées. Nous avons considéré trois types de scénarios :
  - *Scénario A1* : l'objectif est de trouver l'intervalle de temps optimal qui permet de réduire PW à un niveau acceptable ( $PW < 60$  min) tout en ajoutant un nombre minimum de médecins.
  - *Scénario A2* : l'objectif est de trouver l'intervalle de temps optimal qui permet de réduire  $T_2$  (temps d'attente entre la prise en charge par l'hôtesse et la consultation infirmière) à un niveau acceptable ( $T_2 < 25$  min) tout en ajoutant un nombre minimum d'infirmières.
  - *Scénario A3* : l'objectif est de trouver l'intervalle de temps optimal qui permet la réduction simultanée de PW et  $T_2$  à un niveau acceptable ( $T_2 < 25$  min et  $PW < 60$  min) tout en agissant sur les deux types de ressources (infirmières et médecins).

Les résultats des meilleurs scénarios sont présentés dans la table 4-4.

Table 4-4. Scénarios simulés dans le cas des alternatives 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.]

La figure 4-14 présente l'évolution de PW pour chacun de ces scénarios.

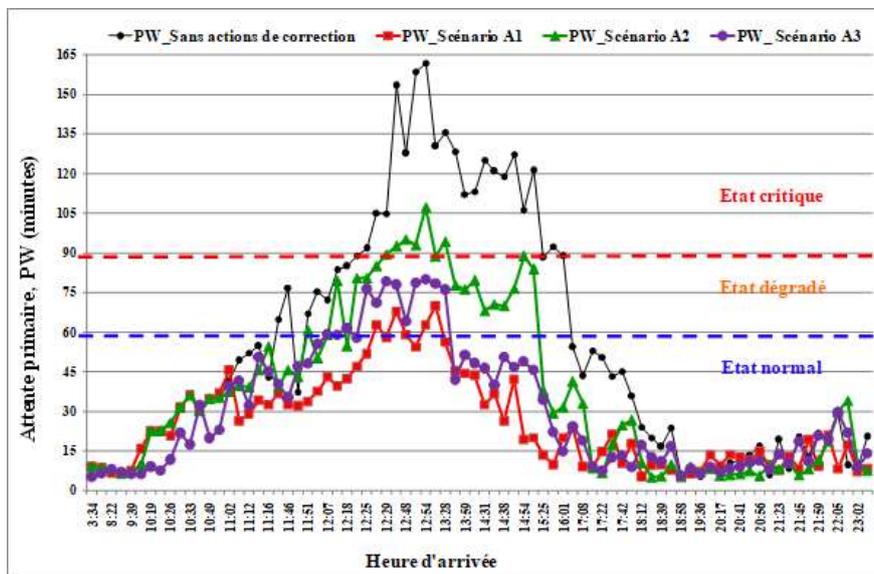


Figure 4-14 : Evolution de l'indicateur PW dans le cas de l'alternative A.

Les scénarios A1 et A3 contribuent à la réduction du temps d'attente primaire (PW) des patients au SUP. On observe un PW de 39 min dans le cas de scénario A1 et de 51 min pour A3 contre un PW initial (sans actions correctives) de 96 min. En plus de ces valeurs, le scénario A1 offre la meilleure alternative avec l'ajout d'un seul type de ressource (1 médecin) contrairement au scénario A3 (1 infirmière et 1 médecin supplémentaires). L'ajout d'une infirmière (scénario A2) a un impact positif sur PW, mais insuffisant pour permettre au système de revenir à l'état normal.

Le SUP a la possibilité de transformer une ou plusieurs chambre(s) de l’UHCD en box de consultation. Cette action corrective est analysée dans l’alternative B.

- Actions sur les ressources humaines et matérielles - Alternative B : 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 4-5) :
  - *Scénario B1* : une chambre de l’UHCD est transformée en box de consultation.
  - *Scénario B2* : une chambre de l’UHCD est transformée en box de consultation et une infirmière est ajoutée
  - *Scénario B3* : une chambre de l’UHCD est transformée en box de consultation et 1 médecin est ajouté.
  - *Scénario B4* : une chambre de l’UHCD est transformée en box de consultation, 1 infirmière et 1 médecin sont ajoutés.

Table 4-5. Scénarios simulés dans le cas des alternatives 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 4-15 présente l’évolution de PW pour chacun de ces scénarios.

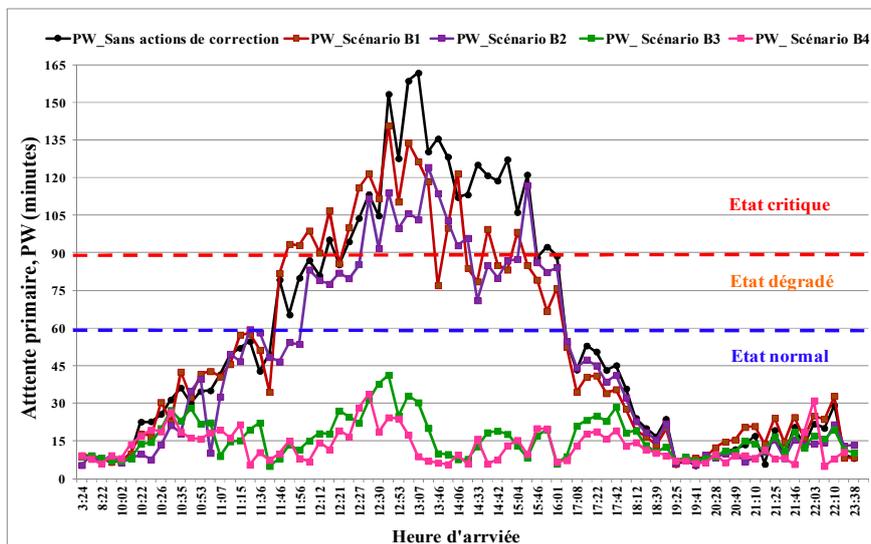


Figure 4-15 : Evolution de l'indicateur PW dans le cas de l'alternative B.

On remarque que durant la période de tension identifiée entre 11h et 17h, le temps moyen d’attente primaire (PW) a diminué de 97 min (cas de la situation initiale sans actions correctives) à 88 min, 79 min, 19 min, et 14 min respectivement pour les scénarios B1, B2, B3 et B4. Les scénarios B3 et B4 représentent les meilleures alternatives permettant de diminuer la valeur de PW

à un niveau acceptable ( $PW < 60$  minutes). En plus de ces résultats, le scénario B<sub>3</sub> est économiquement le plus intéressant car il ne nécessite qu'un médecin supplémentaire entre [11h-14 h] et la réaffectation d'une seule chambre UHCD en boîte de consultation durant la période [11h-17h].

Suite à ces expérimentations nous avons retenu les deux meilleurs scénarios de chacune des alternatives à savoir : A1 (1 médecin [11h-14h]) et B3 (1 médecin [11h-14h] et 1 box [11h-17h]) pour réaliser l'évaluation de la résilience de SUP en appliquant la méthodologie dans le chapitre 3 (section 3.3.2). Nous avons choisi comme paramètre de mesure de la résilience : le temps de récupération  $T_R$ . L'indicateur de performance retenu est le  $PW$ . Les temps de récupération pour les deux meilleurs scénarios A<sub>1</sub> et B<sub>3</sub> sont présentés figure 14-16.

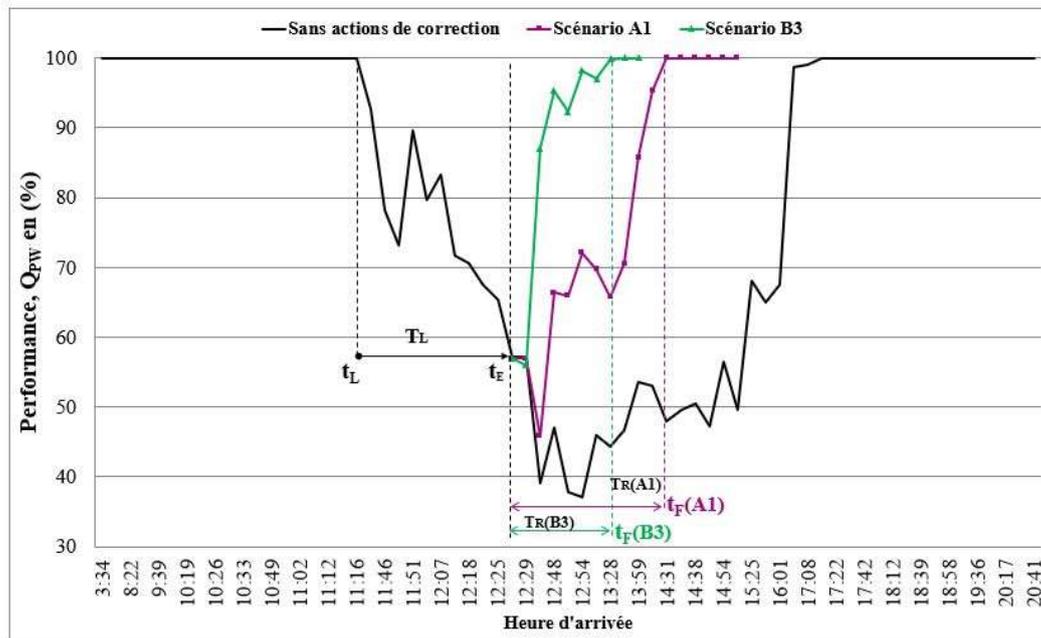


Figure 4-16 : Evolution de la performance QPW (%) pour les deux scénarios A1 et B3.

Initialement 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  $Q_{PW}$  a baissé progressivement jusqu'à  $Q_{PW} = 37.1\%$ . Le SUP a regagné état de performance normal à la date  $t_F = 17h20$ .

Pour analyser l'impact des actions correctives sur le temps de récupération, nous avons appliqué les actions relatives aux scénarios A1 et B3 à  $t_A = 12h30$ , avec un temps de lancement  $T_L = 1h14$  (nous supposons les temps de détection,  $T_D$  et le temps de choix d'une action  $T_C$  sont nuls). Dans le cas du scénario A1, le temps de récupération,  $T_R(A1) = 2h01$ ; le temps de recouvrement,  $T_{REC}(A1) = 3h15$ . Dans le cas du scénario B3,  $T_R(B3) = 1h16$ ; le temps de recouvrement  $T_{REC}(B3) = 2h01$ .

La résilience est calculée suivant l'expression :

$$R_{TR} = \int_{t_E}^{t_F} [100 - Q_{PW}(t)] dt \quad (\text{Eq. 4-4.})$$

Par identification paramétrique, nous avons retenu pour l'évolution du SUP sans action correctrice une parabole et pour les deux scénarios (A1 et B3) deux droites pour A1 et trois droites pour B3, avec une valeur de  $Q_{PW}(t) = 57\%$  à  $t = 0$ .

- **Sans actions correctives** :  $T_R = 290$  min,  $t_E = 750$  min ;  $t_F = 1040$  min;

$$R_{T_R}(Q_{PW}) = \int_{t_E}^{t_F} [100 - Q_{PW}(t)] dt = 10682.$$

- **Scénario A<sub>1</sub>** :  $T_R = 121$  min,  $t_E = 750$  min ;  $t_F = 871$  min;

$$R_{T_R}(A_1) = \int_{t_E}^{t_F} [100 - Q_{PW}(t)] dt = 1525.$$

- **Scénario B<sub>3</sub>** :  $T_R = 76$  min,  $t_E = 750$  min ;  $t_F = 826$  min;

$$R_{T_R}(B_3) = \int_{t_E}^{t_F} [100 - Q_{PW}(t)] dt = 1035.$$

Le calcul de la résilience se base sur la notion de surface couverte par la mesure de la quantité de performance. Plus la surface est petite (donc  $R_{T_R}$  est petit) plus le système est résilient, c'est-à-dire il revient plus rapidement à son état normal (ou nominal). Ceci montre la double dimension de la résilience : revenir à la performance souhaité le plus rapidement possible.

L'évaluation de la performance basée sur l'évolution de la mesure d'indicateur de performance, comme présenté dans les figures 4-14 et 4-15, permet le pilotage de système par la performance et d'avoir l'état de système par rapport à cette mesure. L'évaluation de la résilience, telle que nous l'avons proposée, ne se limite pas à une mesure mais contribue à une interprétation du comportement du système vis-à-vis de l'occurrence d'une perturbation avec les avantages suivants :

- 1- La double dimension de la performance : l'évaluation de la résilience s'appuie sur l'évolution de la proportion de la mesure de l'indicateur par rapport à une norme ou un objectif ou un seuil dans le temps. Cette double mesure permet d'apporter une dimension dynamique à la mesure de l'indicateur. Elle nous indique l'écart par rapport à la mesure cible et aussi le temps écoulé entre la dégradation de cette mesure et le retour à la cible.
- 2- La cohérence de la comparaison des actions correctives : la comparaison des différentes actions correctives s'appuie sur une évaluation normalisée de l'indicateur ce qui permet de voir l'évolution de l'état de système dans le temps pour chaque action.
- 3- La normalisation des mesures : l'évaluation de la résilience s'appuie sur l'évolution de la proportion de la mesure d'un indicateur par rapport à une norme ou un objectif ou un seuil dans le temps. Ceci permet d'avoir le même ordre de grandeur pour n'importe quel indicateur ce qui contribue à la normalisation des mesures de performance. Cette normalisation nous permet de comparer également les indicateurs entre eux.

### 4.3. Contributions des systèmes de pilotage dans la phase de durant l'occurrence des perturbations

Dans cette section, nous présentons nos contributions des approches développées pour le pilotage des systèmes de production de biens et de services lors pendant l'occurrence d'une perturbation. Nous avons orienté nos travaux selon deux grandes classes :

- 1- *Approches de détection* de l'occurrence d'une perturbation permettant ainsi au décideur d'avoir l'alerte le plus rapidement possible et freiner la dégradation de système le plus rapidement possible.
- 2- *Approches de pilotage réactif* permettant de mettre en œuvre des actions rapidement permettant de réagir à la perturbation, réduire son impact et revenir le plus rapidement possible à un état stable ou normal ou optimal.

#### **4.3.1. Approches de détection d'occurrence de situations de tension dans le fonctionnement d'un service d'urgence**

La détection des situations anormales dans un système de production constitue un bon moyen pour gérer efficacement l'occurrence d'une perturbation. La détection rapide et efficace permet au manager de mettre en place les actions nécessaires pour réagir à la perturbation et réduire ainsi son impact néfaste.

Dans les travaux de thèse de M. Kadri ([Kadri 2014](#)), nous avons considéré l'arrivée d'un flux important dans les services d'urgence et les demandes de soins comme sources des perturbations impactant le bon fonctionnement du service. Nous avons proposé deux approches de détection du nombre d'arrivée des patients dans le service d'urgence. La première approche basée sur les modèles combine les méthodes de séries chronologiques (SC) et les techniques de Maîtrise Statistique de Processus (MSP). La deuxième approche combine l'analyse en composante principale ACP et les techniques de Maîtrise Statistique de Processus Multivariée.

Dans ce qui suit nous présentons les deux approches et les principaux résultats.

#### **4.3.2. Détection univariée des arrivées anormales de patients au SUP**

Afin de permettre de détecter les arrivées anormales de patients dans un service d'urgence, nous avons proposé une méthodologie basée sur des modèles de séries chronologique et de maîtrise statistique de processus (figure 4-17). Le problème de détection d'anomalie à base de modèle est constitué de deux processus :

- (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).

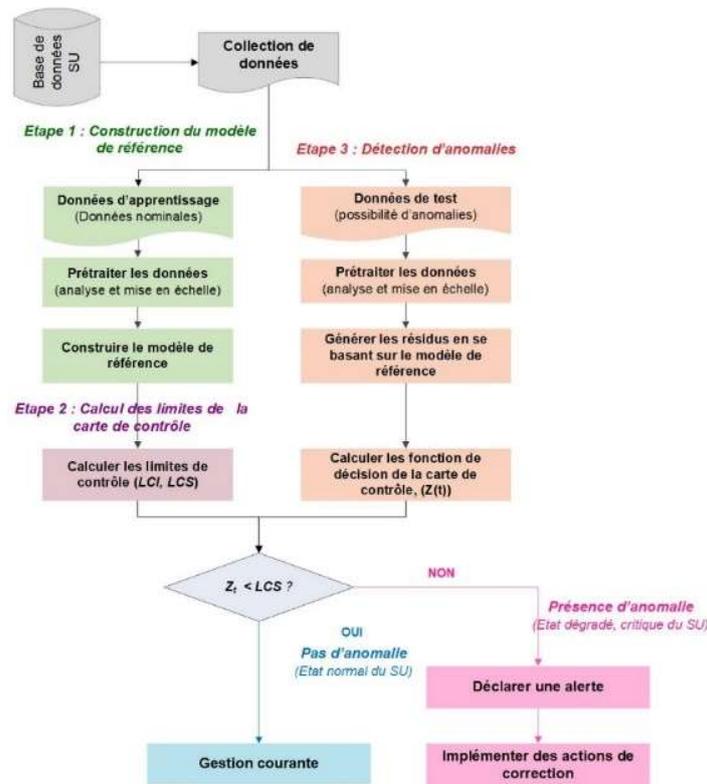


Figure 4-17 : Méthodologie de détection des arrivées anormales des patients dans un SU.

La méthodologie développée est composée de 3 principales étapes suivantes (Kadri et al. 2014) :

1. **Etape 1 - Construction du modèle de référence** (modèle descriptif). Cette étape est composée des trois activités suivantes :
  - a. *Collection de l'ensemble de données d'apprentissage* : collecter les données correspondant à la situation normale/nominale de fonctionnement du SU.
  - b. *Prétraitement des données* : analyser (tendances, la saisonnalité et les variations cycliques dans les séries de données) et standardiser les données collectées qui seront utilisées.
  - c. *Construction du modèle de référence* : construire et valider le meilleur modèle descriptif en se basant sur l'analyse des séries chronologiques.
2. **Etape 2 - Calcul des limites de la carte de contrôle**. Cette étape calcule la limite de contrôle supérieure (*LCS*) et la limite de contrôle inférieure (*LCI*) de la carte de contrôle utilisée en se basant sur les résidus obtenus à partir du modèle de référence.
3. **Etape 3 - détection d'anomalies**. Cette étape est composée de cinq activités :
  - a. *Définition de l'ensemble de données de test* : collecter des données de test qui peuvent éventuellement contenir des situations de tension (anomalies).
  - b. *Prétraitement de données de test* : analyser et standardiser les données.
  - c. *Génération du vecteur des résidus* ( $\epsilon_t$ ) :  $\epsilon_t$  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*  $Z_t$  : définir la mesure qui sera contrôlée (dans

notre cas ça sera les arrivées des patients)

e. *Vérification de l'état du SU et détection des situations anormales :*

- Si  $z_t < LCS$ , aucune anomalie n'est détectée, la gestion courante est maintenue.
- Si  $z_t \geq LCS$ , une alerte est déclenchée pour avertir le manager du SU de l'occurrence d'une situation de tension. Dans ce cas, le manager doit décider des actions à lancer.

Pour mettre en œuvre cette méthodologie nous avons utilisé les données relatives aux arrivées journalières au service d'urgences pédiatriques de CHRU de Lille de janvier 2012 à décembre 2012. Nous avons constaté que l'allure de nombre d'arrivées des patients suit un cycle typique faisant apparaître une période de 24 h00. Ceci nous a conduit à étudier un modèle autorégressif et moyen mobile saisonnier SARMA en estimant ses paramètres (Kadri et al. 2016). Nous avons obtenu et validé l'équation mathématique suivante :

$$(1 - 0.98B^{24})(1 - 0.77B)Y_t = (1 - 0.015B)\varepsilon_t \quad (\text{Eq. 4-5.})$$

Avec  $Y_t$  la variable à prédire,  $\varepsilon_t$  :bruit blanc (voir section 4.2.2.)

Le modèle SARMA développé a été ensuite intégré avec une carte de contrôle EWMA (*Exponentially Weighted Moving Average Chart*). Le choix de type de carte de contrôle a été défini suite à la comparaison des résultats de cette carte avec deux autres cartes de contrôle univariées : la carte de contrôle *Shewhart* et la carte CUSUM (*Cumulative Sum Chart*).

La carte de contrôle EWMA enregistre les informations en effectuant un "lissage" de ces observations basé sur la 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 :

$$z_t = \lambda y_t + (1 - \lambda)z_{t-1} \quad (\text{Eq. 4-6.})$$

où  $\lambda$  est un paramètre de lissage 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  $z_t$  dépasse une limite de contrôle. La construction de la carte EWMA repose sur le choix du paramètre de lissage  $\lambda$  et de la période opérationnelle moyenne qu'on souhaite avoir pendant le pilotage du processus.

La moyenne attendue,  $\mu_0$  étant estimée sur des données historiques, les limites de contrôle inférieure et supérieure, LCI et LCS, sont données par :

$$LCI, LCS = \mu_0 \mp k\sigma_0 \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}} \quad (\text{Eq. 4-7.})$$

où k est un nombre positif contrôlant la valeur LCS. Le degré de lissage peut être ajusté en faisant varier le paramètre  $\lambda$  entre 0 et 1.

En absence de données de test englobant des anomalies, nous avons générés des données test avec deux types d'anomalies simulés : une anomalie brusque et une anomalie progressive.

#### A. Anomalie brusque (cas A)

Cette anomalie correspond à une augmentation brusque des arrivées de patients engendrant l'apparition instantanée d'une situation anormale. Nous avons adopté le modèle suivant :

$$y'_t = y_t (1+b) \quad (\text{Eq. 4-8.})$$

Avec  $y'_t$  désigne la valeur modifiée de  $y_t$  pendant la période durant laquelle l'anomalie est introduite et  $b$ : taux d'augmentation de  $y_t$ .

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 :

- **Cas A1** : Le taux d'augmentation est de 70% ( $b = 0,7$ ,  $y'_t = 1,7 y_t$ )

La figure 4-18 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.

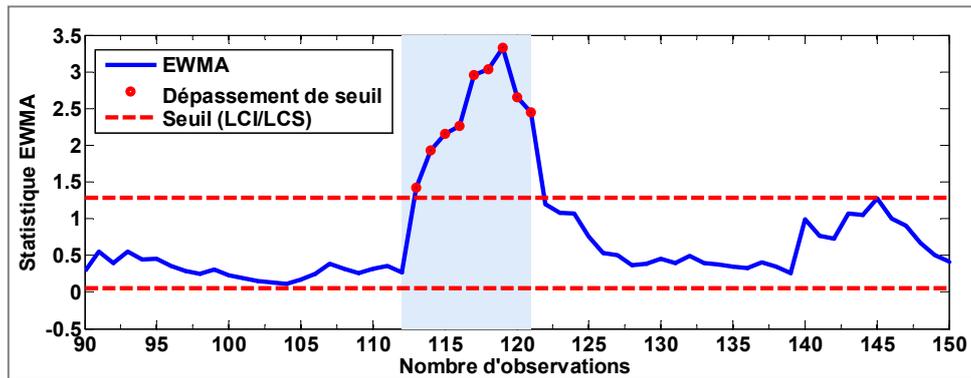


Figure 4-18 : Evolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une situation anormale (cas A1).

Ces résultats montrent 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 alertes.

- **Cas A2** : Le taux d'augmentation est de 30% ( $b = 0,3$ ,  $y'_t = 1,3 y_t$ )

La figure 4-19 présente les résultats de la détection avec un paramètre de lissage de la carte EWMA,  $\lambda = 0,25$ . Ces résultats montrent que la stratégie proposée est en mesure de détecter de manière satisfaisante le comportement anormal sans fausses alarmes.

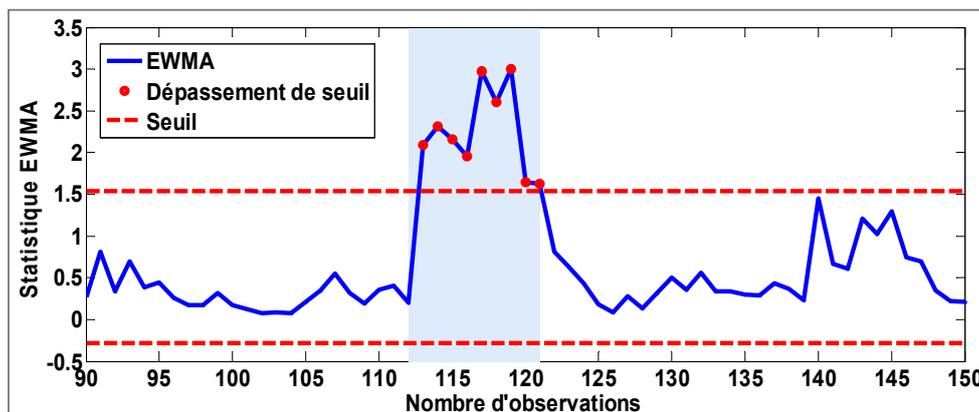


Figure 4-19 : Evolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une situation anormale (cas A2).

### B. Anomalie progressive (cas B)

Cette anomalie correspond à une augmentation progressive des arrivées de patients et une situation anormale se développe lentement. Nous avons adopté le modèle suivant :

$$y'_t = y_t + s(k - ks) \quad (\text{Eq. 4-9.})$$

Avec  $y'_t$  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  $t$ ,  $ks$  le nombre d'échantillons à l'instant où l'anomalie est injectée et  $s$  : pente de la droite  $y'_t$ .

Nous avons augmenté le nombre d'arrivées  $y_t$  entre les instants correspondant à un nombre d'échantillons  $ks = 85$  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 4-20.

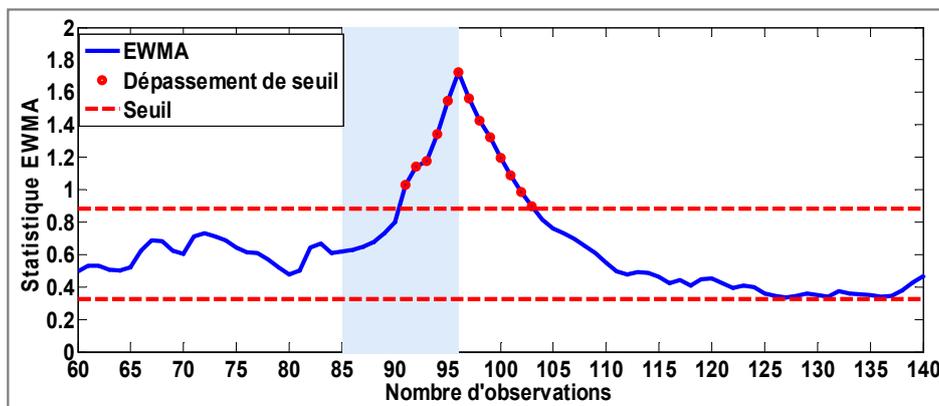


Figure 4-20 : Evolution temporelle de la statistique de la carte EWMA en présence d'une situation anormale progressive (cas B).

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.

Tous les résultats de la carte EWMA ont été comparés à d'autres méthodes de carte de contrôle montrant l'avantage de cette méthode. En plus cette méthode offre une facilité d'interprétation des résultats et de définition des limites ce qui permet une surveillance en ligne d'occurrence des situations de tension au niveau de SUP.

#### 4.3.2.1. Détection multivariée des demandes de soins au service d'urgence

La deuxième méthode de détection concernait les anomalies relatives aux demandes de soins dans un service d'urgence (SU). Elle combine l'analyse en composante principale (ACP) et la Maîtrise Statistique de Processus Multivariée (MSPM). Lorsque le service d'urgence fonctionne dans des conditions normales, la valeur des résidus est égale ou proche de zéro. Quand une anomalie survient, les résidus s'écartent sensiblement de zéro indiquant la présence d'un état nouveau, nettement distinguée du mode de fonctionnement normal. Nous avons adopté la méthodologie présentée dans la figure 4-21 (Harrou et al. 2015).

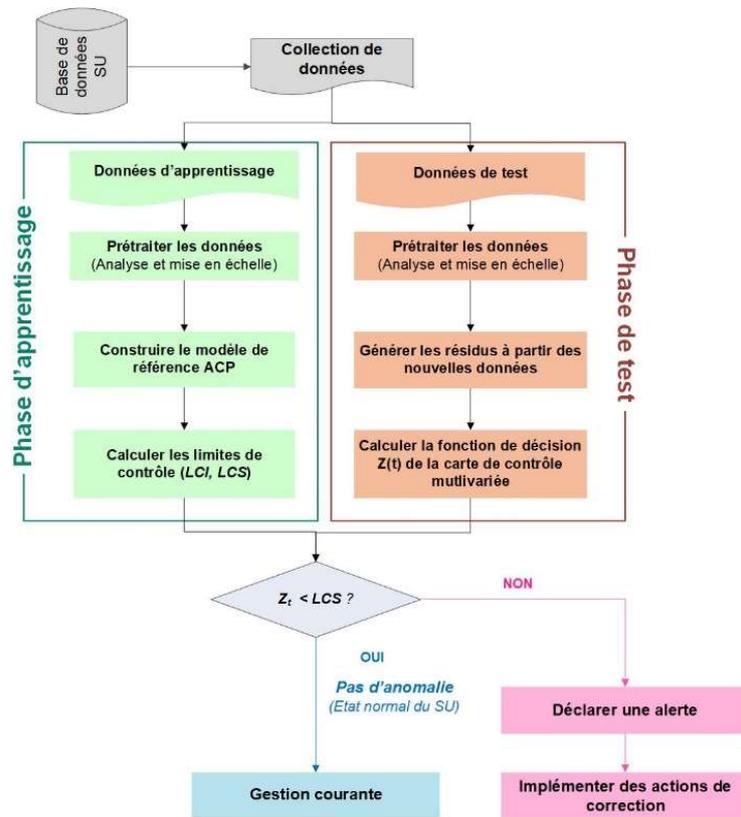


Figure 4-21 : Méthodologie de détection des demandes de soins anormales des patients dans un SU.

La méthodologie comporte deux phases principales, une phase d'apprentissage et une phase de test :

1. **Phase d'apprentissage.** L'objectif de cette étape est de construire un modèle de référence ACP à partir de données du SU. Cette étape est composée des trois activités suivantes :
  - a. *Prétraitement des données* en analysant (tendances, la saisonnalité et les variations cycliques dans les séries de données) et standardisant les données utilisées.
  - b. *Construction du modèle de référence ACP* en utilisant les données d'apprentissage représentant l'état de fonctionnement normal du SU.
  - c. *Calcul des limites de contrôle de la carte multivariée (LCI, LCS)* en se basant sur les résidus obtenus à partir du modèle de référence ACP.
2. **Phase de test.** Des nouvelles données (données de test) sont prises en compte. Ces données peuvent 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* en définissant et standardisant les nouvelles données qui peuvent éventuellement contenir des anomalies.
  - b. *Génération des résidus* en définissant 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* :
    - Si  $z_t < LCS$ , aucune anomalie n'est détectée, la gestion courante est maintenue.

- Si  $z_t \geq LCS$ , 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 les actions correctives et lancer leur mise en œuvre.

Pour mettre en œuvre cette méthodologie nous avons utilisé les mêmes données relatives aux arrivées journalières au service d'urgence pédiatriques de CHRU de Lille de janvier 2012 à décembre 2012. Nous avons considéré huit séries présentées dans la table 4-6. Ainsi nous avons défini une matrice de données (365 lignes, 8 colonnes) utilisée pour construire un modèle de référence ACP après la standardisation des 8 variables.

L'approche ACP suppose que le sous-espace normal peut être correctement décrit par les premières composantes principales comme elles 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 premiers CPs (44,86%, 17,33%, 12,82%, 10,08% et 7,73% des variations totales) car ils captent 92,82% d'informations contenant dans les des variances des données utilisées. Par conséquent, ces cinq premiers CPs sont utilisés pour construire le modèle de surveillance.

**Table 4-6. Scénarios simulés dans le cas des alternatives B.**

Séries	Variables	Définition
y <sub>1</sub>	Nombre d'arrivées	Nombre de patients qui arrive au SUP par jour
y <sub>2</sub>	CCMU 1	Nombre de patients qui arrive au SUP par jour de type CCMU 1
y <sub>3</sub>	CCMU 2	Nombre de patients qui arrive au SUP par jour de type CCMU 2
y <sub>4</sub>	GEMSA 2	Nombre de patients qui arrive au SUP par jour de type GEMSA 2
y <sub>5</sub>	Biologie	Nombre de patients par jour qui ont fait un examen de biologie
y <sub>6</sub>	Radiologie	Nombre de patients par jour qui ont fait un examen de radiologie
y <sub>7</sub>	Scanner	Nombre de patients par jour qui ont fait un scanner
y <sub>8</sub>	Echographie	Nombre de patients par jour qui ont fait un examen d'échographie

Pour tester la capacité de prédiction du modèle construit, nous avons effectué une régression sur les valeurs observées versus les valeurs estimées par le modèle de référence. La figure 4-22 présente les résultats des diagrammes de dispersion.

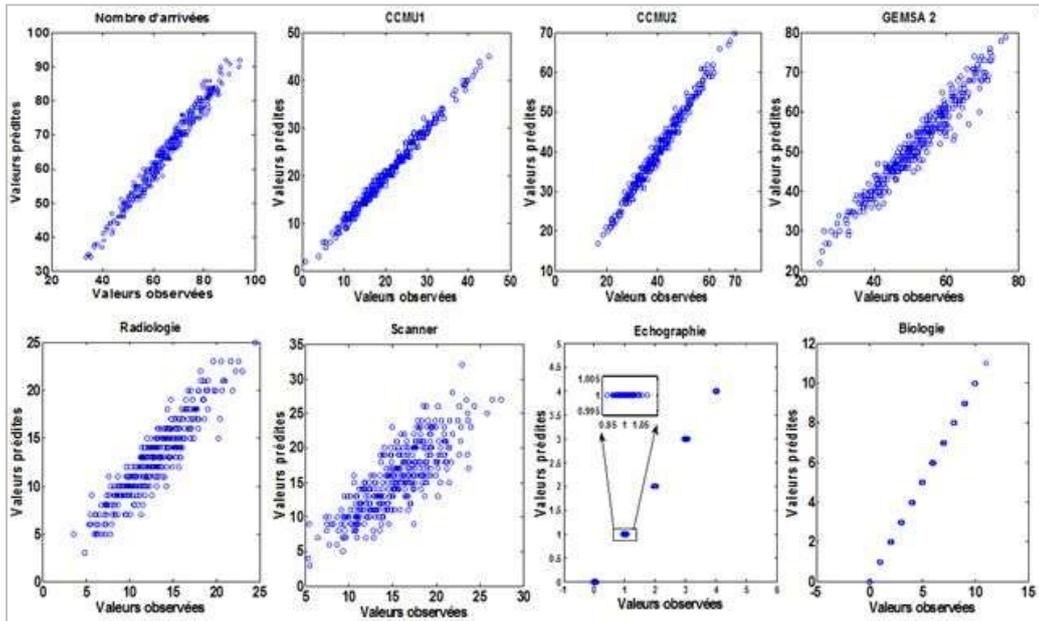


Figure 4-22 : Diagramme de dispersion des valeurs observées versus les valeurs prédites obtenues à partir du modèle ACP.

Le diagramme de dispersion montre que les points sont alignés sur la diagonale prouvant que les valeurs prédites coïncident bien avec les valeurs observées. Nous remarquons que le modèle ACP fournit des prédictions de bonne qualité des données SU prises en compte dans l'analyse de la majorité des séries. La normalité des résidus a été vérifiée : i) par le test de normalité multivariée de (Mardia 1974) , et ii) par les histogrammes des vecteurs résiduels présentés.

Le modèle ACP développé a été ensuite intégré avec une carte de contrôle multivariée MCUSUM (*Multivariate Cumulative Sum Chart*). Le choix de type de carte de contrôle a été défini suite à la comparaison des résultats de cette carte avec deux autres cartes de contrôle multivariées classiques : la carte  $T^2$  et les statistiques  $Q$ .

Deux types d'anomalies ont été simulés afin d'évaluer la performance de la stratégie de détection proposée. Avant l'étape de prétraitement, nous avons injecté des anomalies dans les données brutes. Ensuite, deux cas d'anomalies ont été simulés : Anomalies brusques (A) et Anomalies progressives (B).

**A. Anomalie brusque (cas A)**

Nous avons considéré une présence d'anomalie durant plusieurs jours. Cette anomalie est introduite à partir de l'échantillon n° 141 jusqu'à l'échantillon n°147. Elle est représentée par une augmentation de 25% de la variation totale de  $y_1(t)$ .

La figure 4-23 présente les résultats de l'application de la carte MCUSUM. Elle montre clairement la violation des limites de contrôle.

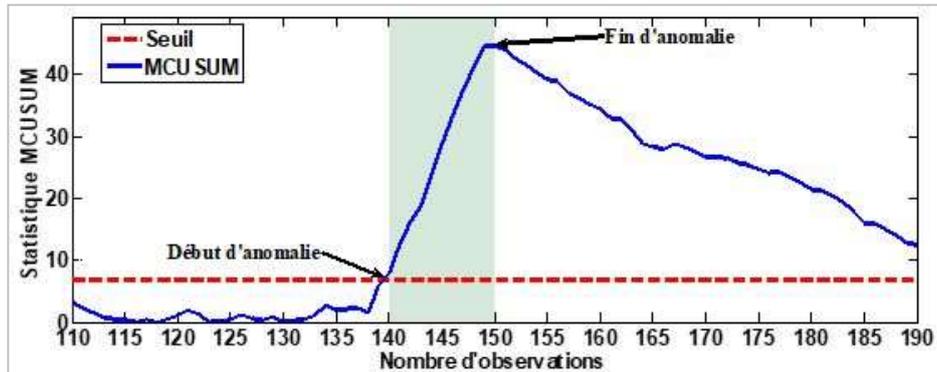


Figure 4-23 : Evolution temporelle de la statistique de la care MCUSUM en présence d'anomalies sur plusieurs jours (cas A).

### B. Anomalie progressive (cas B)

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 0,1 à la valeur de  $y_t$ .

La figure 4-24 présente les résultats de la caret MCUSUM qui montrent que la méthode de détection d'anomalie proposée (MCUSUM et ACP) détecte parfaitement toutes les anomalies simulées.

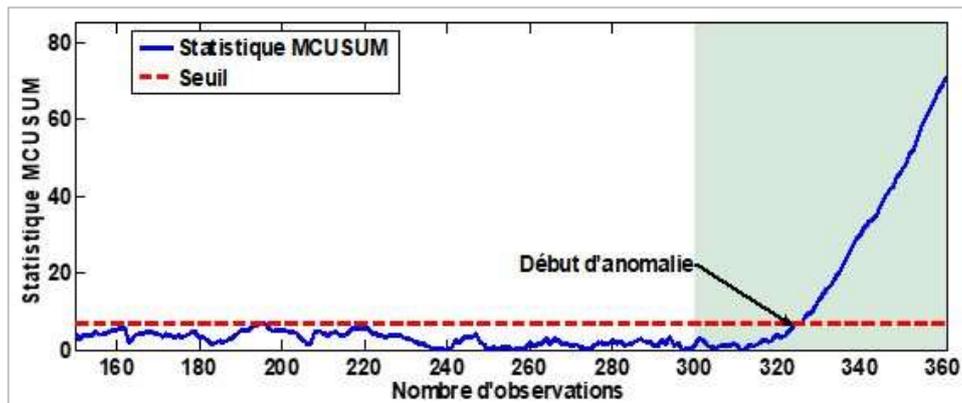


Figure 4-24 : Evolution temporelle de la statistique de la care MCUSUM en présence d'anomalies sur progressive (cas B).

La performance de la méthode de détection d'anomalie proposée combinant la carte MCUSUM et ACP est satisfaisante comparée à d'autres cartes multivariées. Les résultats des deux cas d'études (A et B) montrent l'efficacité de la méthode proposée pour détecter l'occurrence des situations de tension dans les services d'urgence.

### 4.3.3. Pilotage réactif de service d'urgence

Nous avons développé une approche de pilotage réactif basée sur la simulation d'un service d'urgence permettant de réagir aux situations de tension provoquées par un flux important de patients (Kadri, Chaabane, et Tahon 2016; Chaabane et Kadri 2021). Nous avons adapté le modèle de simulation utilisé dans le pilotage proactif (section 4.2.3) en intégrant une fonction permettant de surveiller les indicateurs de tension en temps réel. L'objectif de ce pilotage est de définir les

actions correctives qui seront simulées pour savoir leur impact sur l'amélioration de l'indicateur de tension étudié.

Nous avons procédé selon la démarche suivante :

1. Observation en temps réel de l'évolution du (ou les) indicateur(s) de tension.
2. Si à un instant donné, noté  $t_0$ , l'indicateur dépasse la valeur seuil  $V_{Mo}$  (passage à l'état dégradé), l'indicateur est contrôlé pendant une durée  $\Delta t$ . Trois cas peuvent se présenter :
  - a. Cas 1 : si l'indicateur continue à croître et dépasse ( $V_{Mo} + \Delta V_{Mo}$ ), alors lancement de l'action corrective ;
  - b. Cas 2 : si à l'instant ( $t_0 + \Delta t$ ) l'indicateur est toujours supérieur à  $V_{Mo}$ , alors lancement de l'action corrective ;
  - c. Cas 3 : si à l'instant ( $t_0 + \Delta t$ ) l'indicateur est inférieur à  $V_{Mo}$ , alors pas de lancement de l'action corrective ;
3. Si à un instant donné, noté  $t_0$ , l'indicateur dépasse la valeur seuil  $V_{Cr}$  (passage à l'état critique) alors lancement de l'action corrective.

Nous illustrons dans la figure 4-25 l'application de cette démarche dans le cas de l'indicateur : *Attente primaire PW* (figure 4-12).

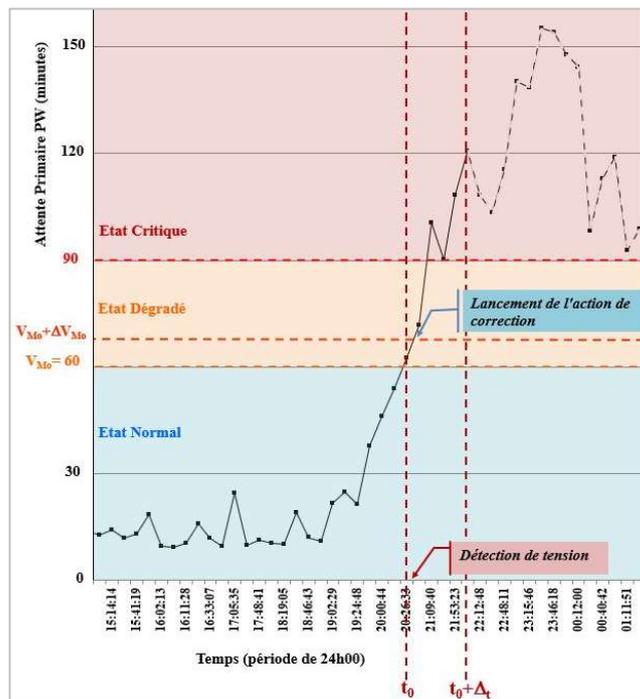


Figure 4-25 : Evolution de l'indicateur PW en temps réel.

Nous avons appliqué cette approche dans le cas de service d'urgence présenté dans la section 4.2.3. Notre cas d'étude se situe dans la période hivernale en réalisant des simulations sur trois jours : samedi, dimanche et lundi. Les statistiques présentées correspondent à celles de dimanche (montée en charge et élimination des effets biaisés – *Warm-up period*). Nous présentons les résultats relatifs à l'indicateur PW. Pour les expérimentations,  $\Delta V_{Mo}$  et  $\Delta t$  ont été fixés à 10% et

15 minutes respectivement. Pour réduire ces dépassements, nous avons identifié plusieurs actions correctives définies selon deux classes.

La première classe concerne les actions d'augmentation des moyens. Ce sont les actions les plus utilisées en pratique et qui consistent à augmenter *les ressources* :

- *Ressources humaines* : ajouter une infirmière et/ou un médecin pendant une durée donnée (fixée 2h00 dans nos expérimentations)
- *Ressources matérielles* : transformer une chambre UHCD en box de consultations.

Nous avons proposé une deuxième classe d'actions qui se concentre sur les règles de gestion de la salle d'attente. Nous avons voulu montrer l'impact de cette gestion sur les indicateurs de tension et montrer que l'augmentation des moyens n'est pas la seule solution (<https://fedoru.fr/fiche-publications/journee-du-7-avril-2023/>). Nous avons identifié 4 règles de gestion de *flux patients admis en service d'urgence* :

- *Règle 0* : Règle classique par ordre croissant d'arrivées des patients
- *Règle 1* : par ordre croissant de type de patients (4 types ont été identifié de plus urgent 1 au moins urgent 4)
- *Règle 2* : par ordre décroissant du temps passé dans le service d'urgence depuis l'entrée.
- *Règle 3* : par ordre croissant de l'avancement dans le processus de prise en charge, les patients en début de leur processus de prise en charge sont prioritaires

Trois groupes d'alternatives ont été définis selon le temps de lancement de l'action ( $T_L$ ). Le temps de lancement est très important sur le plan pratique car il montre notre degré de réactivité. Nous avons choisi de tester trois temps (la mise en place immédiate de l'action, ou la mise en place après 60 min ou 90min). Nous avons synthétisé les caractéristiques des actions correctives dans la table 4-7 suivante.

**Table 4-7. Définition des scénarios et alternatives composant les actions correctives.**

Scenarios	Ressources humaines		Ressources matérielles	Règles de priorité	$T_L$
	Infirmière (IDE)	Médecin (MU)	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	$T_L = 0$ min (Alternative A) $T_L = 60$ min (Alternative B) $T_L = 90$ min (Alternative C)

31 scénarios ont ainsi été testé pour chaque alternative A, B et C (Kadri 2014).

Nous présentons dans les figures suivantes les résultats de certains scénarios montrant l'apport de notre approche pour réagir aux flux importants de patients pendant les périodes épidémiques sur l'indicateur attente primaire PW.

Nous avons observé l'impact de l'ajout d'une infirmière à différents temps de lancement (figure 4-26) : A0 (scénario initial) ; A1 (à  $T_L=0$ ) ; B1 (à  $T_L=60$  min) et C1 (à  $T_L=90$  min). Le reste des paramètres est inchangé avec l'application de la règle 0 pour la gestion (premier arrivé premier servi) de la salle d'attente.

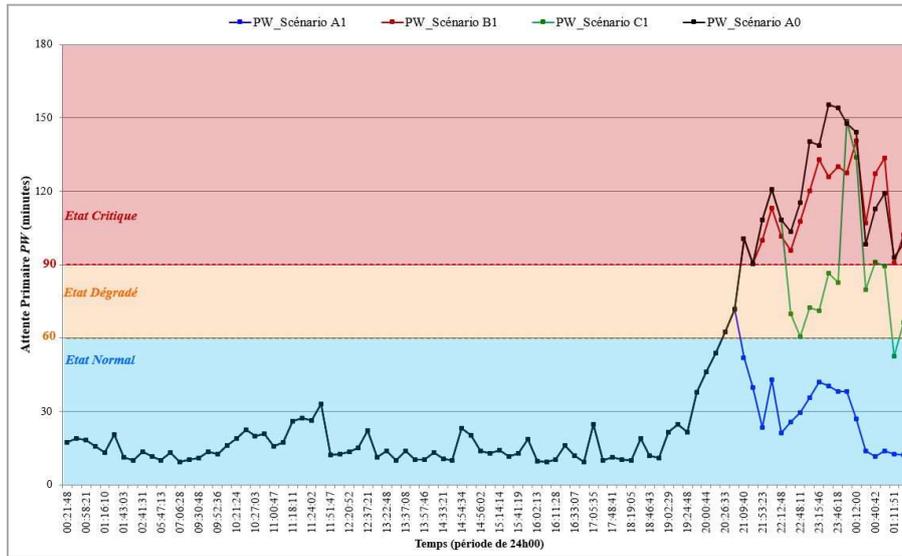


Figure 4-26 : Impact de l'ajout d'une IDE à différents temps de lancement.

Seul l'ajout immédiat d'une IDE dès la détection de la situation de tensions (scénario A1 avec  $T_L = 0$ ) contribue à la réduction du temps d'attente primaire (PW) et permet au service d'urgence de revenir à une situation normale rapidement. Ceci s'explique par l'impact de la consultation infirmière au début du processus sur la valeur de l'attente PW (voir le processus de la figure 4-12). L'ajout d'une IDE 1h00 (scénario B1) ou 1h30 (scénario C1) après l'occurrence de la perturbation n'a aucun impact positif sur la valeur de PW. On peut en conclure que l'ajout d'IDE est seulement intéressant quand une IDE est disponible immédiatement à tout moment de la journée, ce qui est difficile à mettre en place dans un cas réel.

Nous avons observé l'impact de l'ajout d'un médecin (figure 4-27) : A0 (scénario initial) ; A2 (à  $T_L=0$ ) ; B2 (à  $T_L=60$  min) et C2 (à  $T_L=90$  min). Le reste des paramètres est inchangé avec l'application de la règle 0 pour la gestion (premier arrivé premier servi) de la salle d'attente.

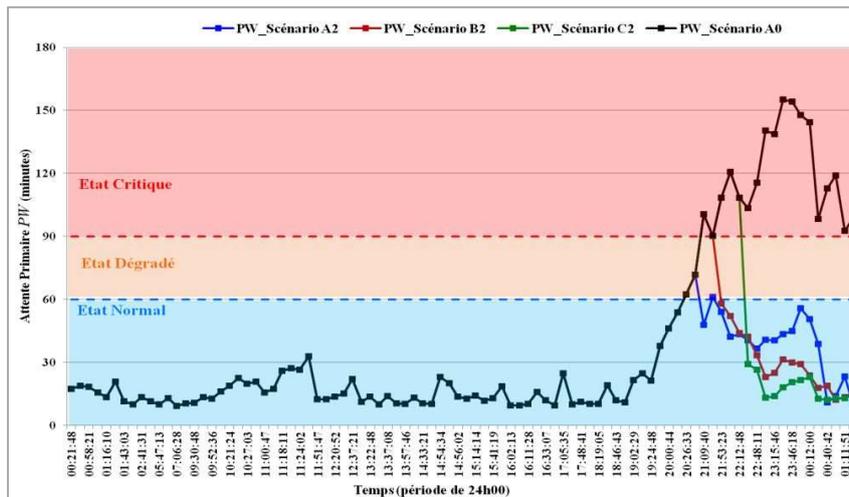


Figure 4-27 : Impact de l'ajout d'un médecin à différents temps de lancement.

On peut observer que quel que soit le temps de lancement, l'ajout d'un médecin contribue à la réduction du temps d'attente primaire (PW) des patients au SU. « Appeler un médecin en renfort » 1h30 après l'occurrence d'une perturbation donne même les meilleurs résultats.

Nous avons réalisé des scénarios relatifs aux règles de gestion de flux des patients dans la salle d'attente. Ces actions sont nouvelles par rapport à un type de scénarios testés dans le pilotage proactif ou sur le terrain. On a souhaité observer l'impact de la gestion des flux sur les performances de SU sans augmentation des ressources et avec une application immédiate ( $T_L=0$ ) (figure 4-28) : A0 (scénario initial avec la règle 0) ; A8 (règle 1) ; A16 (règle 2) et A24 (règle 3).

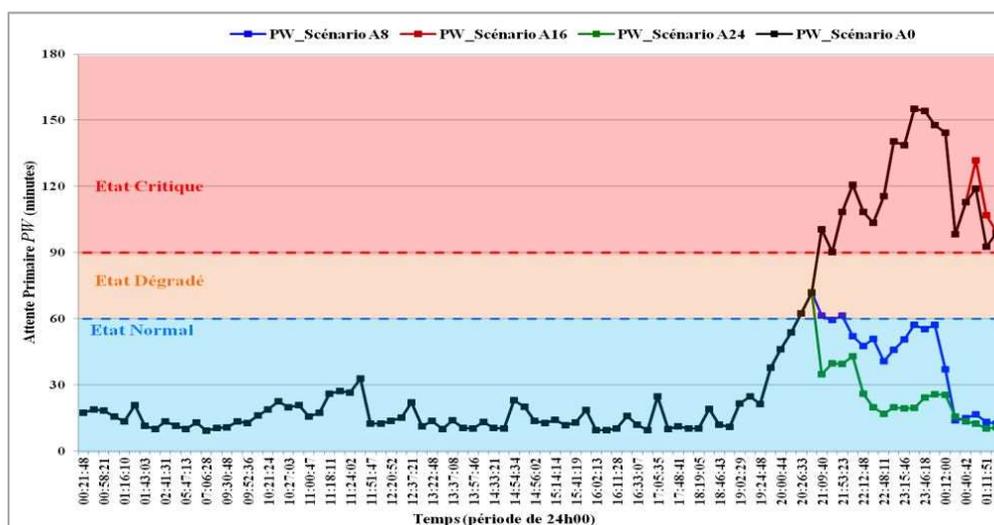


Figure 4-28 : Impact des règles de priorité.

On observe que le choix de la règle de priorité sur les valeurs de PW contribue à la réduction de temps d'attente PW. Ceci nous a permis de montrer que les actions correctives ne concernent pas seulement l'augmentation des moyens mais peut commencer par une réflexion sur l'impact de l'organisation interne au sein du service. On constate que la règle 1 (priorité aux patients urgents) et la règle 3 (priorité aux patients en début du processus) contribuent positivement à l'amélioration des valeurs de PW. La règle 2, donnant la priorité aux patients qui ont un temps de séjour élevé, n'a pas apporté de bons résultats.

Les résultats montrent que le temps de lancement des actions joue un rôle primordial dans certains cas notamment dans le cas de l'ajout d'une IDE. Certains résultats étaient attendus (comme par exemple l'impact positif de l'ajout d'un médecin), 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. Ils nous ont montré qu'une modification de la gestion des files d'attente a notamment un impact positif sur l'attente primaire PW. Cette piste est très prometteuse ouvrant la perspective de travailler sur le développement d'un algorithme de gestion de flux patients plus élaboré permettant de prendre en compte différentes caractéristiques du flux patients : celles relatives au patient (motif d'admission, type de diagnostic, ...) et celles relatives au contexte du système (nombre de patients présents dans le système, nombre de médecins, séjour prévisionnel, temps d'attente prévisionnel, ...). Nous avons testé tous les scénarios possibles de la table 4-7 afin de retenir non seulement 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 et de la réglementation.

#### 4.3.4. Approche réactive pour l'allocation des PI-Containers

Dans le cadre des travaux de thèse de Mme F. Walha (Walha 2018) nous avons travaillé dans le domaine de l'Internet Physique nommée (PI) et défini comme étant : « un système logistique global ouvert fondé sur l'interconnectivité physique, digitale et opérationnelle au moyen de l'encapsulation, des protocoles et des interfaces" (Meller et al. 2012). (Montreuil, Meller, et Ballot 2010) ont proposé trois éléments physiques afin d'exploiter l'Internet Physique : les PI-conteneurs, les P-moyens de transporteurs et les PI-nœuds. Les PI-hubs sont les PI-nœuds qui ont la mission de transférer des PI-conteneurs à partir des PI-moyens de transports en entrée vers les PI-moyens de transports à la sortie. (Ballot, Montreuil, et Thivierge 2012) ont présenté un spécifique route-rail hub. Le but de ce hub est de transférer les containers des trains (rail) vers les camions (route) et vice-versa (rail-route / route-rail). Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés au problème d'allocation des PI-containers au sein du PI-hub pour la partie « Rail-Route ».

Le problème d'allocation a été modélisé sous forme de programme linéaire (Walha et al. 2014) afin de définir les contraintes, les variables de décisions et le (ou les) objectif(s) à optimiser. Nous avons retenu deux principaux objectifs (figure 4-29) : i) maximiser le taux de remplissage des camions (noté *FR* : *Filling Rate*) et ii) minimiser les distances parcourues (noté *CD* : *from container to dock*) par les containers pour être acheminés depuis le train vers les camions.

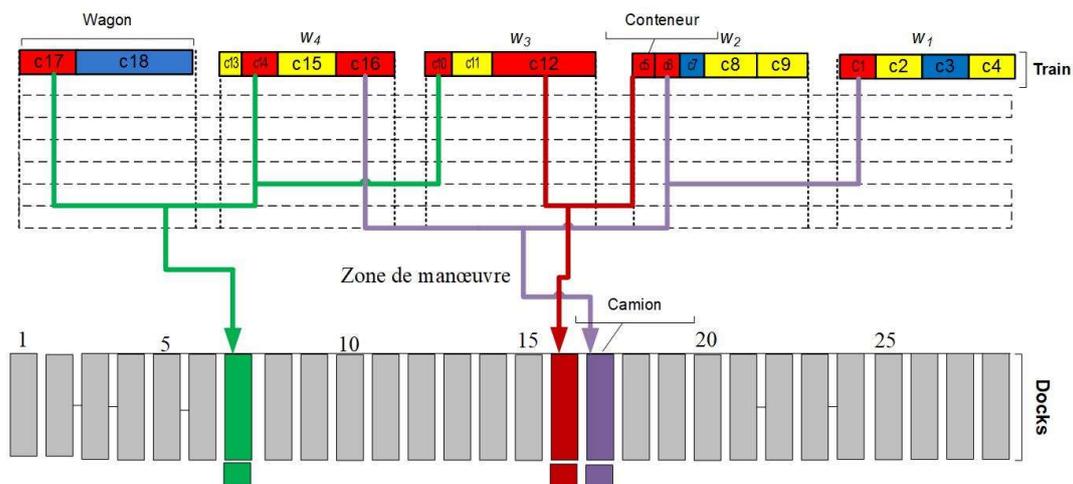


Figure 4-29 : Structure d'un PI-Hub et les distances parcourues.

Pour la résolution de ce problème d'allocation dans un contexte statique et déterministe, nous avons identifié une heuristique que nous avons nommée : Best Fit Grouping Heuristic (BFGH) (Walha et al. 2014). Nous avons ensuite amélioré les résultats de cette heuristique en proposant une métaheuristique « Recuit-simulé Adaptative » (RS) (Walha et al. 2015).

Dans un environnement réel, le PI-Hub rencontre différents types de perturbations qui peuvent impacter son fonctionnement. Les perturbations peuvent être internes au PI-Hub (durée de chargement ou déchargement ou le temps de transit ...) ou externes au Pi-Hub (par exemple l'heure d'arrivée des trains, le nombre de camions attendus ...). Pour répondre à ce contexte perturbé nous avons développé une approche, dite réactive qui prend en compte les incertitudes et qui réalise une

réallocation *en-ligne* que nous avons nommé : "*Decision-making Mechanism Agents Heuristic (DMAH)*" (Walha et al. 2016).

Une modélisation avec des systèmes multi-agents est proposée pour générer les informations réactives et prendre en compte l'incertitude des informations. Trois principaux agents ont été définis :

- "*Group Agent*" : il est composé des conteneurs de même destination avec la somme des longueurs qui ne dépasse pas la capacité maximale d'un camion.
- "*Supervisor Agent*" : Il gère la création des "*Group Agent*". Il affecte les conteneurs aux différents groupes selon la destination et en respectant la capacité des camions.
- "*Dock Agent*" : c'est un agent réactif qui représente la porte et toutes les informations associées.

La figure 4-30 présente la communication entre les trois agents.

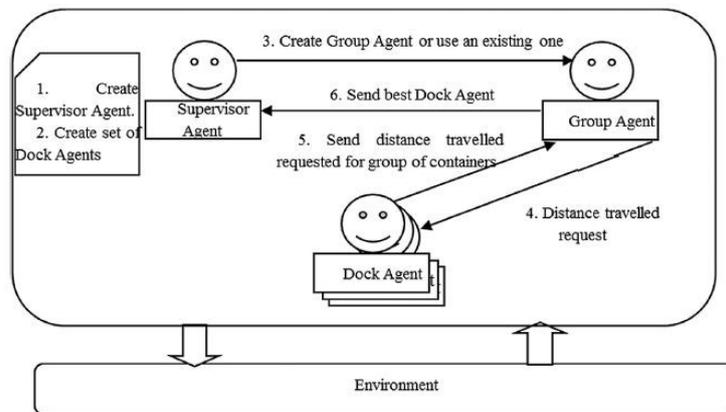


Figure 4-30 : Communication entre les agents.

L'objectif recherché est de minimiser le nombre de camions utilisés ainsi que la distance parcourue par les conteneurs dans la zone de routage. Deux principales contraintes sont considérées: la taille de camion et la destination des conteneurs et des camions. L'idée principale de cette approche est d'affecter des groupes de conteneurs à "*la meilleure porte*", selon la distance parcourue. En temps réel, à chaque fois qu'il y a un nouveau conteneur affecté à un groupe de conteneurs, ce groupe doit être réaffectée à une porte selon les positions des conteneurs. La figure 4-31 présente le déroulement de cette approche.

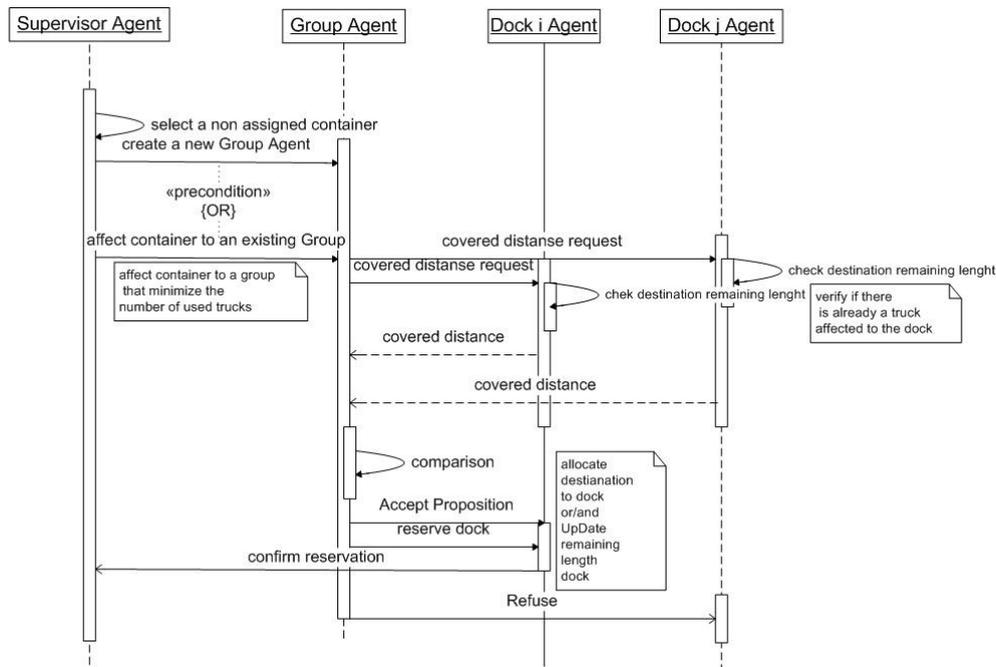


Figure 4-31 : Déroulement de DMAH

Les agents doivent suivre les étapes suivantes pendant les interactions :

1. L'agent superviseur "*Supervisor Agent*" sélectionne un conteneur qui n'a pas encore été affecté.
2. **Si** un "*Group Agent*" existe pour la même destination et sa longueur/taille est inférieure à la taille du camion, le conteneur sélectionné doit être affecté à ce groupe. (**Si plusieurs "*Group Agent*" existent, nous choisissons celui qui minimise l'espace restant dans le camion**).
3. **Sinon**, créer un nouveau "*Group Agent*" avec le conteneur.
4. Le "*Group Agent*" envoie un message de demande à tous les agents de quai "*Dock Agent*" pour leur demander la distance parcourue.
5. Chaque "*Dock Agent*" disponible envoie la distance parcourue "*cd*" des conteneurs au "*Group Agent*" actuel. Le dock est considéré disponible s'il est libre, ou s'il existe déjà des conteneurs affectés à ce dock ayant la même destination, et si la capacité du dock permet encore d'ajouter d'autres conteneurs à ce groupe.
6. Le "*Group Agent*" sélectionne le meilleur "*Dock Agent*" avec le chemin le plus court "*cd*".
7. Attribuer ou réattribuer le groupe de conteneurs actuel au "*Dock Agent*" sélectionné.
8. **Si** tous les conteneurs du wagon actuel du train sont affectés, **alors** libérer le dock pour lequel la taille du conteneur est égale à celle du camion (c'est-à-dire que le camion quitte le hub lorsqu'il est plein).

### Gestion des incertitudes :

Durant cette partie nous avons amélioré la gestion des incertitudes au niveau du cross-dock. Trois types de perturbations ont été prises en compte :

- (1) perturbations au niveau des quais/portes.
- (2) perturbations au niveau des informations requises qui concernent la destination des conteneurs.
- (3) perturbations au niveau des informations requises qui concernent la taille des conteneurs.

Certaines perturbations peuvent survenir au niveau des quais ou des portes au cours du chargement et du déchargement des conteneurs. Parmi ces problèmes on trouve : la maintenance au niveau des portes ou bien au niveau des quais, la maintenance au niveau des convoyeurs qui sont devant les quais ou l'absence d'un des camions affectés à une porte spécifique.

Pour gérer ce type de perturbations nous avons considéré comme paramètres les portes « hors service » et la période pendant laquelle elles le sont. L'idée principale est de reprendre les résultats des affectations statiques réalisées avec l'heuristique (BFGH) et la métaheuristique (RS) et de réaffecter de nouveau les conteneurs qui ont subi une modification au niveau de la porte à qui il est déjà affecté. Cette réaffectation prend en considération les conteneurs qui sont déjà affectés, la destination des conteneurs et la destination et la taille des camions.

Nous avons implémenté l'approche DMAH avec la plateforme *Java Agent Development framework* (JADE) en utilisant un PC avec processeur intel® Core™ i3, CPU = 2.53GHZ et 4Go de RAM. Nous avons comparé les performances de nos différentes méthodes de résolution (BFGH, RS et DMAH) dans un contexte dynamique. Nous présentons dans ce qui suit les principaux résultats.

Nous avons considéré les deux objectifs suivants :

- Maximiser le taux de remplissage des camions
- Minimiser la somme des distances parcourues

Nous avons défini deux bornes optimales pour chacun des objectifs précédents qui nous ont permis d'évaluer les performances de nos approches :

- Borne inférieure concernant le nombre de camions à considérer :

$$LB(T) = \left\lceil \frac{\sum_i lc_i}{K} \right\rceil$$

- Borne supérieure concernant le taux de remplissage des camions définie par :

$$UB(FR) = \frac{\sum_i lc_i}{LB(T)*K}$$

Avec T : nombre de camions utilisés,  $lc_i$  : longueur du conteneur i, et K est la capacité d'un camion.

Pour cette partie nous avons considérés les scénarios suivants :

- Des portes hors service choisies parmi les portes disponibles
- Des wagons de train hors service

Nous avons généré aléatoirement plusieurs instances avec ces types de perturbations et nous avons sélectionné les résultats obtenus pour le taux de remplissage des camions et les distances parcourues qui sont présentés respectivement dans la table 4-8 et la table 4-9.

**Table 4-8. Résultats des approches dans un contexte dynamique pour le taux de remplissage des camions.**

D	N	N/D	LB (T)	UB (FR) %	BFGH		RS		DMAH		UB vs. RS (FR)	UB vs. DMAH (FR)
					FR %	CPU Time (s)	FR %	CPU Time (s)	FR %	CPU Time (s)		
4	60	15	26	87,41	86,87	1	86,87	130	87,41	3	-0,62%	0,00%
	90	22,5	31	91,49	91,03	1	91,03	250	91,49	4	-0,51%	0,00%
	137	34,25	42	92,42	92,07	3	92,07	260	92,42	7	-0,38%	0,00%
6	60	10	27	90,23	85,91	1	85,91	150	84,01	5	-4,79%	-6,89%
	90	15	30	95,75	94,21	2	94,21	245	95,75	7	-1,61%	0,00%
	132	22	41	94,67	94,11	2	94,11	220	92,42	8	-0,60%	-2,38%
10	60	6	28	77,59	76,62	2	76,62	180	77,59	5	-1,26%	0,00%
	89	8,9	30	86,96	85,26	1	85,26	75	86,97	8	-1,97%	0,01%
	132	13,2	43	88,79	85,84	3	85,84	377	88,79	10	-3,32%	0,00%
15	60	4	29	78,99	75,5	1	75,5	113	78,99	7	-4,42%	0,00%
	90	6	32	77,55	74,47	2	74,47	98	77,55	8	-3,98%	0,00%

Avec *D* : nombre de destinations, *N* : nombre de conteneurs non chargés.

Notre objectif est de maximiser le taux de remplissage des camions (FR). Dans ce cadre, nous observons dans la table 4-8 que l’approche DMAH obtient meilleurs résultats que l’heuristique (BFGH) et la métaheuristique SA avec un écart de 0.84% par rapport à la borne supérieure UB. L’approche réactive fournit donc des résultats intéressants dans le contexte perturbé comparée aux autres approches.

**Table 4-9. Résultats des approches dans un contexte dynamique en considérant les distances parcourues.**

D	N	N/D	BFGH	RS	DMAH	BFGH vs. RS	RS vs. DMAH
			CD (m)	CD (m)	CD (m)	%	%
4	60	15	1 874,90	1 791,90	1 733,55	-4,43%	-3,26%
	90	22,5	2 907,07	2 770,34	2 778,26	-4,70%	0,29%
	137	34,25	4 212,13	4 127,89	4 411,14	-2,00%	6,86%
6	60	10	2 080,87	1 956,72	1 954,81	-5,97%	-0,10%
	90	15	3 089,22	2 976,69	3 129,10	-3,64%	5,12%
	132	22	4 541,18	4 377,28	4 628,43	-3,61%	5,74%
10	60	6	2 048,38	1 918,69	1 916,48	-6,33%	-0,12%
	89	8,9	3 179,42	2 993,51	3 142,16	-5,85%	4,97%
	132	13,2	4 540,31	4 383,64	4 637,84	-3,45%	5,80%
15	60	4	1 944,06	1 820,31	1 815,60	-6,37%	-0,26%
	90	6	3 163,45	3 021,19	3 236,22	-4%	7%

Avec *D* : nombre de destinations, *N* : nombre de conteneurs non chargés et *CD* : distance parcourue

La différence en termes de distances parcourues entre RS et DMAH est présentée dans la colonne “SA vs. DMAH”. Dans le contexte dynamique, nous obtenons de meilleurs résultats avec

l'approche réactive DMAH que la métaheuristique RS (réduction des distances parcourues entre 0.1% et 3.33%) quand le nombre de conteneurs diminue. Mais RS est meilleur quand le nombre de conteneurs augmentent (entre 0.27% et 6.33%). Cependant la grande qualité de l'approche réactive DMAH réside dans son temps d'exécution CPU (< 10s) comparé à RS (190 secondes en moyenne), ce qui constitue un critère très important quand il s'agit d'une implémentation dans un contexte réel. Ceci montre l'apport des approches basées sur les Systèmes Multi-Agents par rapport aux approches métaheuristiques dans un contexte perturbé.

#### 4.3.5. Approche réactive basée sur les systèmes multi-agents pour un problème de tournée des soignants en hospitalisation à domicile

Ces travaux ont été menés en collaboration avec Pr. Eric Marcon de l'université Jean-Monnet à Saint-Etienne (Marcon et al. 2017b). Ces travaux se sont intéressés à la problématique de la définition des tournées de soignants dans une organisation d'hospitalisation à domicile (HAD) soumis à des perturbations opérationnelles (embouteillages, durée des soins ...).

Tout d'abord nous avons réalisé un état de l'art afin de montrer la complémentarité entre des approches d'optimisation centralisées basées sur des techniques de recherche opérationnelle et des approches distribuées sur basées sur les systèmes multi-agents (Marcon et al. 2017a). Cette étude nous a permis de proposer une architecture globale inspirée de l'architecture ORCA (Kadri et al. 2013; Pach et al. 2014a) et présentée dans la figure 4-32. L'architecture intègre les approches d'optimisation centralisées représentant les décisions d'affectation des patients aux soignants au niveau de centre de la HAD (Hospitalisation à Domicile) et des approches de décisions locales au niveau des soignants pendant la tournée.

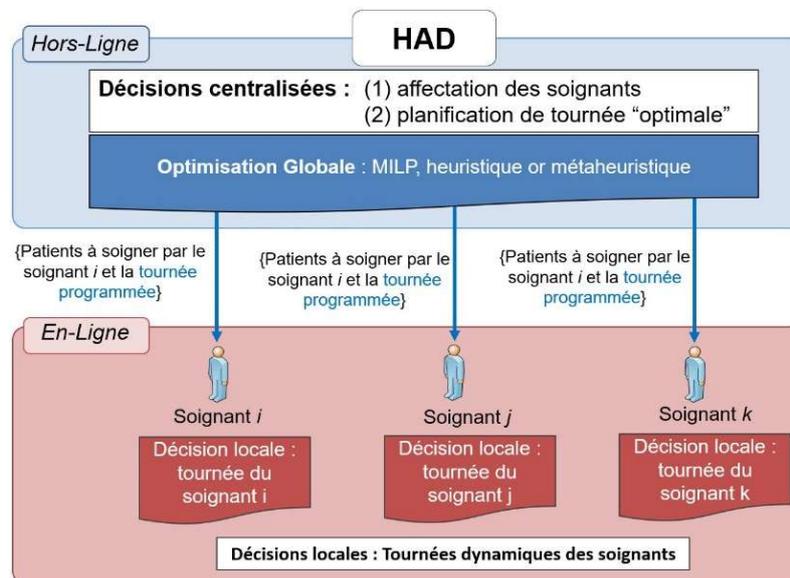


Figure 4-32 : Architecture globale d'affectation des soignants et de planification des tournées dans un centre de HAD.

Nous avons développé cette architecture pour résoudre le problème de tournée dans un contexte dynamique (Marcon et al. 2017b). Le centre de la HAD fournit un planning des tournées à chaque soignant, ce qui remplira la partie hors-ligne de notre architecture. Pour la partie « En-

ligne », nous avons défini des approches multi-agents basées sur des règles de décisions locales basées sur le niveau d'autonomie des agents (Figure 4-33). 4 types de règles locales ont été développées : (1) *passif* basé sur le programme de tournée fourni par la partie hors-ligne centralisée (2) *autonome* basée sur des une approche complètement distribuée (3 et 4) *deux hybrides* où l'agent peut partir d'une tournée obtenue avec une méthode centralisée mais décider en local de sa modification en se basant sur son contexte.

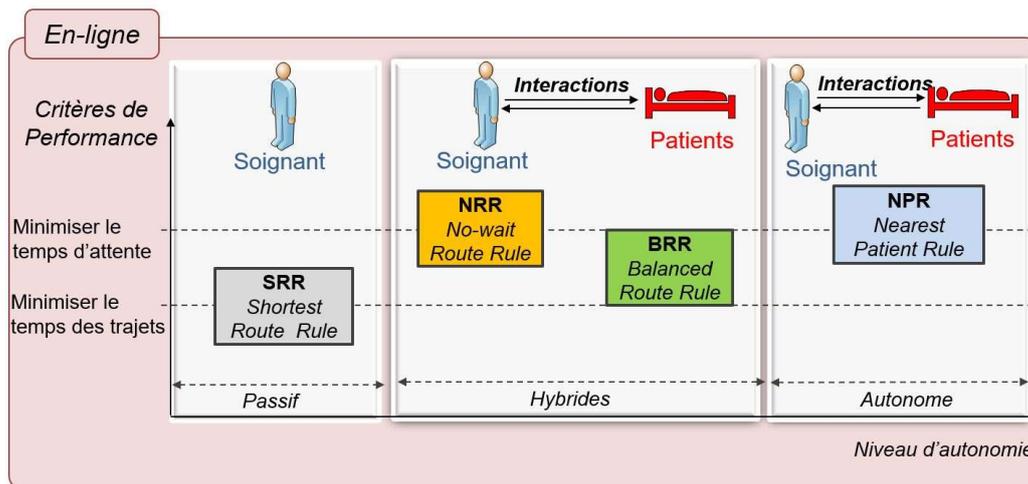


Figure 4-33 : Règles de gestion locales selon le niveau d'autonomie décisionnel des soignants.

La règle **SRR** « *Shortest Route Rule* » : le soignant a un niveau décisionnel passif ; Il suit scrupuleusement le planning des tournées fourni par le centre de la HAD. Il n'a aucune interaction avec les patients ;

La règle **NPR** « *Nearest Patient Rule* » : le soignant est en autonomie totale. Il sélectionne le plus proche patient disponible de manière réactive et autonome en minimisant le temps d'attente. Le soignant a la liste des patients à visiter ce qui lui permet de sélectionner le patient le plus proche. Il appelle le patient sélectionné. Si le patient est disponible le soignant se rend au domicile de ce patient, sinon il cherche un autre patient. Si aucun patient de la liste n'est disponible, le soignant va jusqu'au patient le plus proche et attend qu'il soit disponible. La figure 4-34 présente les interactions de cette règle.

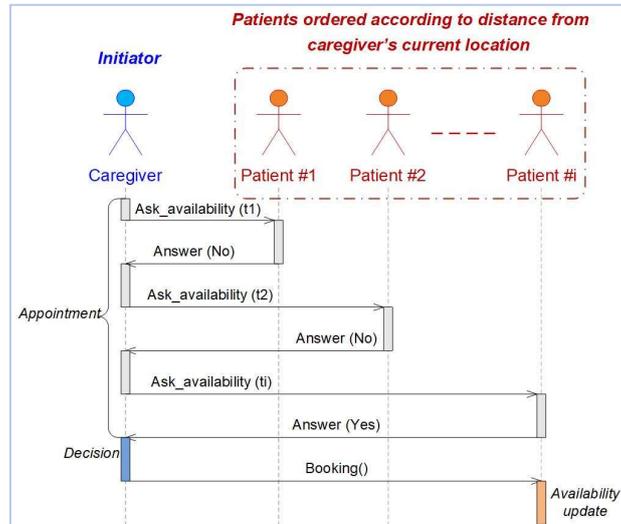


Figure 4-34 : Interactions dans le cas de la règle NPR.

Deux règles hybrides ont été proposées où le soignant peut suivre le planning fourni par le centre de la HAD ou décider de sa propre tournée.

La règle **NRR** « *No-wait Route Rule* » : Le soignant va suivre la tournée planifiée par le centre de HAD. Si le patient est indisponible, le soignant peut prendre la décision de modifier sa tournée. Cette règle permet de switcher entre l'objectif de la HAD (minimiser la durée des trajets) et l'objectif du soignant (minimiser le temps d'attente). Comme indiqué dans la figure 4-35, le soignant appelle les patients dans l'ordre de la tournée jusqu'à obtenir un patient disponible. Le patient doit être disponible entre le moment où le soignant arrive à son domicile et le moment où tous les soins sont réalisés. Si aucun patient n'est disponible, le soignant va à côté du domicile du premier patient de sa tournée.

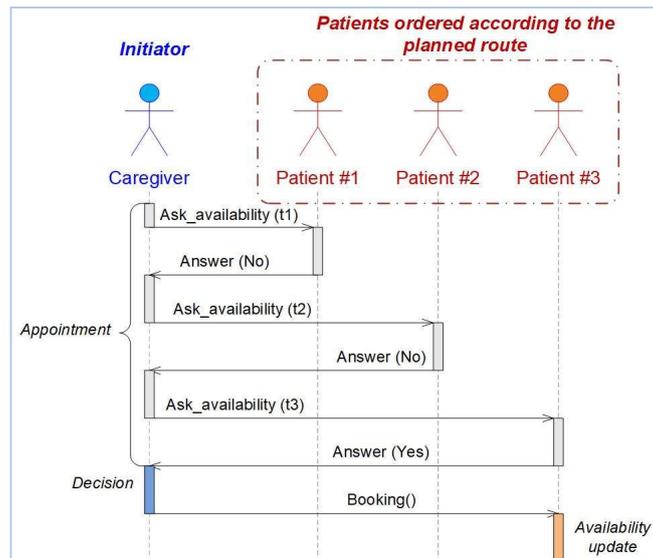


Figure 4-35 : Interactions dans le cas de la règle NRR.

La règle **BRR** « *Balanced Route Rule* » : Cette règle est basée sur la tournée planifiée par le centre de la HAD, mais une évaluation quantitative est réalisée entre deux chemins possibles. La première alternative minimise le temps de trajet et la seconde le temps d'attente. Ainsi le soignant aura une meilleure visibilité sur l'impact de son choix. La figure 4-36 présente les interactions dans le cadre de cette règle.

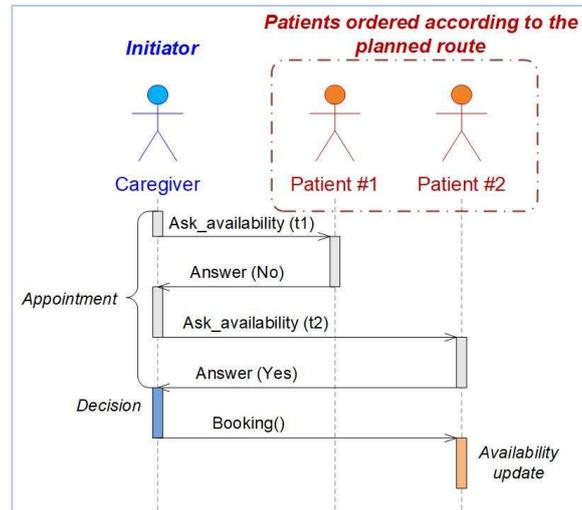


Figure 4-36 : Interactions dans le cas de la règle BRR.

Nous avons implémenté les différentes règles dans un système de simulation multi-agents en utilisant le logiciel NetLogo et nous avons réalisé les expérimentations de ces règles dans un contexte sans perturbations. La figure suivante (figure 4-37) montre un aperçu global sous forme de radars (plus le score est élevé plus le résultat est satisfaisant) des résultats des 4 règles selon les critères suivants :

- *Cmax* : date d'achèvement de la tournée
- *Travel* : durée des trajets effectués
- *Wait* : temps d'attente des soignants
- *P\_Wait* : temps d'attente des patients
- *Begin* : début de la tournée
- *End* : fin de la tournée

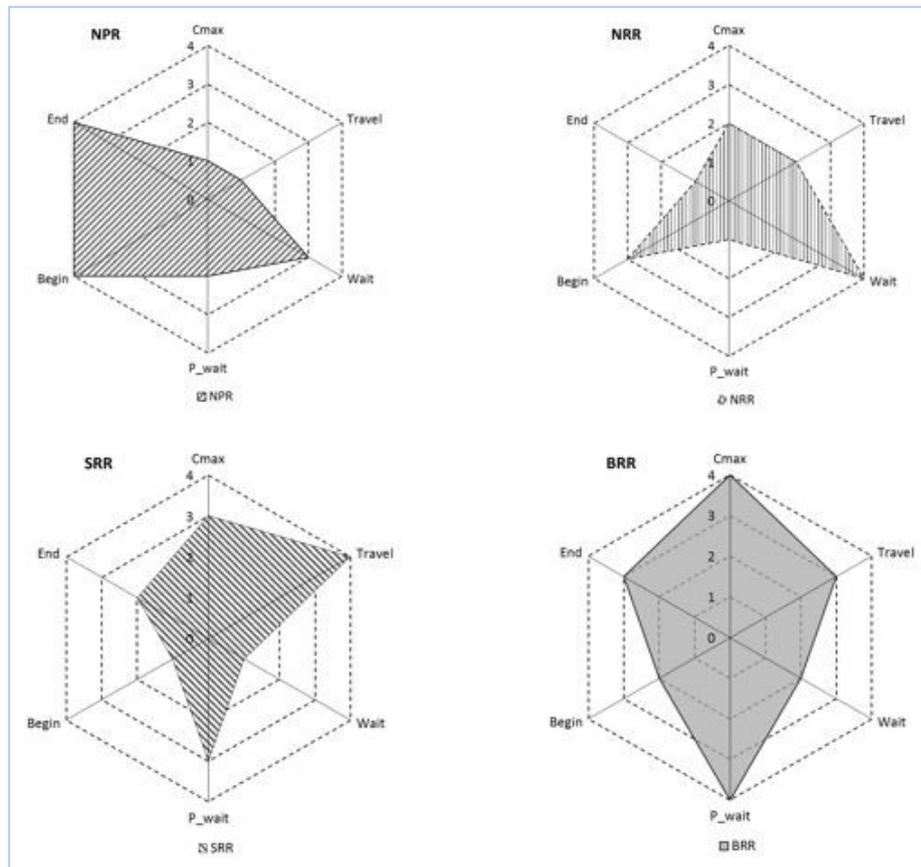


Figure 4-37 : Graphes radars des performances des 4 règles.

Nous observons que la règle NPR qui s'appuie sur le plus proche patient disponible minimise bien le temps d'attente des soignants mais impose des temps de trajets importants. La règle SRR réduit le temps des trajets dans la tournée mais augmente considérablement les temps d'attente des soignants. La NRR obtient des mauvais résultats tout comme la SRR mais obtient les meilleurs résultats relatifs au critère de temps d'attente des soignants.

Nous remarquons que la règle BRR, qui présente un compromis entre la décision décentralisée et la décision distribuée surpasse la règle purement centralisée (SRR) et la règle purement décentralisée (NRR) en termes de temps d'attente des soignants et des temps de trajets. La seule limitation de la BRR c'est qu'il faut calculer deux trajets alternatifs afin de choisir le meilleur. Les simulations ont montré le règle BRR est la meilleure règle de décision comparée à toutes les autres.

Nous avons réalisé des expérimentations dans un contexte perturbé définie par le temps de trajet d'un patient à un autre impacté par des perturbations comme les embouteillages, les conditions météo... Le temps de trajet est alors soit plus long (ratio de 1.5) ou plus rapide (ratio de 0.5) que le temps utilisé pour définir la tournée par la HAD. Différents tests ont été réalisés avec différentes durées de trajets modifiées aléatoirement par 10%, 20% et 50%.

La table suivante (table 4-10) montre les résultats obtenus pour les trois critères (*Cmax*, *Travel* et *Wait*).

**Table 4-10. Résultats des tournées des soignants face aux perturbations impactant la durée des trajets.**

	NPR			NRR		
	<i>Cmax</i> <sup>a</sup>	<i>Trav</i> <sup>a</sup>	<i>Wait</i> <sup>a</sup>	<i>Cmax</i>	<i>Trav</i>	<i>Wait</i>
No disruption	415.8 ± 10	241.7 ± 8	<b>24.1 ± 7</b>	439.4 ± 13	258.5 ± 10	31.3 ± 8
Disruptive rate = 10%	424.6 ± 12	246.7 ± 10	<b>27.9 ± 7</b>	443.0 ± 14	260.3 ± 12	32.7 ± 9
Disruptive rate = 20%	425.0 ± 13	247.1 ± 10	<b>28.4 ± 8</b>	448.2 ± 17	263.9 ± 14	34.4 ± 10
Disruptive rate = 50%	439.9 ± 22	258.1 ± 16	<b>31.8 ± 10</b>	460.5 ± 22	273.6 ± 15	36.9 ± 12
	SRR			BRR		
	<i>Cmax</i>	<i>Trav</i>	<i>Wait</i>	<i>Cmax</i>	<i>Trav</i>	<i>Wait</i>
No disruption	414.7 ± 8	<b>209.9 ± 0</b>	54.8 ± 8	<b>405.9 ± 6</b>	218.7 ± 5	37.2 ± 9
Disruptive rate = 10%	415.3 ± 10	<b>211.7 ± 3</b>	53.6 ± 9	<b>406.2 ± 8</b>	219.3 ± 5	36.9 ± 9
Disruptive rate = 20%	418.3 ± 11	<b>212.9 ± 5</b>	55.4 ± 10	<b>408.9 ± 9</b>	221.1 ± 7	36.8 ± 10
Disruptive rate = 50%	424.7 ± 14	<b>218.4 ± 7</b>	56.4 ± 12	<b>414.3 ± 13</b>	228.1 ± 9	36.2 ± 10

<sup>a</sup>exprimées en minutes

Les résultats de la table 4-10 montre que les ratios de perturbation ont un faible impact sur les valeurs du Cmax. Ceci est dû aux deux facteurs : (1) la décision est prise localement par le soignant et (2) la perturbation est modifiée de façon aléatoire. Nous observons que la règle NPR fournit les meilleurs résultats en termes de temps d'attente des soignants ; La règle SRR reste la meilleure en termes de durée des trajets. Enfin c'est la règle BRR qui fournit le meilleur résultat en termes de durée totale de la tournée face aux perturbations.

Ces travaux ont montré la complémentarité entre les approches centralisées réalisées en hors-ligne et basée sur des techniques d'optimisation et les approches en ligne basée sur des règles de décisions locales. Le compromis entre le centralisé et le distribué et entre les méthodes exactes et les méthodes réactives offrent des pistes prometteuses pour faire face aux perturbations en mode réactif.

#### 4.3.6. Pilotage réactif des systèmes cyber-physiques basé sur l'AHP augmentée (A-AHP) et les règles d'expert

Dans la thèse de M. Ali Attajer (Attajer 2023; Attajer et al. 2022b), nous avons développé une approche de pilotage réactif basé sur les produits intelligents. Un ensemble de produits de différents types est considéré. Chaque produit doit suivre un ordre de production (un ensemble de services à réaliser par différentes machines). Les produits sont libérés dans le système selon un planning d'allocation des ressources préétabli. Dans le cas d'apparition d'une perturbation, notre approche fournit aux produits une capacité décisionnelle leur permettant de sélectionner la prochaine ressource qui fournira le service requis d'une manière réactive et adaptée au contexte du système de production.

La figure 4-38 présente notre approche en mettant en évidence deux principales boucles :

- 1) Boucle orange : elle implique l'expert de système de production qui va affiner ses connaissances du système et ses attentes par rapport aux perturbations qu'il va transférer aux produits intelligents.
- 2) Boucle verte ; elle implique les produits intelligents en leur permettant de prendre des décisions en utilisant l'ensemble des règles à mettre en place selon le contexte actuel du système de production.

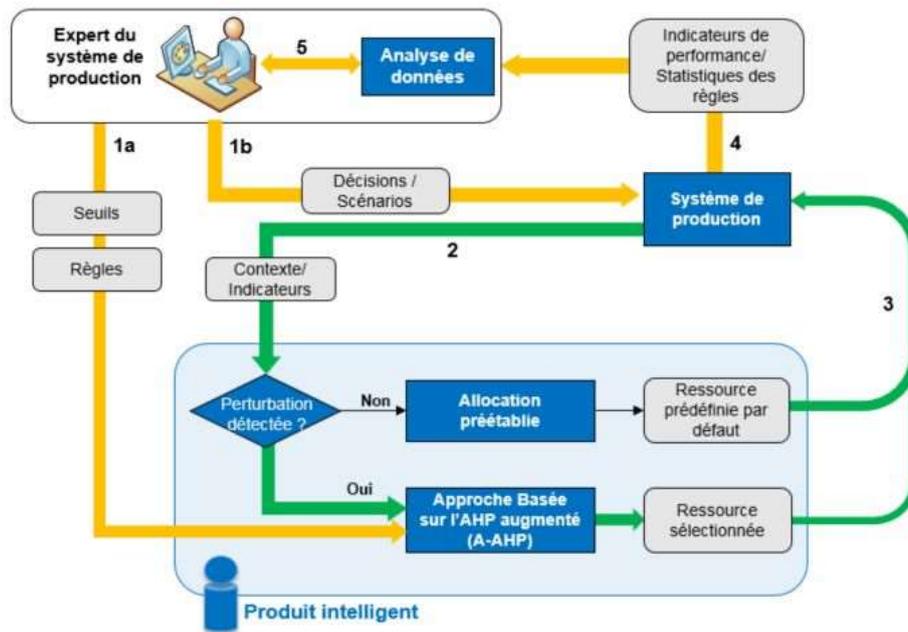


Figure 4-38 : Approche de pilotage réactif adaptatif de (Attajer 2023).

L'expert du système de production fournit les connaissances nécessaires du système de production étudié. Il prend des décisions et il établit des scénarios qui vont être appliqués au système de production.

La délégation de pilotage aux produits intelligents est réalisée par la définition des règles fournies par l'expert afin de permettre d'adapter les préférences des décisions de pilotage. Notre approche se déroule selon 5 principales étapes :

1. L'expert fixe les seuils et fournit des règles permettant aux produits intelligents de les appliquer dans son approche basée sur l'AHP augmenté (A-AHP) (qui sera détaillée dans la suite) (flèche 1a.). L'expert définit également les décisions et les scénarios de production qui seront réalisés par le système de production (flèche 1b.).
2. Chaque produit intelligent suit son plan d'allocation préétabli pour sa réalisation (flèche 2). Au niveau des nœuds décisionnels, le contexte et les indicateurs du système de production sont collectés. Deux cas de figures sont envisagés :
  - Si aucune perturbation n'est détectée, alors le produit est affecté à la ressource prévue par le plan d'allocation préétabli.

- Si une perturbation est détectée, alors le produit exécute le mécanisme décisionnel (dans notre cas c'est une approche AHP augmenté qui sera détaillé par la suite) pour sélectionner la ressource la mieux classée pour réaliser le prochain service.
3. La décision concernant la prochaine ressource est sélectionnée et envoyée au système de production afin de mettre à jour son plan de production (*flèche 3*).
  4. A la fin de la production, des données sont collectées et des indicateurs sont calculés et transmis à un outil d'analyse de données (*flèche 4*).
  5. L'expert effectue les analyses de données grâce aux données et indicateurs collectés dans l'étape précédente (*flèche 5*). Ce travail lui permet de mettre à jour les seuils et les règles, utiles pour l'étape 1.

Le mécanisme décisionnel appliqué par les produits intelligents (étape 2) est un problème multicritère. Nous avons opté pour la méthode AHP en raison de sa simplicité, sa facilité d'utilisation et de sa grande flexibilité comparée à d'autres méthodes (Ho et Ma 2018). AHP offre un processus d'évaluation et de pondération hiérarchique intuitif, principalement basé sur des comparaisons par paires itératives et séquentielles entre les alternatives disponibles (Saaty 1994). Mais dans sa forme classique, l'AHP présente des limites pour l'appliquer dans un contexte perturbé. Pour surmonter ceci, nous avons proposé une adaptation de l'AHP en ajoutant des étapes supplémentaires (les étapes 31 à 34, en rouge dans la figure 4-39).



Figure 4-39 : Mécanisme décisionnel basé sur l'AHP augmentée (A-AHP) (Attajer et al. 2022b).

Nous détaillons dans ce paragraphe le fonctionnement de notre adaptation. Des règles expertes sont introduites à la méthode AHP pour adapter dynamiquement les préférences à l'état du système et aux perturbations détectées. Pour expliquer cette adaptation nous nous basons sur un exemple. Un produit intelligent  $P_1$  utilise une planification d'allocation préétablie, qui indique que le prochain service requis est le service  $S_2$  qui sera fourni par la ressource  $R_2$ . Cependant, lorsque le produit  $P_1$  atteint un nœud décisionnel sur son chemin vers la ressource  $R_2$ , une défaillance est détectée. Par conséquent, le produit  $P_1$  doit reconsidérer son allocation et prendre une décision de pilotage en effectuant une série de comparaisons par paires. Parmi un ensemble de décisions disponibles, deux décisions ont été identifiées : (1)  $D_1$  : aller à la ressource  $R_2$  assignée par défaut et attendre qu'elle soit réparée, et (2)  $D_2$  : aller à une ressource alternative :  $R_1$  ou  $R_3$ . Les deux règles identifiées sont ensuite évaluées en fonction des critères prédéfinies, ici il s'agit de deux critères : temps et coût.

Dans le premier cas (règle 1 de la figure 4-40), la durée de la perturbation est faible (ici 10 unités de temps) et la file d'attente de  $R_2$  est vide. Une des ressources alternatives est opérationnelle et sa file d'attente est vide. Dans cette situation, « *il est préférable* » d'envisager de perdre du temps à attendre la réparation de la ressource  $R_2$  plutôt que de consommer des coûts de logistique pour aller à une ressource alternative. Par conséquent,  $D_1$  est « très fortement » préférable à  $D_2$ , en se basant sur l'échelle d'importance adoptée.

Dans le second cas (règle 2 de la figure 4-40), la durée de défaillance de  $R_2$  est faible et sa file d'attente est chargée, ce qui signifie que le produit devra attendre plus du temps, avec les risques de l'occurrence d'une nouvelle défaillance de la ressource ou de non-qualité du produit. Une ressource alternative est opérationnelle et sa file d'attente est vide. Dans ce cas, « *il est préférable* » d'envisager de perdre des coûts de logistique pour trouver une ressource alternative, plutôt que de perdre du temps à attendre la ressource jusqu'à ce qu'elle soit réparée et que sa file d'attente soit vide. Par conséquent,  $D_2$  est « très fortement » préférable à  $D_1$ , en se basant sur l'échelle d'importance adoptée.

<p><b>For</b> Time criterion  <b>If</b> “The assigned resource failure duration = 10 time units “  AND “the assigned resource queue is empty“  AND “an alternative resource is operational”  AND “an alternative resource queue is empty”  <b>Then</b>  Decision <math>D_1</math> is “very strongly” preferable to <math>D_2</math> with:  <math>D_1</math>: Go to the assigned resource and wait until it is repaired  <math>D_2</math>: Go to the alternative resource</p>	<b>Rule1</b>
<p><b>For</b> Cost criterion  <b>If</b> “The assigned resource failure duration = 10 time units”  AND “the assigned resource queue is loaded”  AND “an alternative resource is operational”  AND “an alternative resource queue is empty”  <b>Then</b>  Decision <math>D_2</math> is (very strongly) preferable to <math>D_1</math> with:  <math>D_1</math>: Go to the assigned resource and wait until it is repaired  <math>D_2</math>: Go to the alternative resource</p>	<b>Rule2</b>

Figure 4-40 : Exemples de prise de décision basée sur des règles (Attajer et al. 2022b).

Nous avons implémenté et testé notre approche A-AHP sur la plateforme S.MART (figure 4-41). Cette plateforme est un système de production flexible (« *Flexible Manufacturing System FMS* ») servant à des fins de recherche, d'éducation et de formation à l'Université Polytechnique des Hauts-de-France (UPHF) (Berdal et al. 2020; Trentesaux et al. 2013).

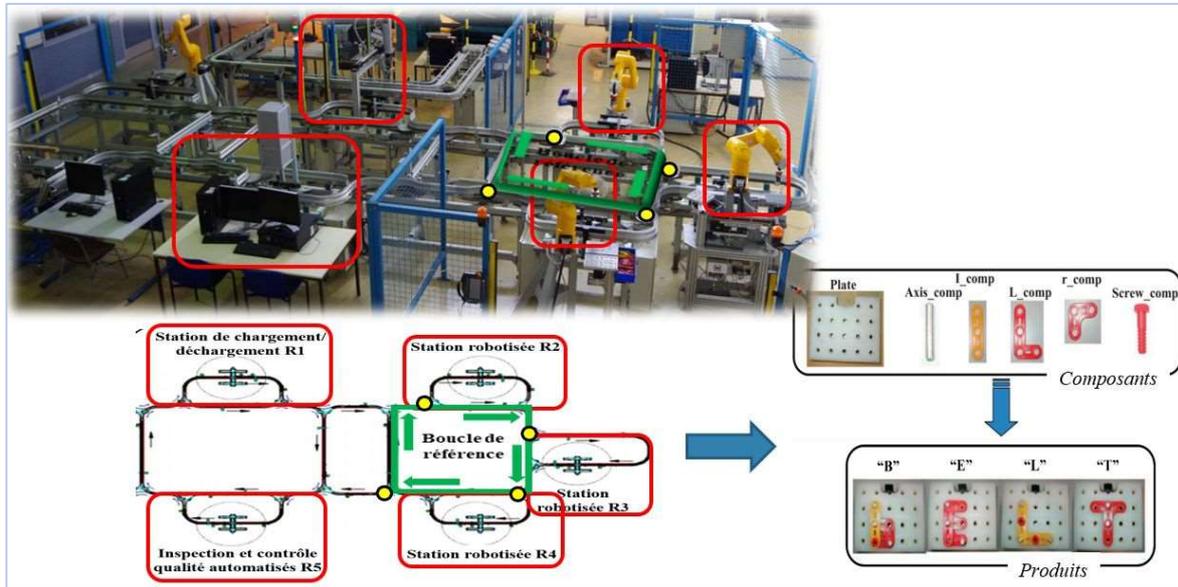


Figure 4-41 : Plateforme S.MART de l'Université Polytechnique Hauts-de-France.

Nous avons comparé les performances de notre approche avec les stratégies de pilotage suivantes :

- La stratégie inflexible « *Inflexible Strategy : IS* », dans laquelle chaque produit suit sa planification d'allocation préétablie, même en cas de perturbations. Le produit ne profite pas de la flexibilité du système et attend dans la file d'attente de la ressource fournissant le service jusqu'à ce que la ressource devienne disponible.
- AHP standard (**Std-AHP**) où la comparaison par paire des critères et leurs poids se fait de manière classique selon les poids prédéfinis. (voir (Attajer 2023), chapitre 4).

Pour réaliser les expérimentations, nous avons développé un modèle de simulation multi-agents de notre plateforme avec AnyLogic 8.7.10 *University Edition* (Attajer et al. 2021). Nous avons réalisé trois groupes d'expérimentations dont les résultats sont détaillés dans ce qui suit.

Les expérimentations se basent sur une simulation d'un mois et 100 répliques pour chaque scénario. Cinq indicateurs de performance globaux sont considérés dans les expérimentations :

- **Avg\_TT** : temps de séjour moyen des produits dans le système de production (en secondes), qui correspond au temps moyen nécessaire pour réaliser tous les services requis par les produits.

- **Avg\_Cost** : coût moyen de production en unités monétaires pour fabriquer un produit (en €).
- **Avg\_TP** : nombre moyen de produits fabriqués par heure.
- **Avg\_WT\_R** : temps d'attente moyen des produits dans la file d'attente des ressources (en secondes).
- **Avg\_WT\_Loop** : temps d'attente moyen des produits dans la boucle de référence (en secondes).

**Résultats de l'expérience E#1** : Etude de l'impact du taux de défaillance des ressources robotisées

Trois scénarios ont été simulés où le taux de défaillance varie comme suit :

- **Scénario (E#1,1)** : toutes les ressources robotisées ont un faible taux de défaillance.
- **Scénario (E#1,2)** : La ressource  $R_2$  a un taux de défaillance élevé. Cette ressource a été identifiée comme étant la ressource critique.
- **Scénario (E#1,3)** : toutes les ressources robotisées ont un taux de défaillance élevé.

La figure 4-42 présente les résultats sous forme de radars pour chaque scénario, chaque stratégie de pilotage (IS, Std-AHP et A-AHP) et chaque critère.

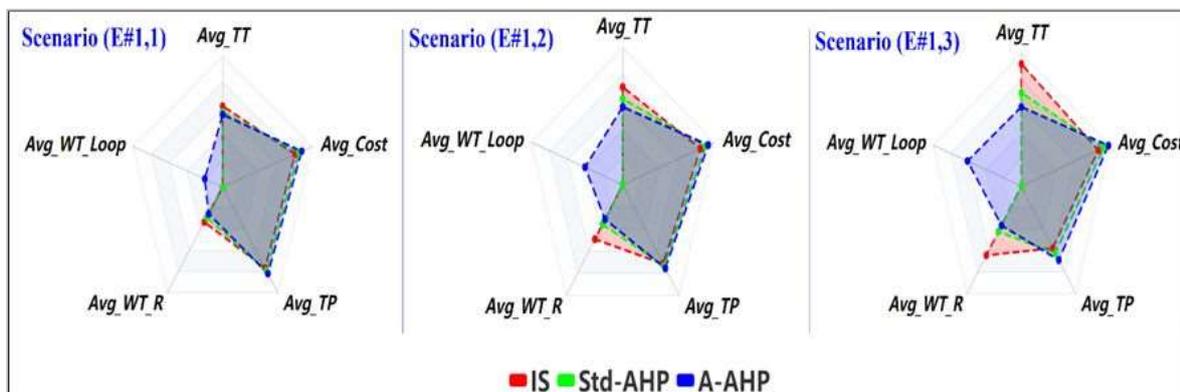


Figure 4-42 : Résultats de la simulation pour l'Expérience#1 (Attajer et al. 2022b).

Les résultats montrent que les valeurs  $Avg\_TT$ ,  $Avg\_TP$  et  $Avg\_WT\_R$  sont très sensibles au taux de défaillance pour toutes les stratégies étudiées, car l'indisponibilité des ressources augmente. En conséquence, avec un taux de défaillance élevé, on observe une congestion des convoyeurs, des délais élevés dans les files d'attente des ressources, et un faible débit de production (i.e., nombre des produits fabriqués par heure). Dans le premier scénario (E#1,1), avec des taux de défaillance faibles pour toutes les ressources robotisées, nous remarquons que l'A-AHP donne de meilleurs résultats par rapport aux autres stratégies de pilotage en ce qui concerne ces trois indicateurs.

Dans le deuxième scénario (E#1,2), un taux de défaillance élevé de la ressource  $R_2$ , une baisse de la performance du système pour toutes les stratégies de pilotage est observée. Cependant, A-AHP donne des bons résultats par rapport aux autres stratégies en ce qui concerne tous les

indicateurs de performance, à l'exception de *Avg\_Cost* et *Avg\_WT\_Loop* à cause des coûts logistiques supplémentaires.

Dans le troisième scénario (E#1,3), avec un taux de défaillance élevé de toutes les ressources, les performances du système diminuent considérablement. Cette diminution est moins importante dans le cas de A-AHP comparé aux autres stratégies.

### **Résultats de l'expérience E#2** : Etude de l'impact du temps de réparation des stations robotisées

Trois scénarios ont été simulés où le temps moyen de réparation varie comme suit :

- **Scénario (E#2,1)** : toutes les ressources robotisées ont un temps moyen de réparation faible.
- **Scénario (E#2,2)** : La ressource  $R_2$  a un temps moyen de réparation élevé.
- **Scénario (E#2,3)** : toutes les ressources robotisées ont un temps moyen de réparation élevé.

La figure 4-43 présente les résultats sous forme de radars pour chaque scénario, chaque stratégie de pilotage (IS, Std-AHP et A-AHP) et chaque critère.

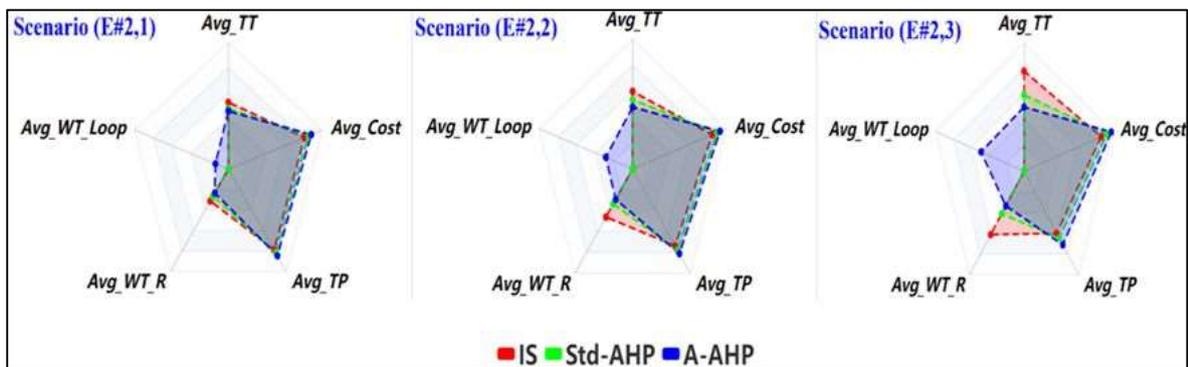


Figure 4-43 : Résultats de la simulation pour l'Expérience#2 (Attajer et al. 2022b).

Les résultats montrent que les valeurs *Avg\_TT*, *Avg\_TP* et *Avg\_WT\_R* sont très sensibles à la valeur du temps moyen de réparation pour IS, car les produits restent dans la file d'attente en attendant que la ressource qui leur est attribuée soit réparée. En revanche, pour Std-AHP et A-AHP, la dégradation de ces indicateurs est moins sensible grâce à la flexibilité du système.

Dans le cas d'une fréquence plus faible et d'une durée plus élevée des perturbations, A-AHP donne des meilleurs résultats par rapport aux autres stratégies, car cette approche tire pleinement profit de la flexibilité du système. Cependant, elle devient moins compétitive avec une fréquence plus élevée de perturbations.

### **Résultats de l'expérience E#3** : Etude de l'impact du taux d'arrivée des produits

Trois scénarios ont été simulés où le temps moyen de réparation varie comme suit :

- **Scénario (E#3,1)** : tous les types de produits ont un taux d'arrivée faible.

- **Scénario (E#3,2)** : des quantités mixées à la demande sont considérées comme suit, taux d'arrivée faible pour le type de produit "B", taux d'arrivée moyen pour les types de produit "E" et "L", et taux d'arrivée élevé pour le type de produit "T".
- **Scénario (E#3,3)** : tous les types de produits ont un taux d'arrivée élevé.

La figure 4-44 présente les résultats sous forme de radars pour chaque scénario, chaque stratégie de pilotage (IS, Std-AHP et A-AHP) et chaque critère.

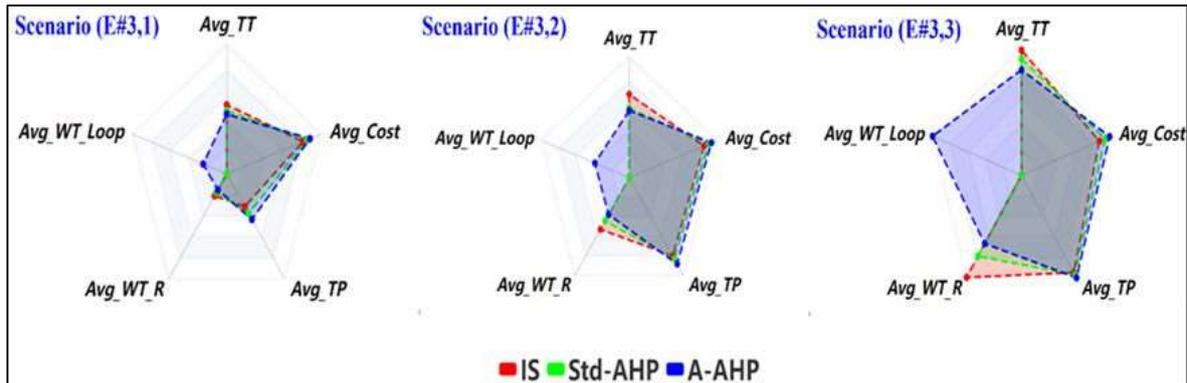


Figure 4-44 : Résultats de la simulation pour l'Expérience#3 (Attajer et al. 2022b).

Les résultats montrent que l'A-AHP donne les meilleurs résultats dans le cas des scénarios (E#3,1) et (E#3,2) que les autres stratégies car elle tire pleinement profit de la flexibilité du système. Cependant, elle devient moins compétitive avec un taux d'arrivée plus élevé dans le scénario (E#3,3), car un grand nombre de produits nécessite différents services et toutes les ressources du système sont sollicitées. En conséquence, les convoyeurs et les files d'attente deviennent pleinement chargés ce qui génère de grands délais et un faible taux de production (i.e., débits de production).

### Evaluation de la résilience opérationnelle de notre système de production

Nous avons appliqué la méthode d'évaluation de la résilience opérationnelle de notre système de production présentée dans le chapitre 3 – section 3.3.3 sur les résultats des trois stratégies de pilotage : IS, Std-AHP et A-AHP.

La mesure de performance du système a été calculée pour chaque stratégie de pilotage selon l'équation 3.7. C'est la mesure  $MP_{système}$  est relative au rapport de l'aire de la surface délimitée par la fonctionnalité globale du système pendant la durée de perturbation. La table 4-11 présente les résultats obtenus pour 1h00 de simulation et 100 réplifications pour chaque stratégie de pilotage.

Table 4-11. Résultats des mesures de performance globale du système.

Stratégie de pilotage	$MP_{système}$
IS	0.21
Std-AHP	0.57
A-AHP	<b>0.65</b>

Comme nous pouvons le voir, A-AHP a la valeur de  $MP_{\text{système}}$  la plus grande comparée à l'IS et Std-AHP. Ce résultat confirme les avantages qu'offre l'A-AHP par rapport au maintien d'un niveau de performance acceptable en présence d'une perturbation, en raison de ses caractéristiques dynamiques qui tirent pleinement parti de la flexibilité du système.

#### 4.4. Contributions des systèmes de pilotage dans la phase post-perturbations

Dans cette section, nous présentons nos contributions pour le pilotage des systèmes de production de biens et de services après l'occurrence d'une perturbation. Nous avons collecté et exploité les données collectées dans les services d'hospitalisation afin d'apprendre de ce qui s'est passé lors d'un séjour hospitalier. Cet apprentissage aura pour objectif de prédire les durées d'un séjour hospitalier afin d'anticiper l'organisation des séjours et les perturbations qui pourront survenir.

Les services hospitaliers font face à une forte augmentation du nombre de patients nécessitant des soins ce qui a engendré une augmentation de la consommation des ressources dans les services. Grâce aux nouvelles technologies et l'évolution des systèmes d'informations, les hôpitaux se retrouvent avec une masse de données collectée dans des banques de données médicales et administratives. L'exploitation des données hospitalières est devenue une étape importante pour assurer l'efficacité et l'efficience de la qualité des services de soins. Les travaux de thèse de Mme. R. N. Mekhaldi ([Mekhaldi et al. 2021](#); [Mekhaldi 2022](#)) se sont intéressés à la prédiction des durées de séjour hospitalier (DDS) qui constitue un des indicateurs clés d'évaluation des hôpitaux. Cette prédiction permet d'apprendre des séjours hospitaliers, des perturbations rencontrées et d'identifier les facteurs impactant sa durée. Cette prédiction contribuera à l'anticipation de l'organisation et de la planification des ressources humaines et matérielles qui seront impliquées.

Un séjour hospitalier est défini comme étant l'intervalle de temps entre l'admission du patient et sa sortie. La figure 4-45 présente le déroulement d'un séjour hospitalier.

Un séjour hospitalier se déroule dans une ou plusieurs unités médicales. Il génère un ensemble de données qui seront stockées dans le système d'informations de l'hôpital et il se déroule pendant une durée DDS.

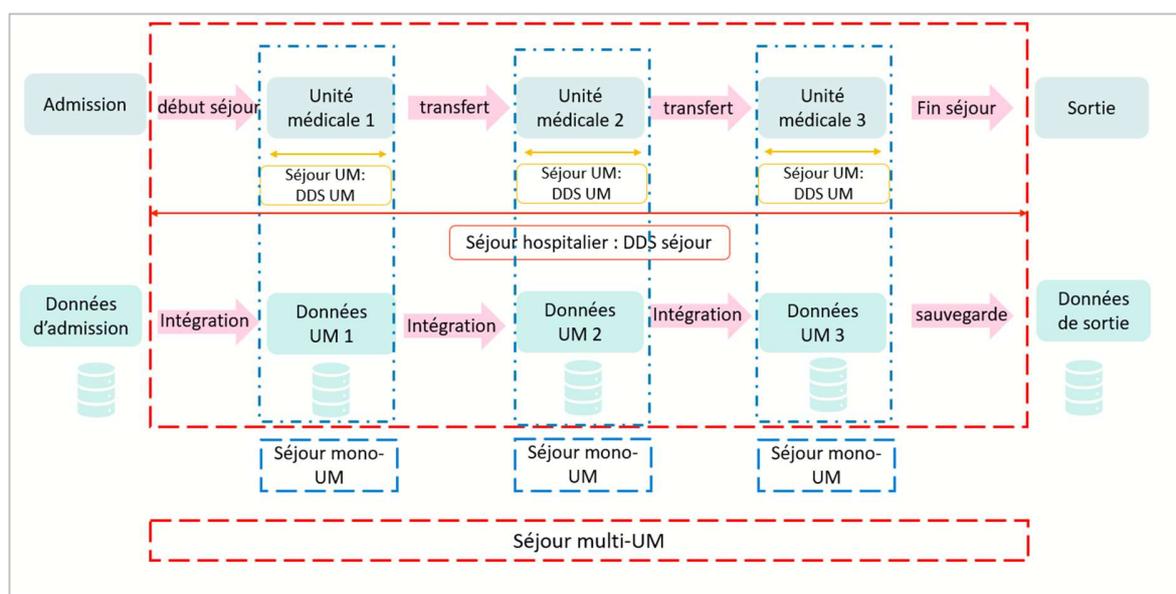


Figure 4-45 : Déroulement d'un séjour hospitalier (Mekhaldi 2022).

La revue de littérature a mis en évidence 4 classes des facteurs impactant la DDS :

- *Les informations médicales* : le diagnostic principal du patient ou le motif d'hospitalisation, les complications médicales, l'historique médical du patients et les résultats des examens biologiques.
- *Les informations démographiques du patient* : l'âge du patient, le genre, l'adresse du domicile et la situation maritale.
- *Les informations administratives* : le type de l'organisation de l'hôpital, les conditions d'admission et de sortie du patient, le type de l'unité médicale et les procédures de transferts entre unités médicales.
- *Les informations financières* : le type de paiement, les procédures de remboursement et le type d'assurance du patient.

Nous avons réalisé une première étude exploratrice de la prédiction de la DDS avec des données hospitalières disponibles dans la littérature scientifique qui a montré l'efficacité des techniques d'apprentissage supervisé « *Machine learning* » pour la prédiction de DDS (Mekhaldi et al. 2021). Nous avons donc retenue cette piste pour la suite de nos travaux sur des données hospitalières réelles.

Pour la suite de nos travaux et afin d'exploiter des données réelles, nous avons mis en place le processus de prédiction présenté dans la figure 4-46. Ce processus se base d'une part sur des techniques de fouille de données pour la phase d'analyse et d'extraction des informations pertinentes et d'autre part sur les algorithmes d'apprentissage automatique pour la phase de prédiction.

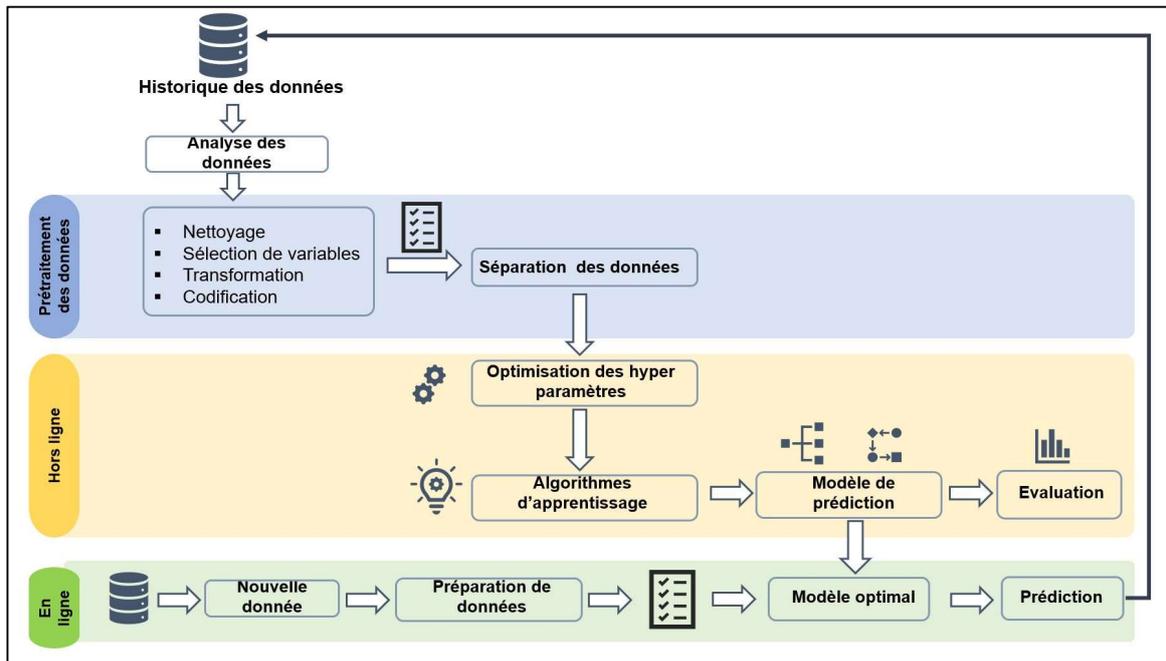


Figure 4-46 : Processus de prédiction de DDS avec les techniques d'apprentissage automatique.

La première étape consiste à collecter les données nécessaires à l'étude. L'étape suivante concerne l'analyse des données collectées. Cette étape est suivie par une phase de pré-traitement de données qui inclut le nettoyage des données, la sélection de variables, la transformation et l'encodage des données. L'ensemble de données résultat est séparé en 3 sous-ensembles : ensemble d'apprentissage, ensemble de validation et ensemble de test pour l'évaluation des résultats obtenus. Enfin, nous distinguons deux approches de prédiction : hors ligne et en ligne.

La partie hors ligne sert à l'optimisation des hyper-paramètres des algorithmes d'apprentissage automatique, à la validation des résultats et à l'apprentissage du modèle. Le résultat de la partie hors ligne est un modèle de prédiction qui sera évalué sur un ensemble de critères jusqu'à obtention d'un modèle de prédiction optimal. Ce modèle de prédiction optimal est utilisé dans la partie en ligne dans la prédiction de nouvelles instances de données en temps réel. Le résultat de prédiction est sauvegardé dans la base de données après validation.

Afin de mettre en place le processus de prédiction, nous avons utilisé des données de Programme de Médicalisation des Systèmes d'Informations (PMSI) d'un hôpital privé dans le nord de la France, présentés dans la table 4-12.

Table 4-12. Description des données PMSI utilisées.

<i>Variable</i>	<i>Description</i>	<i>Type</i>
<i>ID séjour global</i>	Identifiant du séjour hospitalier global	Numérique
<i>ID séjour UM</i>	Identifiant du séjour hospitalier dans une unité médicale	Numérique
<i>ID patient</i>	Identifiant du patient	Numérique
<i>UM</i>	Unité médicale visitée	Catégorie
<i>Genre</i>	le sexe du patient	Catégorie
<i>Distance</i>	La distance entre l'établissement de soins et l'adresse du patient. C'est une différence entre les codes postaux.	Numérique

<i>Age</i>	L'âge du patient	Numérique
<i>Date d'entrée</i>	Date d'entrée à l'unité médicale	Date
<i>Date de sortie</i>	Date de sortie de l'unité médicale	Date
<i>Mode d'admission</i>	Mode d'admission du patient	Catégorie
<i>Mode de sortie</i>	Mode de sortie du patient	Catégorie
<i>Provenance</i>	Provenance du patient	Catégorie
<i>Destination</i>	Destination du patient	Catégorie
<i>Code CIM 10</i>	Codification de la maladie du patient	Catégorie
<i>Type code CIM 10</i>	Type du code à savoir, principal, associé ou relié	Catégorie
<i>Acte CCAM</i>	Acte médical réalisé codifié à l'aide du CCAM	Catégorie multivaluée
<i>Date acte CCAM</i>	Date de réalisation de l'acte	Date
<i>DDS</i>	Durée De Séjour hospitalier dans une unité médicale en jours	Numérique

Nous avons réalisé les étapes de processus de prédiction en commençant par l'analyse des données et leur nettoyage. L'étape de sélection des données nous a permis d'identifier les variables retenues pour les modèles d'apprentissage dans le cadre de la prédiction de la DDS, présentées dans la table 4-13.

**Table 4-13. Sous-ensemble des variables retenues pour le modèle de prédiction.**

<i>Variable</i>	<i>Type</i>
<i>Age</i>	numérique
<i>Moyenne DDS par DP</i>	numérique
<i>UM</i>	catégoriel
<i>Distance</i>	numérique
<i>Admission mode</i>	catégoriel
<i>Antécédents DDS</i>	numérique
DP	catégoriel

Nous avons développé deux types d'approches d'apprentissage automatique : classification et régression. Nous présentons les résultats dans les paragraphes suivants.

Pour l'implémentation de nos solutions, nous avons utilisé un microprocesseur Intel ® Core™ i7, fréquence CPU de 2.11 GHz, mémoire RAM 8.00 Go, système d'exploitation windows 10, 64 bits.

Nous avons utilisé R pour la partie analyse des données et le langage de programmation Python (version 3.7) pour l'implémentation des algorithmes.

#### 4.4.1. Classification

La classification permet la prédiction d'une valeur catégorielle à partir d'un ensemble de variables indépendantes. Nous avons défini des intervalles pour convertir la variable DDS d'une valeur numérique en une variable catégorielle : *DDS courte* : de 0 à 2 jours, *DDS moyenne* : de 3 à 5 jours et *DDS longue* : de 6 à 28 jours.

Nous avons comparé les algorithmes d'apprentissage automatique suivants : le *Xgboost*, le *Random Forest*, le *Gradient Boosting Model*. Nous les avons évalués selon les mesures de performance suivantes (voir les équations suivantes) : la *précision*, le *rappel* et le *score F1*.

Pour réaliser les mesures, nous nous appuyons sur la matrice de confusion qui représente en ligne les valeurs prédites et en colonne les valeurs réelles de la valeur cible.

		Valeurs réelles	
		Positives	Négatives
Valeurs prédites	Positives	Vraies positives (TP)	Fausse positives (FP)
	Négatives	Fausse négatives (FN)	Vraies négatives (TN)

Figure 4-47 : Matrice de confusion.

Nous présentons les équations de calcul des différentes mesures de performance comme suit :

- *Précision* : nombre d'exemples positifs correctement classés divisé par le nombre total d'exemples qui sont classés comme positifs.

$$\text{précision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

- *Rappel* : nombre d'exemples positifs correctement classés divisé par le nombre total d'exemples positifs réels dans l'ensemble de test.

$$\text{rappel} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

- *Le score F1* : Cette mesure comprise entre 0 et 1 représente la moyenne harmonique de la précision et du rappel.

$$F_1 = 2 * \frac{\text{précision} * \text{rappel}}{\text{précision} + \text{rappel}} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

- *Précision globale* : nombre d'exemples positifs correctement classés divisé par le nombre total d'exemples qui sont classés comme positifs.

$$\text{précision globale} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Nous présentons dans la table 4-14 les résultats obtenus pour chaque algorithme.

Table 4-14. Mesures d'évaluation pour la classification des DDS.

	Classes	<i>Xgboost</i>	<i>GBM</i>	<i>Random Forest</i>
<i>Précision</i>	DDS courte	<b>0,86</b>	0,81	0,83
	DDS moyenne	<b>0,83</b>	0,72	0,69
	DDS longue	<b>0,89</b>	0,75	0,69
<i>Rappel</i>	DDS courte	<b>0,72</b>	0,59	0,62
	DDS moyenne	<b>0,86</b>	0,76	0,7
	DDS longue	<b>0,95</b>	0,85	0,87
<i>F1 - score</i>	DDS courte	<b>0,78</b>	0,68	0,63
	DDS moyenne	<b>0,84</b>	0,74	0,69
	DDS longue	<b>0,92</b>	0,8	0,77

Nous observons que l'algorithme *XgBoost* donne les meilleurs résultats comparés aux autres algorithmes. En effet, sur l'ensemble des trois classes définies (courte, moyenne et longue), c'est l'algorithme qui offre les mesures de performance les plus élevées. Le score F1 étant supérieure à 0.78 permet de confirmer les résultats satisfaisants de cet algorithme ; D'autres part, le *Gradient boosting model (GBM)* dépasse légèrement les résultats du *Random Forest*. Les deux algorithmes *Xgboost* et *GBM* se basent sur la technique de « boosting » qui consiste à générer des hypothèses de façon séquentielle et chaque hypothèse tente d'optimiser la fonction de perte d'une étape à une autre. Ce résultat confirme l'efficacité des techniques du « boosting » comparées à d'autres techniques.

Nous avons également mesuré la *précision globale* définie plus haut par l'équation 4-13. Nous présentons les résultats dans la figure 4-48.

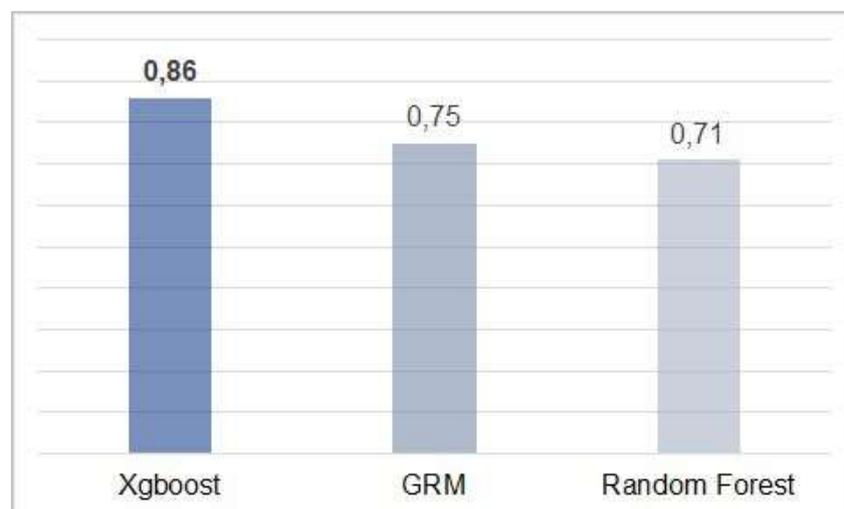


Figure 4-48 : Résultats de la « précision globale » des trois algorithmes.

*Xgboost* possède la meilleure « *précision globale* » ce qui confirme son efficacité dans la classification des DDS comparée aux deux autres algorithmes.

## 4.4.2. Régression

La régression consiste à trouver une relation entre les variables indépendantes et une variable dépendante numérique représentée par la DDS. 4 algorithmes ont été comparés : le *Random Forest*, le *GBM*, le *Xgboost* avec MSE (moyenne quadratique des erreurs, Eq. 4-14) et le *Xgboost avec MSE pondérée* (Eq. 4-15).

Les moyennes quadratiques des erreurs sont définies comme suit :

- *La moyenne quadratique des erreurs (MSE)* : somme des écarts entre la valeur prédite  $\hat{y}_i$  et la valeur réelle  $y_i$  ( $i = 1 \dots N$ ,  $N$  nombre d'instances). C'est la somme des pertes prise en compte dans l'algorithme *Xgboost\_MSE*.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (\text{Eq. 4.14})$$

- *La moyenne quadratique des erreurs pondérée (MSE pondérée)* : la pondération est exprimée par la valeur de la fréquence d'une valeur  $y_i / N$  qui représente la proportion d'une valeur DDS que nous notons  $D$ . Cette pondération force l'algorithme à prédire même les valeurs rares. Ceci est très utiles dans le contexte hospitalier où nous devons garder tous les cas même les plus rares afin d'apprendre du système et de ce qui est passé durant un séjour hospitalier :

$$MSE \text{ pondérée} = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{1}{\left[ \frac{freq(y_i)}{N} \right]} \right) * (\hat{y}_i - y_i)^2 \right] \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Nous avons comparé les différents algorithmes selon les mesures de performances suivantes :

- *La Moyenne des valeurs absolues des erreurs (MAE)* : somme des écarts absolus entre les valeurs prédites  $\hat{y}_i$  et les valeurs réelles  $y_i$  ( $i = 1 \dots N$ ,  $N$  nombre d'instances). Cette mesure doit être le plus petit possible.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (\text{Eq. 4.16})$$

- *Le  $R_2$*  : coefficient de détermination qui définit la variation dans la variable dépendante (ou cible) en utilisant les variables indépendantes (caractéristiques). Plus le  $R_2$  est proche de 1, plus le modèle est meilleur.

$$R_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

- *Le  $R_2$  Ajustée* : cette mesure est similaire au  $R_2$ , mais elle donne moins de poids aux variables non nécessaires pour la prédiction. Elle doit être proche de 1.  $N$  représente le nombre d'instances et  $P$  le nombre de variables indépendantes dans l'ensemble de données.

$$R_2 \text{ ajusté} = 1 - \frac{(1 - R_2)(N - 1)}{(N - P - 1)} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

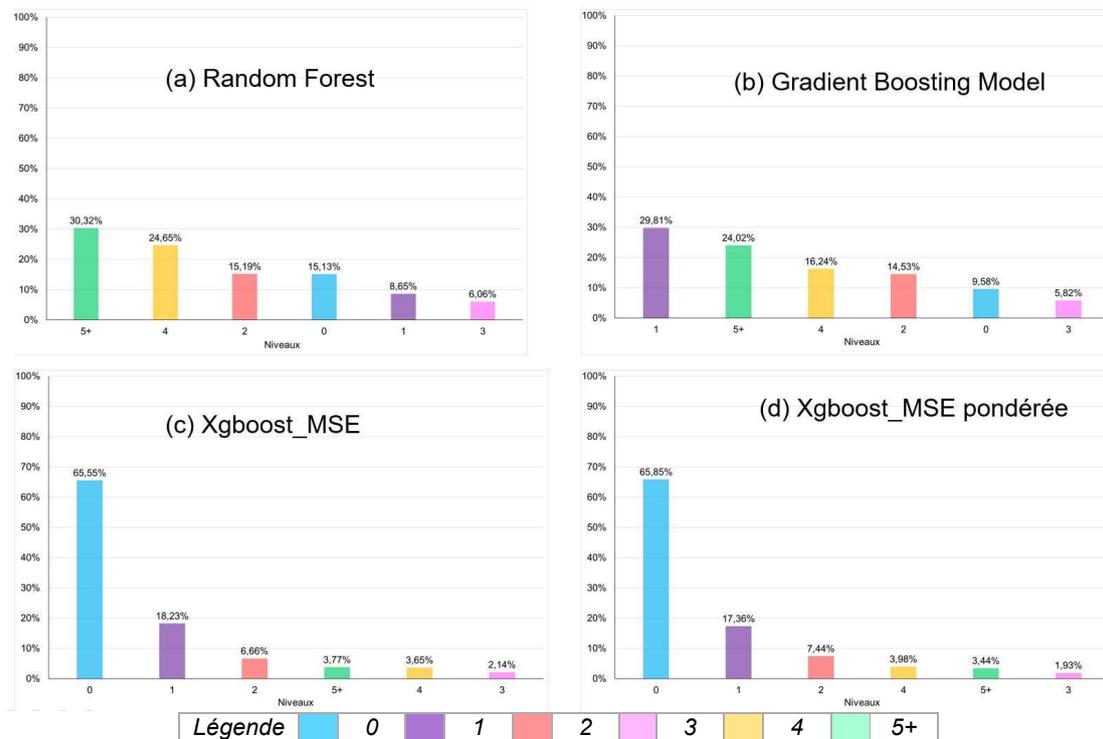
Nous présentons dans la table 4-15 les résultats des mesures pour les différents algorithmes appliqués.

**Table 4-15. Mesures d'évaluation des algorithmes de régression pour la prédiction des DDS.**

Mesure de performance	Random Forest	GBM	Xgboost_MSE	Xgboost_MSE pondérée
MAE	2.21	2.30	<b>0.79</b>	<b>0.79</b>
R <sub>2</sub>	0.58	0.55	<b>0.88</b>	<b>0.88</b>
R <sub>2</sub> ajusté	0.58	0.55	<b>0.88</b>	<b>0.87</b>

La table 4-15 montre que l'algorithme Xgboost sous ses deux formats (MSE et MSE pondérée) est le plus performant comparée aux autres algorithmes. Elle donne les meilleures valeurs des mesures de performances : MAE, R<sub>2</sub> et R<sub>2</sub> ajusté. En effet, avec une MAE de 0.79 ceci veut dire que l'écart en valeur absolue entre la valeur prédite et la valeur réelle est égal à 0.79 jours. Cette valeur est satisfaisante vu le contexte complexe du séjour hospitalier. Les valeurs de R<sub>2</sub> et R<sub>2</sub> ajusté sont à 0.88 ce qui veut dire que les variables indépendantes expliquent la variable DDS à 88% ce qui est un bon résultat. La pondération de la fonction de perte n'a pas eu d'effet sur les résultats de la MAE du modèle de prédiction avec le Xgboost.

Afin de bien comprendre les résultats obtenus, nous présentons dans la figure 4-49 les taux d'erreurs de prédiction pour chaque algorithme.



**Figure 4-49 : Evaluation des modèles de prédiction de DDS.**

Notre objectif est de développer un modèle de prédiction de DDS nous permettant d’avoir une erreur de 0 entre la valeur réelle et la valeur prédite. Nous remarquons que les algorithmes *Xgboost\_MSE* et *Xgboost\_MSE pondérée* obtiennent ce résultat pour 65.55% et 65.85% des cas respectivement. Le *Random Forest* et *GBM* atteignent l’objectif dans 15.13% et 9.58% des cas respectivement ce qui représente des faibles performances.

En termes de gestion hospitalière, une erreur de prédiction de 1 jour reste acceptable. Ceci nous amène à cumuler les résultats pour 0 et 1 jour. Dans ce contexte, *Xgboost\_MSE* et *Xgboost\_MSE pondérée* nous offrent des performances de plus de 83% ce qui confirme l’efficacité de ces deux algorithmes et des techniques de *boosting* par rapport aux autres algorithmes et techniques.

## 4.5. Synthèse des contributions

Nous présentons dans cette partie une synthèse de nos contributions dans la table 4-16, afin de mettre l’accent sur les thèmes couverts par nos travaux de recherche et l’évolution de nos approches de résolutions.

**Table 4-16. Synthèse de nos contributions (ordre chronologique).**

Mes contributions		Perturbation			Perf.		Description
Thèses co-encadrées	Publications	Pré	Pendant	Post	Robustesse	Résilience	Problème, perturbations, approches
T. CHAARI, 2010 (Chaari 2010)	(Chaari et al. 2011)	•			•		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ordonnancement robuste d’un flow shop hybride</li> <li>Temps opératoire incertain</li> <li>Algorithme génétique / simulation</li> </ul>
	(Kadri et al. 2014b; 2014a)	•					<ul style="list-style-type: none"> <li>Prévision de nombre d’arrivées journalière des patients</li> <li>Période d’épidémie et flux important de patients</li> <li>Modèle ARMA (Autoregressive-Moving-Average)</li> </ul>
	(Kadri, Chaabane, et Tahon 2014a; chaabane et Kadri 2021)	•					•
F. KADRI, 2014 (Kadri 2014)	(Kadri et al. 2014)		•				<ul style="list-style-type: none"> <li>Détection anormale des arrivées des patients</li> <li>Augmentation soudaine des arrivées de patients</li> <li>Combinaison d’un modèle SARMA et une carte de contrôle EWMA (<i>Exponentially Weighted Moving Average Chart</i>)</li> </ul>

	(Harrou et al. 2015)						<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection des anomalies relatives aux demandes de soins</li> <li>- Augmentation des demandes de soins sur plusieurs jours</li> <li>- Combinaison de l'analyse en composante principale (ACP) et de la Maîtrise Statistique de Processus Multivariée (MSPM)</li> </ul>
	(Kadri, Chaabane, et Tahon 2016; Chaabane et Kadri 2021)						<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pilotage réactif d'un service d'urgence</li> <li>- Flux important des patients</li> <li>- Système d'aide à la décision basée sur la simulation</li> </ul>
<b>F. WALHA, 2018</b> (Walha 2018)	(Walha et al. 2016)						<ul style="list-style-type: none"> <li>- Approche réactive pour l'allocation des PI-Containers</li> <li>- Perturbations : taille des containers, information sur la destination et des docks hors service</li> <li>- Heuristique, Recuit-simulé adaptative et Systèmes multi-agents</li> </ul>
<b>Collaboration</b>	(Marcon et al. 2017b)						<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tournées de soignants dans une (HAD)</li> <li>- Perturbations dans les durées de soins et les trajets entre les patients</li> <li>- Système Multi-agents basés sur des règles de gestion locales</li> </ul>
<b>R. N. MEKHALDI, 2022</b> (Mekhaldi 2022)	(Mekhaldi 2022)						<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prédiction des durées de séjours hospitaliers</li> <li>- Différents séjours hospitaliers hétérogènes</li> <li>- Algorithmes basés sur des techniques de « machine Learning » : <i>Xgboost</i>, <i>RF</i>, <i>GBM</i></li> </ul>
<b>A. ATTAJER, 2023</b> (Attajer 2023)	(Attajer, et al. 2022)						<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pilotage réactif des systèmes cyber-physiques</li> <li>- Défaillance des ressource, temps de réparation et arrivée des produits</li> <li>- AHP augmentée et système multi-agents.</li> </ul>

Nos contributions ont couvert tous les verrous scientifiques que nous avons identifiées dans le chapitre 1. Nous avons développé des approches de pilotage couvrant toutes les périodes de la perturbation. Nos travaux se sont plus intéressés aux approches réactives pendant l'occurrence de la perturbation. Nos récents travaux ont intégré les approches de l'IA afin de réaliser des étapes d'apprentissage des perturbations permettant de prédire la dynamique de notre système pour mieux le préparer aux perturbations qui auront lieu dans le futur.

Nous avons travaillé également sur la définition et l'évaluation des concepts de robustesse, au début de notre carrière, puis du concept de la résilience pendant les dix dernières années.

La figure 4-50 présente l'évolution de mes approches de résolution depuis ma thèse et jusqu'à la dernière thèse co-encadrée.

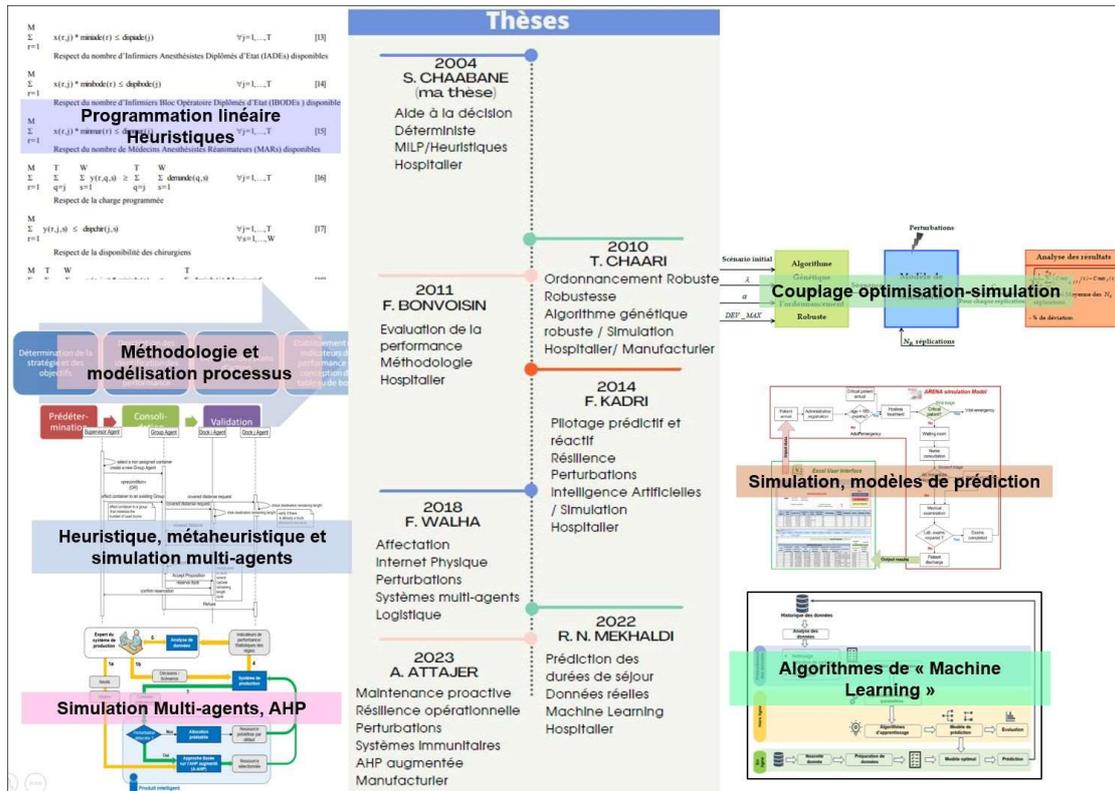


Figure 4-50 : Evaluation des approches de résolution des problèmes de pilotage des systèmes de production de biens et de services.

Lors de ma thèse, j’ai développé des approches basées sur la programmation linéaire et les heuristiques pour résoudre des problèmes d’ordonnancement et de planification des blocs opératoires dans un contexte déterministe. Notre apport majeur était dans la prise en compte des contraintes complexes liées au contexte hospitalier (temps opératoire variable, équipe chirurgicale, contexte médical...). Notre publication (Guinet et Chaabane 2003) est un des articles le plus cité dans cette thématique (410 références, Google Scholar). J’ai également publié des papiers sur l’apport de la gestion industrielle à la gestion hospitalière regroupant notre communauté scientifique et la communauté hospitalière (Chaabane et al. 2003; Chaabane et Guinet 2004; Kharraja, Albert, et Chaabane 2009; 2007). Lors de mon séjour de post-doctorat, j’ai étendu mes travaux avec des données hospitalières issues d’un hôpital Belge en comparant plusieurs approches de planification des blocs opératoires (Chaabane et al. 2008; 2006; Chaabane et al. 2007).

Au début de ma carrière j’ai commencé à m’intéresser aux données incertaines, comme les temps opératoires dans les problèmes d’ordonnancement. Notre objectif était d’anticiper ces incertitudes dès la phase de conception en assurant la robustesse par rapport aux perturbations. Nous avons couplé des approches d’optimisation et de simulation afin de profiter des avantages et de la complémentarité de ces techniques. En parallèle nous avons travaillé sur une méthodologie de construction des indicateurs de performances et de modélisation de processus améliorant nos approches d’évaluation de la performance en adéquation avec la stratégie de notre système (Bonvoisin 2011; Bonvoisin et al. 2011). J’ai contribué à des travaux de recherche sur d’autres thématiques en apportant mes compétences en programmation linéaire et en technique d’optimisation (Borschlegell et al. 2011; Saliez et al. 2010).

La thèse de F. Kadri a marqué un tournant dans ma carrière et le début de mon intérêt pour les approches de prédiction. J'ai développé des approches de pilotage proactif et réactif basées sur la simulation qui s'est avérée un outil très performant en intégrant des modèles de prédiction permettant de connaître l'évolution des flux qui seront simulés et gérés. Nous avons développé des approches intelligentes permettant d'évaluer et d'améliorer la résilience de notre système.

Nous avons continué à améliorer nos approches de simulation en développant des approches réactives basées sur les systèmes multi-agents permettant aux composants de système de contribuer à la prise de décision. Cette délégation décisionnelle dans un contexte perturbé a permis de répondre aux perturbations de manière rapide et efficace réduisant l'impact des perturbations sur la performance de notre système.

Les cinq dernières années ont été marquées par nos contributions dans le domaine de l'intelligence artificielle. Nous avons vu le grand potentiel des techniques de « *machine learning* » dans le contexte hospitalier où les données sont hétérogènes et parfois de mauvaise qualité. Notre objectif étant d'exploiter la force de ces nouvelles techniques dans nos systèmes de pilotage. En plus des travaux cités dans les sections précédentes, j'ai exploré des techniques de data mining pour la prédiction de la durée de séjour dans les services des urgences (Benbelkacem et al. 2019). J'ai exploré également l'apport des technologies dans le domaine de la santé (Ben Ida et al. 2021).

La dernière thèse co-encadrée de M. Attajer a permis de combiner les approches d'analyse multicritère et la simulation multi-agents dans un contexte dynamique. Nous avons prouvé l'apport de ces approches pour l'évaluation et l'amélioration de la résilience opérationnelle.

Le domaine hospitalier a constitué un des domaines applicatifs de mes travaux de recherche. J'ai coordonné deux ouvrages sur les problématiques associées à ce domaine (Chaabane, Cousein, et Wieser 2022a; 2022b).

## 4.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté nos contributions pour répondre aux verrous scientifiques suivants : V2 (**anticiper et détecter l'occurrence des perturbations**), V3 (**réagir aux perturbations**) et V4 (**apprendre des perturbations**). Nos travaux ont couvert tous les verrous scientifiques identifiés. Nous avons développé des approches de pilotage proactif et réactif qui ont permis d'anticiper et de gérer les perturbations. Des modèles de prévision ont été proposés afin de permettre au décideur de préparer son système pour gérer les perturbations. Nous avons développé des approches basées sur des techniques d'optimisation, de simulation et d'intelligence artificielle. Une synthèse des travaux a été présentée en fin du chapitre. Nous nous sommes intéressés aux systèmes de production de biens (les systèmes manufacturiers) et de services (les systèmes de soins et de santé et les plateformes logistiques avec le concept d'internet physique). Ces travaux nous ont permis de voir évoluer nos thèmes de recherche vers la prise de décision dans un contexte perturbé et l'ouverture vers des nouvelles perspectives de recherche que nous présenterons dans le chapitre suivant.



## Chapitre 5. Perspectives de recherches scientifiques

### Objectifs du chapitre

*Nous avons présenté dans les chapitres précédents nos contributions pour répondre aux problématiques de pilotage des systèmes de production de biens et de services soumis à des perturbations fréquentes impactant les performances des systèmes. Ce chapitre est consacré à nos perspectives de recherche dans les prochaines années dans la continuité des travaux réalisés.*

### 5.1. Organisation des perspectives de recherche

La principale question scientifique de nos travaux est : « **comment piloter des systèmes de production soumis à des perturbations ?** ». Cette question a soulevé plusieurs verrous scientifiques que nous avons classés en 4 volets :

- **Humain** : en sa qualité de décideur ou d'utilisateur (opérateur, client, ...) son rôle et son comportement dans un contexte perturbé
- **Système opérant** : son fonctionnement dans le contexte perturbé
- **Système d'informations** : les données transitant dans le système complexe, leur modélisation et leur exploitation
- **Pilotage des systèmes de production de biens et de services** : la conception et le développement des mécanismes de pilotage.

Nos contributions de recherche ont été développées dans le cadre du volet « Pilotage des systèmes de production de biens et de service ». Nous avons abordé ce volet selon 5 verrous scientifiques :

- Définition des concepts de robustesse et de résilience en tant que concepts clé de la performance recherchée par nos approches (V1)
- Evaluation de la robustesse et de la résilience comme étant mesure clé d'évaluation de l'impact de nos approches sur les performances du système (V5)
- Conception et développement des approches de pilotage pour répondre aux trois phases de la perturbation : avant, pendant et après l'occurrence de la perturbation. (V2, V3 et V4)

Nos perspectives de recherche vont évoluer vers un thème plus précis : **Pilotage des systèmes de production pour l'amélioration de la résilience**. Ils vont s'orienter selon trois projets de recherche autour des points suivants :

- **P1** : Concept de résilience dans les problématiques de pilotage des systèmes de production soumis à des perturbations : approches, évaluation et amélioration avec un positionnement par rapport aux concepts proches comme la robustesse.
- **P2** : Approches hybrides de pilotage combinant les décisions opérationnelles et temps réels avec des approches tactiques et anticipatrices en utilisant les différentes techniques d'optimisation, de simulation et d'intelligence artificielle pour profiter de leur complémentarité et leurs avantages et points forts.
- **P3** : Intégration de l'humain dans nos approches de pilotage en tant que composante opérationnelle tout comme les machines et les ressources en plus de son rôle de décideur.

Les deux premiers projets se positionnent dans la continuité des travaux réalisés comme le montre la figure 5-1. Le troisième projet s'oriente vers un nouveau thème qui permet d'aborder le volet « Humain ».

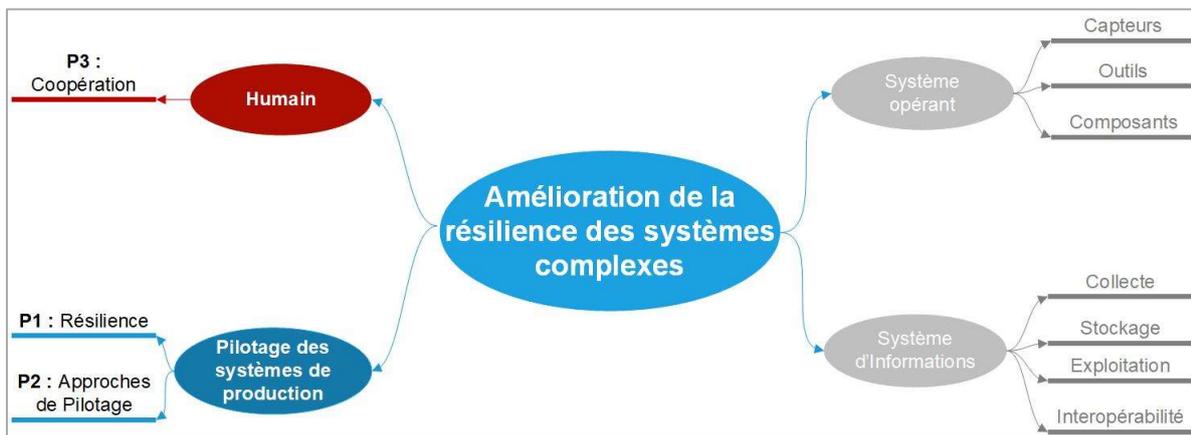


Figure 5-1. Organisation des perspectives de recherche.

Nos champs d'application seront dans les mêmes : le domaine hospitalier, les systèmes manufacturiers et la logistique et depuis les deux dernières années l'industrie 4.0.

Nous détaillons dans les sections suivantes les trois projets.

## 5.2. Amélioration de la résilience des systèmes complexes dans un contexte de perturbations

Les chapitres précédents ont montré que les systèmes de production de biens et de services sont confrontés à tout type de perturbations qui ne sont plus considérées comme étant des événements exceptionnels mais « la norme » (Skobelev et Trentesaux 2017). Ceci s'explique par un certain nombre de facteurs bien connus aujourd'hui, à savoir les nouvelles contraintes de la concurrence, la nervosité dans le comportement des clients, les nouvelles exigences de l'environnement et la complexité des processus. Dans un tel contexte, le concept de la résilience a émergé comme un concept clé pour la prise en compte des perturbations vécues par les systèmes

de production, lors de leur fonctionnement opérationnel (Chaabane et Trentesaux 2019). Ce concept a suscité l'intérêt de plusieurs communautés scientifiques dans différents domaines.

J'ai monté en juin 2021 et pour une durée de deux ans l'action GDR MACS : « *Amélioration de la résilience des systèmes complexes dans un contexte de perturbations* » (<https://gdr-macs.cnrs.fr/index.php/node/3131>) afin de positionner ce concept dans les travaux de la communauté STP (Sciences et technique de la productique du GDR MACS) et plus généralement en automatique. J'ai associé mes deux collègues : Mme Virginie Goepp, professeure des universités à l'INSA de Strasbourg (ICUBE UMR7357) et Mme Lamia Berrah, professeure des universités à l'Université Savoie Mont-Blanc (LISTIC) pour la coordination.

L'objectif de cette action est la prise en compte de la notion de résilience dans le pilotage des systèmes complexes, tels que les systèmes de production, soumis à des perturbations. La résilience devient en effet un critère de performance et un levier d'action en cohérence avec les critères et leviers traditionnellement utilisés dans le pilotage de systèmes de production de biens et de services (flexibilité, réactivité, fiabilité, etc.).

Les différentes activités menées lors de cette action (réunions, séminaires, workshops...) ont montré la pertinence de ce thème dans la communauté et le besoin de travailler sur l'intégration de la résilience dans les approches de pilotage. Nous avons identifié quatre sous-thèmes d'activités présentés dans la figure 5-2.

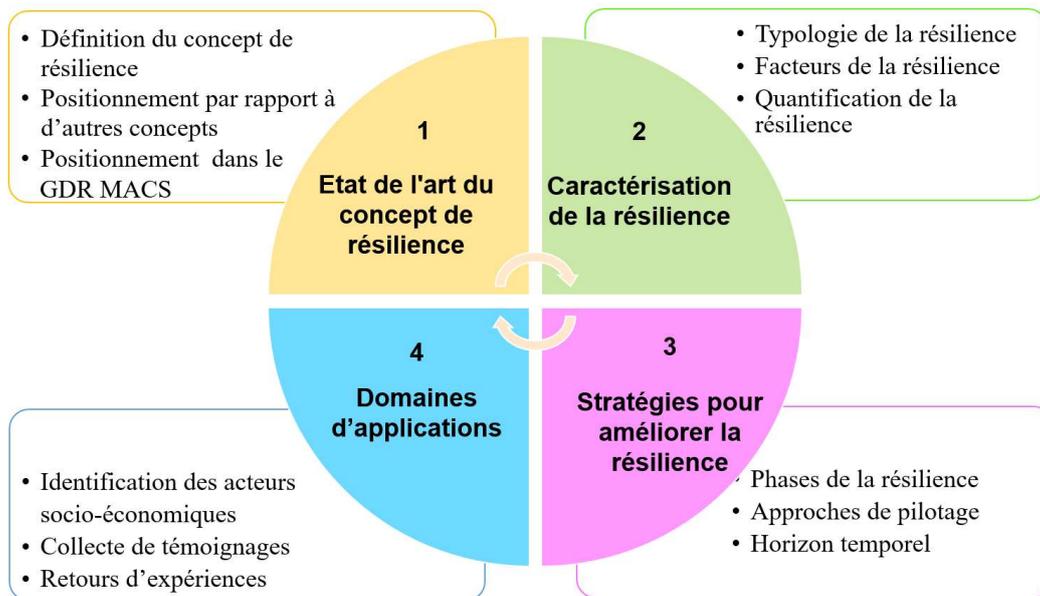


Figure 5-2. Thèmes de l'action pour l'organisation des travaux et des résultats.

Mes contributions scientifiques ont abordé ces différents thèmes mais je désire m'investir sur ces thèmes et dans les différents domaines d'application pour les 5 années à venir.

Pour le premier sous-thème, nous avons établi un premier état de l'art lors des travaux de thèse de M. F. Kadri (Kadri 2014) de la résilience dans le milieu hospitalier puis une récente revue de littérature pendant l'action dans le contexte de l'industrie 4.0 (Goepp et al. 2022) et dans notre chapitre 2. Ces revues de littératures ont prouvé l'intérêt de la résilience pour les systèmes de production évoluant dans un contexte perturbé. Nous comptons continuer à travailler sur cet état

de l’art pour positionner la résilience par rapport à d’autres concept. Une question qui a été posée lors de l’animation de notre action est : **quelle est la différence entre la robustesse et la résilience ?** Deux concepts qui intéressent la communauté du GDR MACS et sur lesquels j’ai déjà travaillé.

Les concepts de robustesse et de résilience visent à permettre aux systèmes de faire face aux perturbations. Nombreuses publications scientifiques se sont intéressées aux deux concepts de façon distinctes mais aussi de façon très proche ou similaire. Certaines publications soulèvent la confusion entre les deux concepts et on observe qu’à partir des années 90 les deux termes ont commencé à apparaître en même temps dans les titres des publications (Figure 5-3).

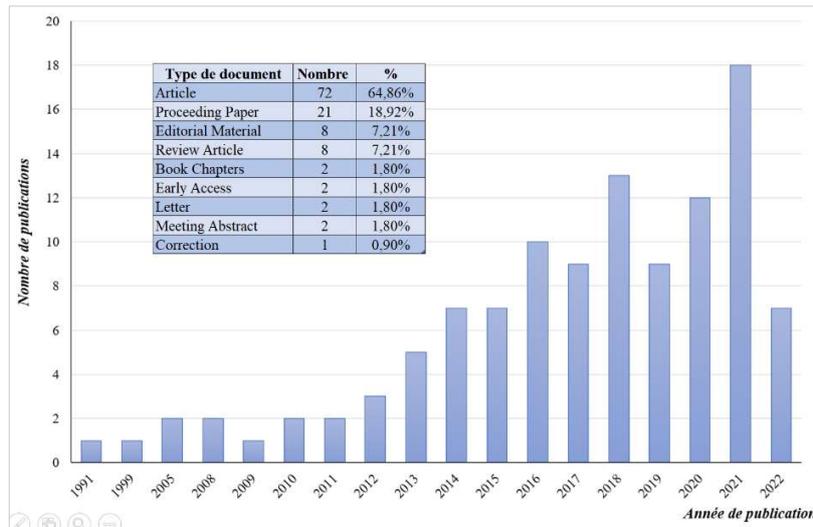


Figure 5-3. Nombre de publications par année (web of science : titre = “Resilience” and “Robustness”).

(Clément et al. 2018) présentent une synthèse des définitions des deux concepts dans une sélection de papiers ayant mis les deux mots dans le titre dans différents domaines. Les auteurs concluent que dans l’ensemble les définitions de la robustesse et de la résilience ne sont pas identiques dans tous les domaines mais ils soulignent des fortes similitudes. Ceci peut s’expliquer par le contexte perturbé dans les deux cas. Nous nous appuyons sur la conclusion de (Woods 2015) qui présente la robustesse comme étant un des quatre concepts de la résilience. Dans ce papier la robustesse est définie comme étant la réponse d’un système pour des perturbations qu’on peut modéliser tandis que la résilience concerne tout type de perturbations. Il existe donc un lien entre les deux concepts que nous devons préciser.

Je vais travailler sur le lien entre les deux concepts et son positionnement par rapport aux problématiques de pilotage. Je vais étendre cette étude vers d’autres critères classiques comme la flexibilité, la réactivité et la fiabilité.

La définition de la résilience a été adaptée dans différents domaines et selon les systèmes étudiés. Je vais travailler sur la caractérisation de la résilience dans les domaines suivants : le domaine hospitalier, le manufacturier et l’industrie 4.0. Un premier travail a été réalisé dans le papier (Goepf et al. 2022) proposant un *framework* de la résilience dans le contexte de l’industrie 4.0 qui a mis en évidence les piliers de la résilience comme le montre la figure 5-4.

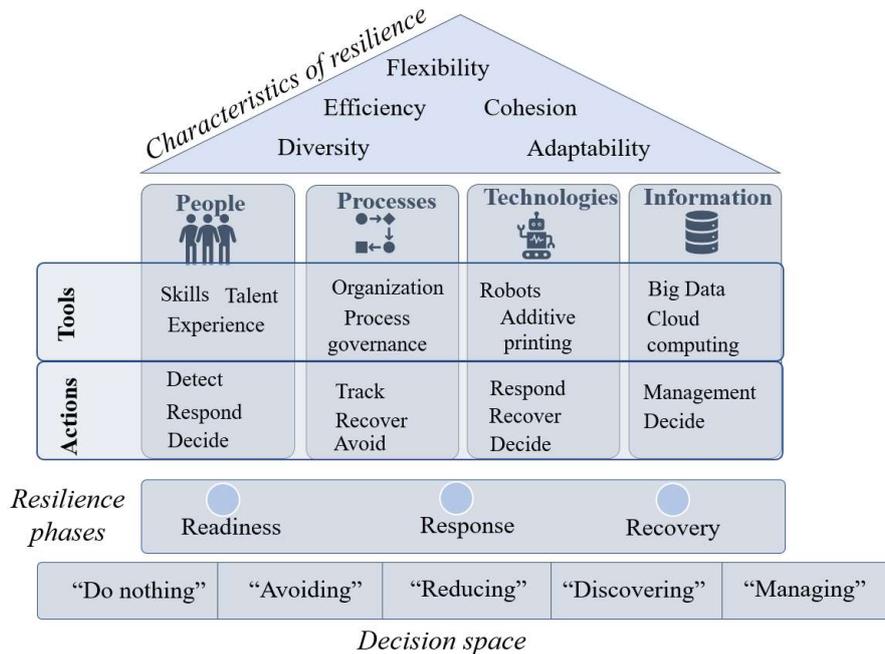


Figure 5-4. Framework de la définition et l'évaluation de la résilience adapté de (Morisse et Prigge 2017).

4 piliers qui contribuent à la résilience du système dans le contexte de l'industrie 4.0 ont été identifiés :

- *Humain* : l'expérience, la compétence et l'expertise des opérateurs.
- *Processus* : leur modélisation, organisation et gouvernance.
- *Technologies* : maturité technologique du système
- *Information* : collecte, gestion et exploitation des données.

J'envisage continuer à travailler avec Mme Berrah et Mme Goepp sur la caractérisation de la résilience selon ces 4 piliers et l'identification des facteurs impactant la résilience des systèmes cyber-physiques de production dans le contexte de l'industrie 4.0 puis étendre ce travail pour d'autres domaines.

Le deuxième sujet concernera la quantification et la mesure de la résilience. J'ai travaillé sur l'évaluation de la résilience des systèmes d'urgences (Kadri 2014) et des systèmes cyber-physiques de production (Attajer 2023). Je vais donc continuer à explorer ce sujet en m'appuyant sur l'évaluation de performance du système de production dans un contexte perturbé. Je vais m'appuyer sur la représentation graphique de la résilience proposée par (Mujjuni et al. 2021) dans la figure 5-5. Cette figure met en évidence les phases de la résilience proposées par (Hollnagel 2009) (Anticiper, répondre, surveiller et apprendre), l'évolution de la performance selon l'occurrence de la perturbation et l'état du système après la mise en place des actions pour faire face aux perturbations.

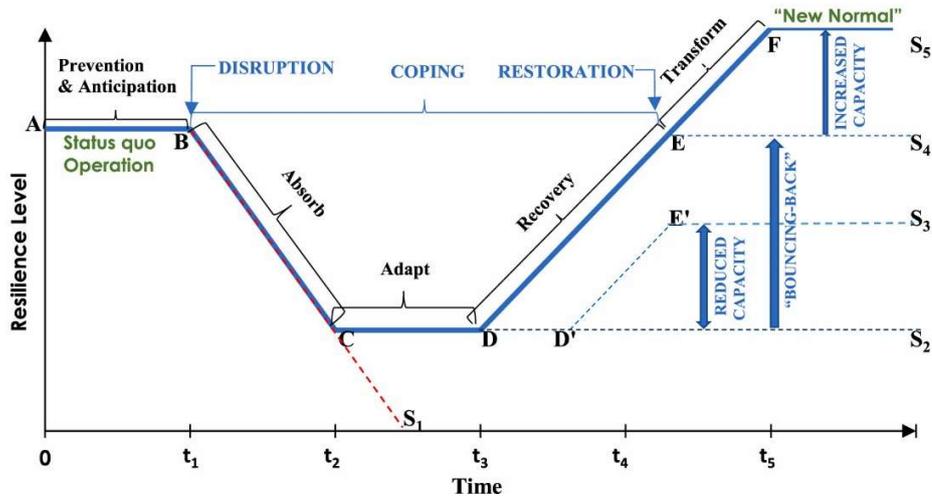


Figure 5-5. Représentation graphique de la « Résilience » (Mujjuni et al. 2021).

L'objectif serait de proposer une méthodologie d'évaluation de la résilience et une méthode quantitative pour la mesurer permettant de répondre aux objectifs recherchés par le décideur selon le type de perturbation considérée. Un premier travail est envisagé pour les services d'urgence avec mon collègue Guillaume Bouleux, chercheur HDR au DISP à l'INSA de Lyon.

J'ai développé des approches de pilotage pour toutes les périodes de perturbation : avant, pendant et après l'occurrence d'une perturbation. Ces approches ont été appliquées à des systèmes précis et pour chacune des périodes de façon indépendante. Pour certains de perturbations comme par exemple les embouteillages dans le problème de tournée des soignants (Marcon al. 2017b) ou l'indisponibilité d'une porte dans un hub de logistique (Walha et al. 2016) ce choix était justifié et les résultats étaient pertinents. Mais dans d'autres cas il faut prendre le cycle de la perturbation dans sa globalité, comme par exemple les pannes des machines qu'on doit anticiper (par exemple avec la maintenance préventive), on doit les préparer (préparer la logistique associée pour ne pas perdre de temps lors de réparation), on doit réagir vite pour ne pas immobiliser notre système de production et après on doit apprendre de la panne pour revoir toute notre stratégie. Les stratégies de type TPM (Total Productive Maintenance) (Pascal et al. 2019) ont fait leur preuve dans ce sens et ils ont évolué dans le contexte de l'industrie 4.0. J'envisage travailler sur des approches de type *Total Productive Resilience* (TPR) dans le même esprit que la TPM mais qui concerne le pilotage de notre système de production de biens et de services comme le montre la figure 5-6.

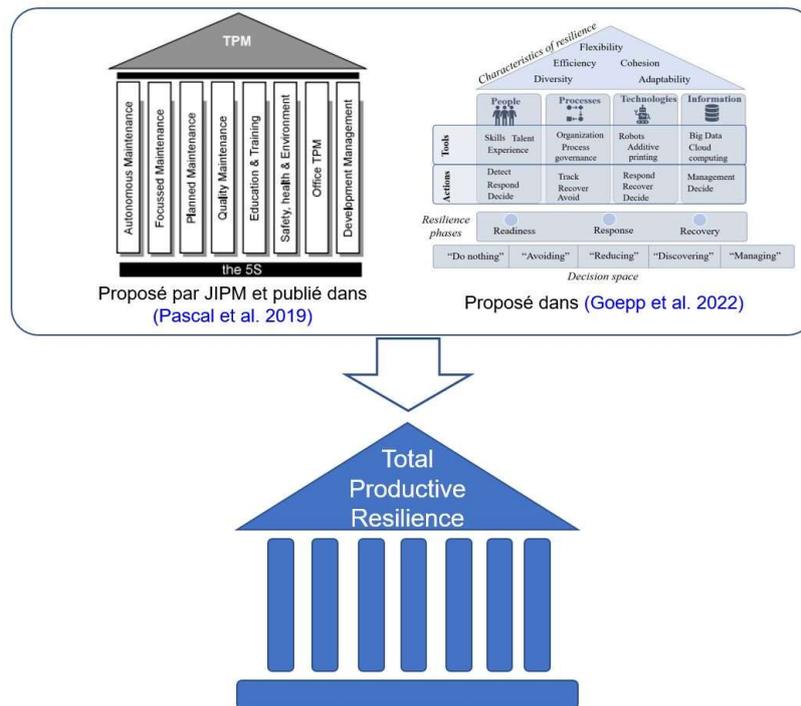


Figure 5-6. Vers une Total Productive Resilience.

D'autres part nous nous sommes intéressés aux perturbations fréquentes avec un faible impact sur le fonctionnement de système. J'envisage donc étendre ces travaux vers d'autres types de perturbations comme par exemple les situations de crises comme par exemple la COVID-19 qui a montré la fragilité de notre système de production et la logistique associée.

Lors du Workshop que j'ai organisé avec le DISP à l'INSA de Lyon le 05/07/2023 dans le cadre de l'action que je coordonne, j'ai identifié l'intérêt de concept de résilience pour les industriels (<https://gdr-macs.cnrs.fr/node/4463>). M. Vazrik Minassian, directeur associé de la société de conseil Be Resilient Group (BRG) (<https://www.beresilientgroup.com/qui-sommes-nous/presentation/>) spécialisée dans les métiers de résilience, a présenté les résultats de baromètre de la résilience. Ce baromètre est réalisé tous les ans avec des entreprises de toutes tailles (PME, PMI, ETI) de plusieurs secteurs (transports, banques, public...). Des responsables de la SNCF ont exprimé leur intérêt pour introduire ce concept non seulement en termes de méthodes ou d'outils mais en termes d'esprit de travail et de culture d'entreprise. Le sous-thème « Domaines d'application » trouve tout son intérêt. Je projette donc de proposer une ligne directrice qui va aider les industriels à introduire et caractériser la résilience et une méthodologie générique de conception des approches de pilotage, Stratégie TPR présentée plus haut, pour améliorer la résilience des systèmes et valider son application dans les différents domaines qui m'intéressent : milieu hospitalier, manufacturier et industrie 4.0.

Mon ambition est de rendre le thème : « Amélioration de la résilience des systèmes complexes soumis à des perturbations » mon thème central de recherche auquel j'attacherai mes travaux de recherche à court et moyen termes avec l'ambition d'avoir des collaborations internationales avec **Pr. D. McFarlane de l'Université de Cambridge** (<https://www.ifm.eng.cam.ac.uk/people/dm114/>). J'envisage animer un groupe de travail sur ce

thème dans mon laboratoire LAMIH CNR8201 en impliquant des collègues de différents départements :

- Département « Automatique » : le concept de la résilience est déjà présent dans les travaux des collègues pour les systèmes de transports et les systèmes humain-machine.
- Département « Informatique » : les approches de pilotage impliquent des techniques de recherche opérationnelle et d'intelligence artificielle qui sont des outils très utilisés par les collègues de ce département
- Département « Sciences de l'Homme et du Vivant » : j'ai toujours souhaité travailler avec des collègues ergonomes sur l'implication de l'humain dans les approches de pilotage et ce thème pourra nous permettre d'étudier l'apport de l'humain dans la résilience des système (un des piliers identifiés dans le *framework* présenté dans la figure 5-3).

Je vais détailler dans la suite les deux projets qui seront rattachés à ce thème.

### 5.3. Approches hybrides de pilotage combinant des techniques d'optimisation, de simulation et d'intelligence artificielle

Les systèmes complexes sont constitués de différents sous-systèmes qui sont eux-mêmes complexes et qui interagissent entre eux. L'occurrence d'une perturbation peut avoir un impact local dans un des sous-systèmes ou un impact plus global touchant les autres sous-systèmes. Nous abordons le projet d'hybridation des approches de pilotage selon ces deux types de perturbation :

- **Impact local** : Une hybridation pour des approches de pilotage d'un sous-système dans le cas où il est le seul impacté par une perturbation.
- **Propagation de l'impact de la perturbation** : Une hybridation dans le cas où l'impact de la perturbation se propage dans d'autres sous-systèmes.

#### 5.3.1. Hybridation locale

Dans les travaux menés dans le cadre de la thèse de M. F. Kadri (Kadri 2014), nous avons proposé un système d'aide à la décision pour la gestion proactive et le pilotage réactif (SAGEST) d'un service d'urgences. Nous avons développé chaque partie de ce système de façon indépendante couvrant chacune des périodes de la perturbation. J'ai commencé l'hybridation des approches de pilotage proactif et réactif des services d'urgence (Chaabane et Kadri 2021). Je souhaite m'investir dans le développement des systèmes comme SAGEST en proposant un système d'aide à la décision combinant toutes les périodes de perturbation. Je vais partir de la même architecture que SAGEST et explorer l'extension de cette architecture et le développement des outils associés, voir figure 5-7.

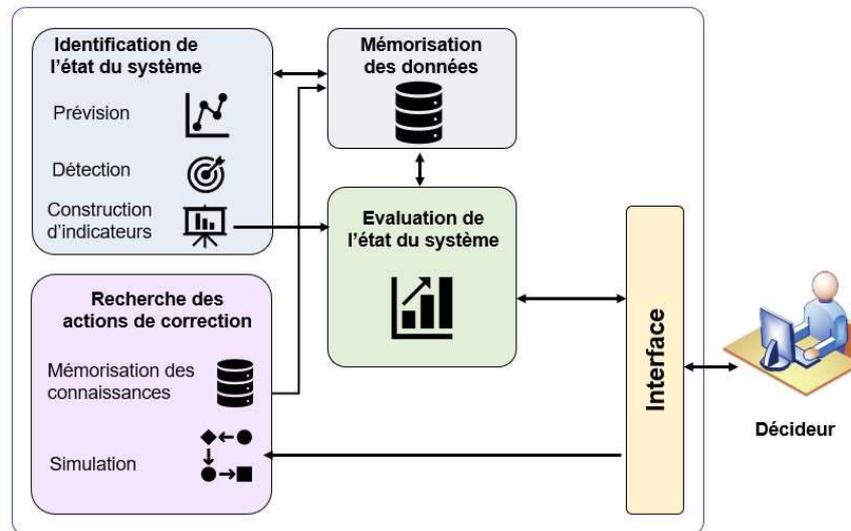


Figure 5-7. Architecture fonctionnelle de système d'aide à la décision pour le pilotage d'un système de production soumis à des perturbations.

L'architecture fonctionnelle du système d'aide à la décision pour le pilotage d'un système soumis à des perturbations comporte les fonctions suivantes :

- **Identification de l'état du système** : cette fonction permet de prédire l'état du système, de mettre en place des méthodes de détection des perturbations et de suivre l'évolution du système grâce aux indicateurs de performance. Des méthodes basées sur des techniques d'intelligence artificielle peuvent être envisagés dans cette fonction.
- **Recherche des actions correctives** : Cette fonction va permettre d'identifier, de tester et de mémoriser les actions que nous pourrons mettre en place pour gérer et répondre aux perturbations. Les outils d'optimisation et de simulation peuvent être utilisés dans cette partie permettant de simuler plusieurs stratégies de pilotage et de gestion des perturbations et d'évaluer leur impact sur les performances du système.
- **Evaluation** : Cette fonction est utilisée pour évaluer l'impact des actions correctives sur les performances de système. Des outils de type analyse multicritères et des interfaces sous forme de tableaux de bord peuvent être envisagés dans cette fonction.
- **Mémorisation des données** : Cette fonction assurera le stockage et la gestion des données et des informations collectées du systèmes pour une exploitation efficace. Des outils de Data – management peuvent être mis en place pour optimiser ce stockage et rendre la gestion plus efficace.

### 5.3.2. Hybridation dans le cas de propagation de l'effet d'une perturbation

L'impact d'une perturbation peut se propager dans le temps d'un sous-système à un autre sous-système. La figure 5-8 montre un exemple de propagation temporelle de l'impact d'une perturbation survenue dans un sous-système A sur le sous-système B.

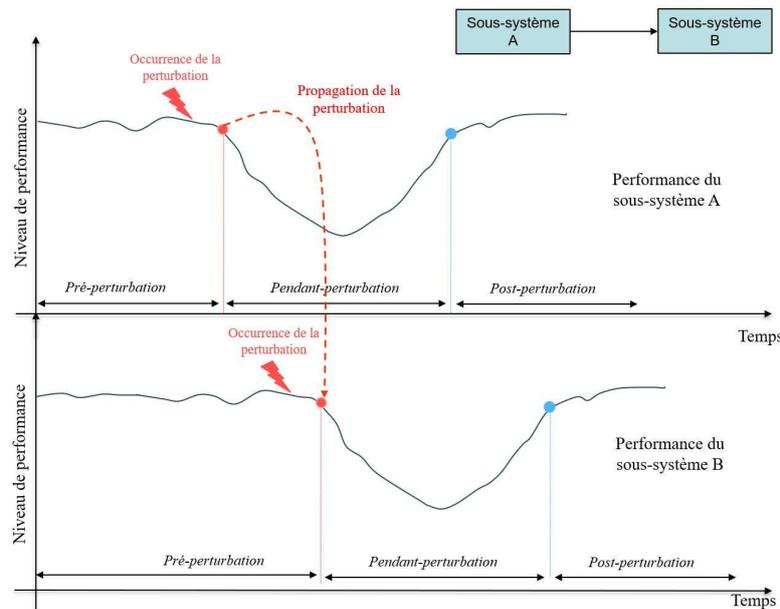


Figure 5-8. Propagation de l'impact d'une perturbation.

L'hybridation concerne les niveaux décisionnels. L'approche de pilotage doit combiner la réaction à la perturbation au niveau du sous-système A et anticiper son impact sur le sous-système B.

Nous avons identifié ce type de problématique dans le milieu hospitalier et plus précisément l'hôpital où le service d'urgence représente le sous-système A et les services d'hospitalisation (service aval) le sous-système B. Le service d'urgence est un des principaux points d'entrée d'un hôpital. Une partie de flux entrant sera orientée vers les services d'hospitalisation. Une augmentation de flux des patients dans les services d'urgence impactera les services aval. J'envisage de travailler sur le parcours patient afin de fluidifier les flux patients entre les services d'urgences et les services d'hospitalisation par une gestion des lits tirée par l'aval et une anticipation de la prise en charge des patients. L'objectif est de concevoir et de développer un outil de pilotage prédictif des séjours patients combinant la simulation, les techniques d'optimisation et les modèles de prédiction. Il s'agit (1) de définir et de bien caractériser les flux patients et leurs besoins en termes de prise en charge (Kadri et al. 2014), (2) de se projeter virtuellement dans un futur proche (quelques heures ou sur un horizon de travail significatif pour la gestion des lits) suite à l'arrivée d'un nouveau patient aux urgences avec une probabilité forte d'hospitalisation, (3) de tester virtuellement différents scénarii de gestion des lits et (4) d'anticiper les besoins de prise en charge et séjour dans les services aval (Mekhaldi et al. 2021).

## 5.4. Intégration de l'humain dans les approches de pilotage des systèmes

Nous avons présenté dans le chapitre un les concepts clés de nos travaux de recherche. La composante humaine a été identifiée comme élément clé de la décision. Dans les contributions réalisées je me suis limitée au rôle de décideur pour l'humain. Mais je suis consciente du rôle majeur de l'humain dans le contexte perturbé dans sa fonction de décideur mais aussi d'opérateur. Je souhaite faire évoluer mes thématiques de recherche vers l'intégration de l'humain dans les

approches de pilotage au-delà de son rôle de décideur. Cette intégration va s'orienter selon deux axes :

- 1- Apport des approches de coopération Humain-Machine en collaboration avec ma collègue Mme Marie-Pierre Pacaux, ingénieure de recherche HDR, département « Automatique » au LAMIH CNRS 8201.
- 2- Amélioration des conditions de travail des opérateurs dans un contexte perturbé en collaboration avec mes collègues Christophe Kolski, Professeur, Mme Sophie Lepreux, Maître de conférences, au département « Informatique » et Mme Eugénie Avril du département « Sciences de l'Homme et du vivant » au LAMIH CNRS 8201.

### 5.4.1. Apport des approches de la coopération Humain-Machine

Depuis février 2023, je suis impliquée dans le co-encadrement de la thèse de Mme Salma Nissoul sous la direction de Mme Marie-Pierre Pacaux. Le sujet de thèse porte sur l'Intégration Humains - Systèmes Cyber-Physique pour l'Industrie 4.0 : apport des approches de la coopération Humain-Machine. Même si je compte apporter mes compétences dans les méthodes et techniques d'optimisation et de simulation, ce thème est complètement nouveau pour moi et définit une nouvelle évolution dans mon parcours de recherche.

L'objectif de la thèse est de faire évoluer l'industrie par l'intégration de technologies plus autonomes et plus communicantes, tout en contrôlant cette intégration par l'implication de l'Humain aux différents stades de conception et de contrôle de ces systèmes. Cette thèse portera une attention particulière à la place de l'Humain dans ce nouveau contexte industriel, l'industrie centrée sur l'Humain étant l'un des trois principaux buts de l'Industrie 5.0 (Breque, De Nul, et Petridis 2021). Le projet ANR HUMANISM (HUMAN-MACHINES cooperation for flexible production Systems), terminé en 2021 et mené au LAMIH CNRS8201 a permis d'identifier la prise en compte des besoins qu'auront les opérateurs pour contrôler des systèmes de production complexes. Il s'agit donc d'étendre ces travaux et de profiter des nouvelles technologies, tout en maintenant l'Humain au centre de l'organisation et au contrôle de ces systèmes (*Human-in/on-the-loop ; individual/team situation awareness*). L'Humain est considéré comme étant l'élément clé de résilience du système manufacturier pour réagir aux situations anormales provoquées par des perturbations et des comportements émergents d'entités artificielles.

La thèse se focalisera sur l'intégration conjointe des compétences et capacités de l'Humain et des entités artificielles au sein d'un système manufacturier « intelligent » développé au LAMIH.

Je suis impliquée dans le projet ANR ETHICS40 : **Management des risques éthiques dans l'Industrie du Futur**, qui a démarré en septembre 2023. Je projette de travailler sur les aspects éthiques dans les approches de pilotage et l'intégration de l'humain dans le contrôle de la performance selon la même vision abordée dans les travaux récents de (Berrah et al. 2021b; Jimenez et al. 2022). Ma contribution sera également dans l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle et les hybridations envisagées dans le projet présenté dans la section 5.3 et le rôle de l'humain selon les questions éthiques.

### 5.4.2. Amélioration des conditions de travail des opérateurs dans un contexte perturbé

Je veux m'investir dans le développement de ce thème à titre personnel afin d'apporter des réponses aux problématiques liées aux conditions de travail et au bien-être des opérateurs. En 2018, j'étais sollicitée par M. Jérôme Mardelé, responsable de service Ergonomie à Toyota pour travailler sur la problématique de prévention des troubles musculosquelettiques chez les opérateurs dans l'industrie automobile. J'ai co-encadré avec ma collègue Ioana Bilegan, des projets d'élèves ingénieurs visant à concevoir et développer un outil d'affectation des tâches aux opérateurs en tenant compte des contraintes ergonomiques des postes de travail. Nous avons proposé une heuristique pour répondre à ce problème. Je souhaite reprendre et étendre ce travail en intégrant d'une part une méthode d'évaluation de l'ergonomie de poste prenant en compte les mesures ergonomiques objectives. Pour cela je souhaite travailler avec ma collègue Eugénie Avril, maître de conférences et chercheur psycho-ergonome au LAMIH CNRS8201. D'autre part, je souhaite développer une approche d'optimisation garantissant des solutions de meilleure qualité que celle de l'heuristique avec des approches de recherche opérationnelle plus performantes. Des possibilités de collaboration ont été discuté avec mon collègue José Jimenez ([Forero Velasco et al. 2022](#)).

Le second projet concernera la réalisation d'un *Serious Game* utilisant la table interactive permettant de réaliser des simulations et des jeux de rôle des différents types d'opérateurs (système manufacturier) ou soignant (système hospitalier) leur permettant de se projeter dans leur environnement de travail. L'idée est de réaliser des scénarios permettant de tester les différentes situations de travail y compris les situations impliquant des perturbations. Ce travail sera l'extension de travail présenté dans nos récentes publications dans le contexte d'industrie 4.0 ([Vispi et al. 2021](#)) et dans le milieu hospitalier ([Lebrun et al. 2022](#)). Ce projet sera dans la continuité de projet SG-HANDI qui s'est intéressé à la proposition d'un *serious game* pour sensibiliser à l'intégration, à la prévention de la désinsertion professionnelle et au maintien dans l'emploi des personnes en situation de handicap ([Mourali et al. 2023a, 2023b; 2023c](#)).

## 5.5. Feuille de route

Je souhaite développer les trois projets présentés dans les sections précédentes en collaboration avec des collègues de mon laboratoire LAMIH CNRS 8201 et des laboratoires présentés dans le chapitre 4. Sans chercher à être exhaustive, je présente dans la figure 5-9 ma feuille de route temporelle.

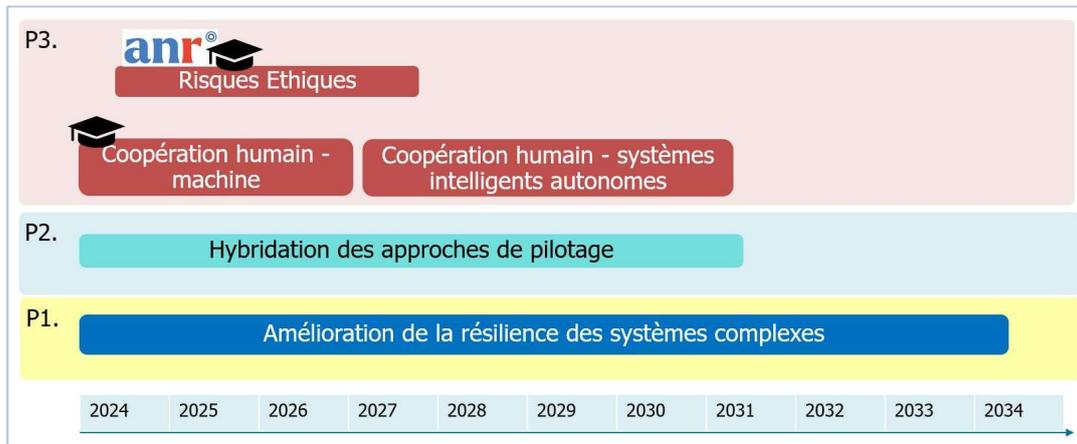


Figure 5-9. Répartition dans le temps des perspectives de recherche.

Le premier projet constituera notre thème principal sur lequel se basera les autres projets. Une thèse a démarré sur le thème de la coopération humain-machine et qui va permettre d’aborder le volet humain dans mes travaux de recherche. Le projet ANR ETHICS40 : Management des risques éthiques dans l’Industrie du Futur abordera les sujets identifiés dans le projet 3 avec une co-encadrement d’une thèse qui débutera en septembre 2024. Le projet 2 est une suite logique des travaux menés sur les approches de pilotage qui aura pour objectifs de prendre en compte de nouveaux types de perturbations et d’utiliser de nouvelles méthodes et techniques de résolution.

La figure 5-10 présente mes objectifs de dépôts de projets et de délégations en adéquation avec les projets de recherche envisagés.

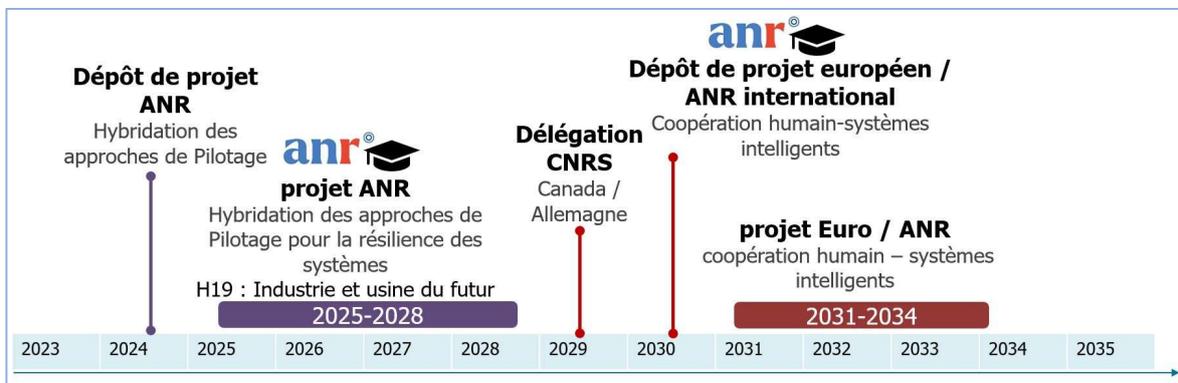


Figure 5-10. Perspectives de dépôts de projets.

Le premier dépôt de projet concerne l’hybridation des approches de pilotage pour la résilience des systèmes sociotechniques soumis à des perturbations. Un projet de thèse sera adossé au projet pour concevoir et développer une approche de pilotage réactif et proactif basée sur des méthodes et des techniques d’optimisation, de simulation et d’intelligence artificiel. Les partenaires impliqués seront : IMT d’Albi apportant toutes ses compétences sur le thème de jumeau numérique, CIC-IT Lille contribuant par leur démarche d’ergonomes aux phases de conception centrées utilisateurs.

Plus tard, je projette de partir en délégation CNRS à l’étranger pour monter un projet européen sur les travaux menés sur le thème de la coopération humains- systèmes intelligents. Ce

projet sera la suite de mes travaux sur ce nouveau thème que je souhaite développer les années à venir.

## **5.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté trois principaux projets de recherche : Amélioration de la résilience des systèmes complexes soumis à des perturbations, approches hybrides de pilotage et intégration de l'humain dans les approches de pilotage. La conception des approches sera suivie de développement et d'expérimentations des approches dans un cadre réel dans différents domaines applicatifs : l'hospitalier, le manufacturier et la technologie dans le contexte de l'industrie 4.0. Ces expérimentations permettront de vérifier et valider les approches proposées. Notre démarche vise à renforcer les collaborations Recherche-Industrie pour apporter des réponses à des problématiques réelles.

## **Conclusion générale**

Ma vie professionnelle a connu des moments de flottement mais tout comme mon thème de recherche j'ai su faire preuve de résilience face aux imprévues rencontrées pendant ma carrière comme l'abandon des thèses ou le non aboutissement des projets de recherche.

Mes activités d'enseignement ont été axées sur le domaine du Génie Industriel. Ce domaine m'a toujours passionné et j'ai su transmettre cette passion à certains de mes élèves ingénieurs qui s'épanouissent dans leurs vies professionnelles. J'ai beaucoup travaillé sur la passerelle entre la recherche et l'ingénierie, étant moi-même ingénieure. Je trouve que ces deux mondes doivent se croiser pour contribuer à l'amélioration de notre industrie et aussi notre vie au quotidien. La complémentarité entre l'ingénierie et la recherche est nécessaire pour évoluer dans le monde actuel. J'ai défini aussi le lien qu'il doit y avoir entre nos formations d'ingénieurs, nos laboratoires de recherche et nos industries. Ce lien doit être structuré, renforcé et accompagné pour en tirer profit de cette synergie qui va permettre d'améliorer la résilience de nos systèmes sociotechniques, d'apporter de la matière à nos élèves ingénieurs et de renforcer le cadre applicatif des concepts de la recherche.

Mes activités de recherche ont connu une évolution intéressante où j'ai débuté par la définition des problèmes d'optimisation et leur résolution dans un domaine original qui est le domaine hospitalier où j'ai porté la blouse des médecins pour soigner le système de production de soins de ses maux organisationnels. J'ai pu montrer l'apport de la recherche et de l'ingénierie à des problématiques d'ordonnancement, de dimensionnement ou d'allocation de ressources dans les hôpitaux. Cette expérience a permis de mettre la lumière sur des nouvelles contraintes apportées par la présence humaine dans ce domaine que ce soit les soignants ou les patients.

Mes travaux ont évolué vers la prise de décision dans un contexte perturbé où l'apport ne concerne pas seulement les contraintes mais aussi les approches développées et les outils de résolution utilisés. J'ai su identifier le problème de pilotage, les perturbations auxquelles le système de production doit faire face et les méthodes de résolution les plus adaptées. Ainsi j'ai travaillé dans le cadre d'un thème plus global qui est la prise de décision en milieu incertain. Je me suis intéressée aux problèmes de pilotage des systèmes de production soumis à des perturbations opérationnelles fréquentes. Ces perturbations causent des situations qui ne sont pas traitées de la même façon que les situations normales où les moyens sont suffisants pour y faire face ou les situations de crises où des moyens exceptionnels sont mis en œuvre pour y répondre. C'est dans de telles conditions qu'un pilotage adapté trouve tout son intérêt sans forcément augmenter les moyens physiques. Les approches proposées ont également évolué avec de plus en plus de couplage de techniques et de méthodes de résolution (Optimisation, simulation et intelligence artificielle) profitant des complémentarités et des avantages des méthodes.

Suite à ces travaux j'ai identifié mon thème de recherche centré sur la résilience des systèmes complexes et plus précisément les systèmes de production de biens et de services et la logistique. Comme je l'ai montré dans les différents chapitres le concept de résilience a toute sa place dans les problèmes de pilotage des systèmes soumis à des perturbations. Mais beaucoup de perspectives doivent être explorées autour de la définition et de l'évaluation de la résilience et l'accompagnement des industriels pour sa mise en œuvre. L'identification des problèmes et les méthodes de résolution vont être étudiées afin d'avoir une ligne directrice pour la prise en compte de ces problèmes dans un contexte où la perturbation est devenue la norme et où les technologies évoluent rapidement provoquant de nouveaux risques et offrant des nouvelles perspectives. Ce travail sera réalisé dans l'idée de trio formation-recherche-industrie pour permettre d'avoir des réponses innovantes et créatives.



## Bibliographie

- Abdoune, Farah, Lorenzo Ragazzini, Maroua Nouiri, Elisa Negri, et Olivier Cardin. 2023. « Toward Digital twin for sustainable manufacturing: A data-driven approach for energy consumption behavior model generation ». *Computers in Industry* 150 (septembre): 103949. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103949>.
- Adeli, H. 2003. *Expert Systems in Construction and Structural Engineering*. CRC Press.
- Aini, M.S, et A. Fakhrol-Razi. 2010. « Development of socio-technical disaster model ». *Safety Science* 48 (10): 1286-95.
- Alberts, David S., et Richard E. Hayes. 2003. *Power to the Edge: Command, Control in the Information Age*. Information Age Transformation Series. Washington, DC: CCRP Publication Series.
- Aldea, Adina, Egle Vaicekauskaitė, Maya Daneva, et Jean Paul Sebastian Piest. 2020. « Assessing Resilience in Enterprise Architecture: A Systematic Review ». *IEEE 24th International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC)*, 1-10. Eindhoven, Netherlands: IEEE. <https://doi.org/10.1109/EDOC49727.2020.00011>.
- Alon, Ilan, Min Qi, et Robert J. Sadowski. 2001. « Forecasting aggregate retail sales: a comparison of artificial neural networks and traditional methods ». *Journal of Retailing and Consumer Services* 8 (3): 147-56. [https://doi.org/10.1016/S0969-6989\(00\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S0969-6989(00)00011-4).
- Amraoui, Adnen, Slim Harbi, et Ahmed Nait Sidi Moh. 2022. « Home Health Care Scheduling Problem Under Uncertainty: Robust Optimization Approaches ». *Computing and Informatics* 41 (avril): 288-308. [https://doi.org/10.31577/cai\\_2022\\_1\\_288](https://doi.org/10.31577/cai_2022_1_288).
- Arunraj, Nari Sivanandam, et Diane Ahrens. 2015. « A Hybrid Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average and Quantile Regression for Daily Food Sales Forecasting ». *International Journal of Production Economics* 170 (décembre): 321-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.09.039>.
- Attajer, Ali. 2023. « Conception et développement d'une architecture de pilotage distribué pour améliorer la résilience opérationnelle dans les systèmes cyber-physiques de production ». Maroc : Université Polytechnique Hauts-de-France et Université Hassan Premier.
- Attajer, Ali, Sondes Chaabane, Saber Darmoul, Yves Sallez, et Fouad Riane. 2022a. « Evaluation of Operational Resilience in Cyber-Physical Production Systems: Literature Review ». *IFAC-PapersOnLine*, 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2022, 55 (10): 2264-69. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.045>.
- Attajer, Ali, Saber Darmoul, Sondes Chaabane, Yves Sallez, et Fouad Riane. 2022b. « An Analytic Hierarchy Process Augmented with Expert Rules for Product Driven Control in Cyber-Physical Manufacturing Systems ». *Computers in Industry* 143 (décembre): 103742. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103742>.
- Attajer A., Darmoul S., Chaabane S., Riane F., Sallez Y. (2021). Benchmarking Simulation Software Capabilities Against Distributed Control Requirements: FlexSim Vs AnyLogic. In *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, édité par Borangiu T., Trentesaux D., Leitão P., Cardin O., Lamouri, 952, Studies in Computational Intelligence, Springer, Paris, France, mars. [DOI=10.1007/978-3-030-69373-2\_38].

- Azad, Nader, Elkafi Hassini, et Manish Verma. 2016. « Disruption Risk Management in Railroad Networks: An Optimization-Based Methodology and a Case Study ». *Transportation Research Part B: Methodological* 85 (mars): 70-88. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.01.001>.
- Balasko, B., Z. Banko, et J. Abonyi. 2007. « Analyzing trends by symbolic episode representation and sequence alignment ». *Mediterranean Conference on Control Automation, 2007. MED '07*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/MED.2007.4433862>.
- Ballot, Eric, Benoit Montreuil, et Collin Thivierge. 2012. « Functional Design of Physical Internet Facilities: A Road-rail Hub ». *Progress in Material Handling Research: 2012*, janvier. [https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr\\_2012/13](https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr_2012/13).
- Bargetto, Roberto, Thierry Garaix, et Xiaolan Xie. 2023. « A branch-and-price-and-cut algorithm for operating room scheduling under human resource constraints ». *Computers & Operations Research* 152 (avril): 106136. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106136>.
- Behdani, Behzad, Zofia Lukszo, et Rajagopalan Srinivasan. 2019. « Agent-Oriented Simulation Framework for Handling Disruptions in Chemical Supply Chains ». *Computers & Chemical Engineering*, 122 (octobre), pp. 306-325. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.09.027>.
- Behzadi, Golnar, Michael Justin O'Sullivan, Tava Lennon Olsen, Frank Scrimgeour, et Abraham Zhang. 2017. « Robust and Resilient Strategies for Managing Supply Disruptions in an Agribusiness Supply Chain ». *International Journal of Production Economics* 191 (septembre): 207-20. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.06.018>.
- Békaert, J., G. Masclet, et R. Caron. 2011. « Les instruments de mesure de la résilience chez les adolescents ayant été confrontés à un traumatisme : une revue de la littérature ». *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique* 169 (8): 510-16.
- Ben Ida, Imen, Moez Balti, Sondes Chaabane, et Abderrazak Jemai. 2021. « Adaptive Vital Signs Monitoring System Based on the Early Warning Score Approach in Smart Hospital Context ». *IET Smart Cities* 3 (1): 16-28. <https://doi.org/10.1049/smc2.12004>.
- Benbelkacem S., Kadri F., Atmani B., Chaabane S. (2019). « Machine Learning for Emergency Department Management ». *International Journal of Information Systems in the Service Sector (IJSSS)*, 11 (3), pp. 19-36
- Berdal, Quentin, Marie-Pierre Pacaux-Lemoine, Thérèse Bonte, Damien Trentesaux, et Christine Chauvin. 2020. « A Benchmarking Platform for Human-Machine Cooperation in Cyber-Physical Manufacturing Systems ». *Studies in Computational Intelligence* 952 (octobre): 313-26. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2_22).
- Berrah, Lamia. 2002. *L'indicateur de performance, concepts et applications*. Toulouse: Editions Cépaduès.
- Berrah, Lamia. 2013. « La quantification de la performance dans les entreprises manufacturières: de la déclaration des objectifs à la définition des systèmes d'indicateurs ». Habilitation à diriger des recherches, Université de Savoie.
- Berrah, Lamia, Vincent Cliville, Damien Trentesaux, et Claude Chapel. 2021a. « Industrial Performance: An Evolution Incorporating Ethics in the Context of Industry 4.0 ». *Sustainability* 13 (16): 9209. <https://doi.org/10.3390/su13169209>.
- Berrah, Lamia, Vincent Cliville, Damien Trentesaux, et Claude Chapel. 2021b. « Industrial Performance: An Evolution Incorporating Ethics in the Context of Industry 4.0 ». *Sustainability* 13 (16): 9209. <https://doi.org/10.3390/su13169209>.
- Bhowal, Prodip, Dipankar Sarkar, Siddhartha Mukhopadhyay, et Anupam Basu. 2007. « Fault diagnosis in discrete time hybrid systems – A case study ». *Information Sciences, Including: The 3rd*

- International Workshop on Computational Intelligence in Economics and Finance (CIEF'2003), 177 (5): 1290-1308. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.08.004>.
- Billaut, J.-C., A. Moukrim, et E. Sanlaville. 2005. *Flexibilité et Robustesse en Ordonnancement*. Hermès.
- Boes, Jérémy, et Frédéric Migeon. 2017. « Self-Organizing Multi-Agent Systems for the Control of Complex Systems ». *Journal of Systems and Software* 134 (décembre): 12-28. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.08.038>.
- Bonvoisin, F., S. Chaabane, B. Valli, et C. Tahon. 2011. « Vers un outil d'aide à la décision pour la gestion des blocs opératoires basé sur les indicateurs de performance ». *12ème congrès de la société Française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision, ROADEF'2011*, Saint-Etienne, France, mars.
- Bonvoisin, Frédéric. 2011. « Evaluation de la performance des blocs opératoires: du modèle aux indicateurs ». Thèse, Valenciennes, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis. <https://theses.hal.science/tel-00626150/document>.
- Bornschlegell, AS, J. Pellé, S. Harmand, A. Bekrar, S. Chaabane, et D. Trentesaux. 2011. « Thermal optimization of a single inlet T-junction ». *International Journal of Thermal Sciences*, 53, pp. 108-118.
- Box, George E. P., et Gwilym M. Jenkins. 1976. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day.
- Bradley, James R. 2014. « An Improved Method for Managing Catastrophic Supply Chain Disruptions ». *Business Horizons* 57 (4): 483-95. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2014.03.003>.
- Breque, Maija, Lars De Nul, et Athanasios Petridis. 2021. *Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human Centric and Resilient European Industry*. LU: Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>.
- Brewer, Ross. 2015. « Cyber Threats: Reducing the Time to Detection and Response ». *Network Security* 2015 (5): 5-8. [https://doi.org/10.1016/S1353-4858\(15\)30037-4](https://doi.org/10.1016/S1353-4858(15)30037-4).
- Bromiley, Philip, Michael McShane, Anil Nair, et Elzotbek Rustambekov. 2015. « Enterprise Risk Management: Review, Critique, and Research Directions ». *Long Range Planning* 48 (août): 265-76. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2014.07.005>.
- Caputo, Antonio C., Pacifico M. Pelagagge, et Paolo Salini. 2019. « A methodology to estimate resilience of manufacturing plants ». *IFAC-PapersOnLine* 52 (13): 808-13. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.229>.
- Cardin, Olivier. 2019. « Classification of cyber-physical production systems applications: Proposition of an analysis framework ». *Computers in Industry* 104 (janvier): 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.10.002>.
- Cardin, Olivier, William Derigent, et Damien Trentesaux. 2022a. *Digitalization and Control of Industrial Cyber-Physical Systems Concepts, Technologies and Applications*. Wiley. ISTE. <https://www.iste.co.uk/book.php?id=1891>.
- Cardin, Olivier, William Derigent, et Damien Trentesaux. 2022b. « Holonic Control Architectures ». In *Digitalization and Control of Industrial Cyber-Physical Systems Concepts, Technologies and Applications*, 135. ISTE - Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119987420.ch8>.
- Cardin, Olivier, Damien Trentesaux, André Thomas, Pierre Castagna, Thierry Berger, et Hind Bril El-Haouzi. 2017. « Coupling Predictive Scheduling and Reactive Control in Manufacturing Hybrid Control Architectures: State of the Art and Future Challenges ». *Journal of Intelligent Manufacturing* 28 (7): 1503-17. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1139-0>.

- Carpenter, Steve, Brian Walker, J. Marty Anderies, et Nick Abel. 2001a. « From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? » *Ecosystems* 4 (8): 765-81. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9>.
- Chaabane S., Cousein E., Wieser P. (2022). Healthcare Systems: Challenges and Opportunities. John Wiley & Sons, ISBN 9781786307996.
- Chaabane S., Cousein E., Wieser P. (2022). Systèmes de soins et de santé : Défis d'aujourd'hui et opportunités de demain. ISTE Editions, ISBN 9781784058678.
- Chaabane, S., A. Guinet, N. Smolski, M. Guiraud, B. Luquet, E. Marcon, et J.P. Viale. 2003. « La gestion industrielle et la gestion des blocs opératoires ». *Annales françaises d'anesthésie et de réanimation* 22 (10): 904-8.
- Chaabane, S., et F. Kadri. 2021. « Toward a Proactive and Reactive Simulation-Based Emergency Department Control System to Cope with Strain Situations ». In *Operational Research and Simulation in Healthcare*, 121-45. Springer International Publishing. <https://uphf.hal.science/hal-03405412>.
- Chaabane, S., N. Meskens, A. Guinet, et M. Laurent. 2006. « Comparison of two methods of operating theatre planning: application in Belgian hospital ». In *Service Systems and Service Management, 2006 International Conference on*, 1:386-92.
- Chaabane, S., N. Meskens, A. Guinet, et M. Laurent. 2008. « Comparison of two methods of operating theatre planning: Application in Belgian Hospital ». *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 17 (2): 171-86.
- Chaabane, Sondes, et Alain Guinet. 2004. « Une approche hiérarchique d'aide à la décision pour la gestion des blocs opératoires ». *Logistique & Management* 12 (sup1): 79-92. <https://doi.org/10.1080/12507970.2004.11516821>.
- Chaabane, Sondes, Marius Laurent, Alain Guinet, et Nadine Meskens. 2007. « Comparaison des performances des politiques de programmation opératoire ». *Logistique & Management* 15 (1): 17-26.
- Chaabane, Sondes, et Damien Trentesaux. 2019. « Coping with disruptions in complex systems: a framework ». *IFAC-PapersOnLine* 52 (13): 2413-18. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.568>.
- Chaari, Tarek. 2010. « Un algorithme génétique pour l'ordonnancement robuste: application au problème du flow shop hybride. » Thèse, Valenciennes, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- Chaari, Tarek, Sondès Chaabane, Nassima Aissani, et Damien Trentesaux. 2014. « Scheduling under uncertainty: Survey and research directions ». *2014 International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, 229-34. <https://doi.org/10.1109/ICAdLT.2014.6866316>.
- Chaari, Tarek, Sondes Chaabane, Taicir Moalla Loukil, et Damien Trentesaux. 2011. « A genetic algorithm for robust hybrid flow shop scheduling ». *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 24 (9): 821-33.
- Chang, Qing, Jianbo Liu, Guoxian Xiao, et Stephan Biller. 2012. « The Costs of Downtime Incidents in Serial Multi-Stage Manufacturing Systems ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 134 (avril): 021016. <https://doi.org/10.1115/1.4005789>.
- Chargui, Tarik, Abdelghani Bekrar, Mohamed Reghioui, et Damien Trentesaux. 2019. « Multi-Objective Sustainable Truck Scheduling in a Rail-Road Physical Internet Cross-Docking Hub Considering Energy Consumption ». *Sustainability* 11 (11): 3127. <https://doi.org/10.3390/su11113127>.
- 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.

- Chen, Chih-Ming, Chia-Wen Lin, et Yung-Chang Chen. 2007. « Adaptive error-resilience transcoding using prioritized intra-refresh for video multicast over wireless networks ». *Signal Processing: Image Communication* 22 (3): 277-97.
- Chimeh, Mozhgan K., et Paul Richmond. 2018. « Simulating Heterogeneous Behaviours in Complex Systems on GPUs ». *Simulation Modelling Practice and Theory* 83 (avril): 3-17. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.02.002>.
- Chiva, Ricardo, Pervez Ghauri, et Joaquim Alegre. 2014. « Organizational Learning, Innovation and Internationalization: A Complex System Model. » *British Journal of Management* 25 (4): 687-705.
- Cimellaro, Gian Paolo, Andrei M. Reinhorn, et Michel Bruneau. 2010. « Framework for analytical quantification of disaster resilience ». *Engineering Structures* 32 (11): 3639-49.
- Clemens, Marshall. 2019. « Visualizing complex systems science (CSS) », 2019. <https://necsi.edu/visualizing-complex-systems-science>.
- Clément, Antoine, F. Marmier, D. Kamissoko, D. Gourc, Liên wioland, Virginie Govaere, et Julien Cegarra. 2018. « Robustesse, résilience : une brève synthèse des définitions au travers d'une analyse structurée de la littérature ». MOSIM'18 - 12ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation, Toulouse.
- Cowling, Peter, Djamila Ouelhadj, et Sanja Petrovic. 2004. « Dynamic Scheduling of Steel Casting and Milling using Multi-agents ». *Production Planning and Control* 15 (mars). <https://doi.org/10.1080/09537280410001662466>.
- Cox, Andrew, Fynnwin Prager, et Adam Rose. 2011. « Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics ». *Transport Policy* 18 (2): 307-17.
- Dai, Xuewu, et Zhiwei Gao. 2013. « From Model, Signal to Knowledge: A Data-Driven Perspective of Fault Detection and Diagnosis ». *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 9 (4): 2226-38. <https://doi.org/10.1109/TII.2013.2243743>.
- Davenport, A., et J. Beck. 2000. « A survey of techniques for scheduling with uncertainty ». online paper: <https://tidel.mie.utoronto.ca/pubs/uncertainty-survey.pdf>
- Davidson, Julie L., Chris Jacobson, Anna Lyth, Aysin Dedekorkut-Howes, Claudia L. Baldwin, Joanna C. Ellison, Neil J. Holbrook, et al. 2016. « Interrogating Resilience: Toward a Typology to Improve Its Operationalization ». *Ecology and Society* 21 (2): art27. <https://doi.org/10.5751/ES-08450-210227>.
- Derigent, William, Olivier Cardin, et Damien Trentesaux. 2021. « Industry 4.0: Contributions of Holonic Manufacturing Control Architectures and Future Challenges ». *Journal of Intelligent Manufacturing* 32 (7): 1797-1818. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01532-x>.
- Derigent, William, Michael David, Pascal André, et Olivier Cardin. 2022. « Generic Aggregation Model for Reconfigurable Holonic Control Architecture – The GARCIA Framework ». In *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, édité par Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitão, P. SOHOMA 2022. Studies in Computational Intelligence, vol 1083. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24291-5\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24291-5_32).
- Dessevre, Guillaume, Cléa Martinez, Liwen Zhang, Christophe Bortolaso, et Franck Fontanili. 2023. « The Centralization and Sharing of Information for Improving a Resilient Approach Based on Decision-Making at a Local Home Health Care Center ». *Applied Sciences* 13 (15): 8576. <https://doi.org/10.3390/app13158576>.
- Dewa, Mncedisi, Andre Van der Merwe, et Stephen Matope. 2020. « Production scheduling heuristics for frequent Load-shedding scenarios: A knowledge Engineering approach ». *South African Journal of Industrial Engineering* 31 (novembre): 110-21. <https://doi.org/10.7166/31-3-2422>.

- Dolgui, Alexandre, Dmitry Ivanov, et Boris Sokolov. 2018. « Ripple Effect in the Supply Chain: An Analysis and Recent Literature ». *International Journal of Production Research* 56 (1-2): 414-30. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1387680>.
- Dreyer, Heidi C., Natalia Swahn, Kasper Kiil, Jan Ola Strandhagen, et Anita Romsdal. 2015. « The Responsiveness of Food Retail Supply Chains: A Norwegian Case Study ». In *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth*, édité par Shigeki Umeda, Masaru Nakano, Hajime Mizuyama, Nironori Hibino, Dimitris Kiritsis, et Gregor von Cieminski, 152-60. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-22756-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-22756-6_19).
- Dupas, Rémy, Jean-Christophe Deschamps, Eiichi Taniguchi, Ali Gul Qureshi, et Tiente Hsu. 2023. « Optimizing the location selection of urban consolidation centers with sustainability considerations in the city of Bordeaux ». *Research in Transportation Business & Management* 47 (mars): 100943. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100943>.
- Egri, Péter, Dávid Gyulai, Botond Kádár, et László Monostori. 2016. « Production Planning on Supply Network and Plant Levels: The RobustPlaNet Approach ». *ERCIM NEWS* 105: 14-15.
- Endsley, Mica R. 1995. « Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems ». *HUMAN FACTORS* 37 (1): 32-64.
- Enjalbert, Simon, Suzana Kahn Ribeiro, et Frédéric Vanderhaegen. 2020. « Concepts and Models about Smart Urban Transport Control Systems for City Resilience ». *IFAC-PapersOnLine*, 53 (2), pp.10090-10095. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2732>.
- Essghaier, Fatma, Tarik Chargui, Tiente Hsu, Abdelghani Bekrar, Hamid Allaoui, Damien Trentesaux, et Gilles Goncalves. 2023. « Fuzzy multi-objective truck scheduling in multi-modal rail-road Physical Internet hubs ». *Computers & Industrial Engineering* 182 (août): 109404. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109404>.
- Farid, Amro M. 2015. « Static Resilience of Large Flexible Engineering Systems: Axiomatic Design Model and Measures ». *IEEE Systems Journal* 11 (4): 2006-17. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2428284>.
- Feenstra, Philippus J., Pieter J. Mosterman, Gautam Biswas, et Peter C. Breedveld. 2001. *Bond Graph Modeling Procedures for Fault Detection and Isolation of Complex Flow Processes*.
- Fiksel, Joseph. 2003. « Designing Resilient, Sustainable Systems ». *Environmental Science & Technology* 37 (23): 5330-39.
- Forero Velasco, Laura Stefannia, Pablo Emilio Rodríguez Revilla, Laura Valentina Ruiz Rodríguez, María Paz Santa Hincapié, Luis A. Saavedra-Robinson, et Jose-Fernando Jiménez. 2022. « A human-centred workstation in industry 4.0 for balancing the industrial productivity and human well-being ». *International Journal of Industrial Ergonomics* 91 (septembre): 103355. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2022.103355>.
- Galaske, Nadia, et Reiner Anderl. 2016. « Disruption Management for Resilient Processes in Cyber-physical Production Systems ». *Procedia CIRP* 50: 442-47. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.144>.
- Goepp, Virginie, Lamia Berrah, et Emmanuel Caillaud. 2024. « A Literature Review on Resilience Approaches in the Industry 4.0 Context ». In *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, édité par Theodor Borangiu, Damien Trentesaux, Paulo Leitão, Lamia Berrah, et Jose-Fernando Jimenez, 547-58. *Studies in Computational Intelligence*. Cham: Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-53445-4\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-031-53445-4_45).

- Goepf, Virginie, Lamia Berrah, Emna Drira, et Sondes Chaabane. 2022. « Towards a Framework to Position Resilience and Industry 4.0 ». *IFAC-PapersOnLine*, 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2022, 55 (10): 2258-63. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.044>.
- Gu, Xi, Xiaoning Jin, Jun Ni, et Yoram Koren. 2015. « Manufacturing system design for resilience ». *Procedia CIRP* 36: 135-40. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.075>.
- Guinet, A., et S. Chaabane. 2003. « Operating theatre planning ». *International Journal of Production Economics* 85 (1): 69-81.
- Guizzi, Guido, Silvestro Vespoli, Andrea Grassi, et Liberatina Carmela Santillo. 2020. « Simulation-Based Performance Assessment of a New Job-Shop Dispatching Rule for the Semi-Heterarchical Industry 4.0 Architecture ». *Proceedings - Winter Simulation Conference 2020-December* (décembre): 1664-75. <https://doi.org/10.1109/WSC48552.2020.9383981>.
- Hamadmad, Hakam. 2017. « Définition d'une expression temporelle de la performance des entreprises manufacturières ». Thèse, Grenoble, Université Grenoble - Alpes. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01496298>.
- Harrou, Fouzi, Farid Kadri, Sondes Chaabane, Christian Tahon, et Ying Sun. 2015. « Improved principal component analysis for anomaly detection: Application to an emergency department ». *Computers & Industrial Engineering* 88 (octobre): 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.06.020>.
- He, Wei, D. Sun, et W. Liao. 2013. « Applying Novel Clone Immune Algorithm to Solve Flexible Job Shop Problem with Machine Breakdown ». *Journal of Information and Computational Science* 10 (juin): 2783-97. <https://doi.org/10.12733/jics20101851>.
- He, Zhenglei, Kim Phuc Tran, Sebastien Thomassey, Xianyi Zeng, Jie Xu, et Changhai Yi. 2022. « Multi-objective optimization of the textile manufacturing process using deep-Q-network based multi-agent reinforcement learning ». *Journal of Manufacturing Systems* 62 (janvier): 939-49. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.017>.
- Hetu, Seth N., Samarth Gupta, Vinh-An Vu, et Gary Tan. 2018. « A Simulation Framework for Crisis Management: Design and Use ». *Simulation Modelling Practice and Theory* 85 (juin): 15-32. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.03.001>.
- Ho, William, et Xin Ma. 2018. « The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process ». *European Journal of Operational Research* 267 (2): 399-414. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.007>.
- Hoc, J. M., et R. Amalberti. 2007. « Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations ». *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*. <https://doi.org/10.1177/155534340700100102>.
- Hoc, Jean-Michel, René Amalberti, Jean-Marie Cellier, et Vincent Grosjean. 2004. *Chapitre 2. Adaptation et gestion des risques en situation dynamique. Psychologie ergonomique : tendances actuelles*. Presses Universitaires de France. <https://www.cairn.info/psychologie-ergonomique-tendances-actuelles--9782130544215-page-15.htm>.
- Holling, C S. 1973. « Resilience and Stability of Ecological Systems ». *Annual Review of Ecology and Systematics* 4 (1): 1-23.
- Holling, C.S. 1996. « Engineering Within Ecological Constraints ». *National academy Press, Washington, DC*, 31-43.
- Holling, C.S., et B.H. Walker. 2003. « Resilience defined. Entry prepared for the Internet encyclopedia of ecological economics ». *Int Soc Ecol Econ*, 2003. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Resilience%20defined.%20Entry%20prepared](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Resilience%20defined.%20Entry%20prepared)

- %20for%20the%20Internet%20encyclopedia%20of%20ecological%20economics&publication\_year=2003&author=C.S.%20Holling&author=B.H.%20Walker.
- Hollnagel, E., J. Paries, D.D. Woods, et J. Wreathall. 2011. *Resilience engineering in practice a guidebook*. Farnham, Surrey, England; Burlington, VT: Ashgate.
- Hollnagel, Erik. 2009. « The Four Cornerstones of Resilience Engineering ». In *Resilience Engineering Perspectives, Volume 2*. CRC Press.
- Hollnagel, Erik. 2011. *Resilience Engineering in Practice a Guidebook*. Farnham, Surrey, England; Burlington, VT: Ashgate.
- Hollnagel, Erik, D. Woods David, et Nancy Leveson. 2006. *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Ashgate Publishing Limited. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00572766>.
- Hollnagel, Erik, Jean Paries, et David Woods. 2010. *Resilience Engineering in Practice a Guidebook*. Ashgate Studies in Resilience Engineering. Farnham, Surrey, England; Burlington, VT: Ashgate.
- Hollnagel, Erik, Jean Paries, D. Woods David, et John Wreathall. 2010. *Resilience engineering in practice: A Guidebook*. Ashgate Studies in Resilience Engineering. Ashgate Publishing. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00613345>.
- Hollnagel, Erik, David D. Woods, et Nancy Leveson. 2007. *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Hosseini, Seyedmohsen, Kash Barker, et Jose E. Ramirez-Marquez. 2016. « A review of definitions and measures of system resilience ». *Reliability Engineering and System Safety* 145: 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.08.006>.
- Hu, Yao, Jingshan Li, et Lawrence E Holloway. 2013. « Resilient control for serial manufacturing networks with advance notice of disruptions ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans* 43 (1): 98-114. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2012.2189879>.
- Hwang, Inseok, Sungwan Kim, Youdan Kim, et C.E. Seah. 2010. « A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods ». *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 18 (3): 636-53.
- IAEA. 2008. [www-news.iaea.org](http://www-news.iaea.org).
- Isermann, Rolf. 2006. *Fault-Diagnosis Systems - An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer. <http://www.springer.com/engineering/robotics/book/978-3-540-24112-6>.
- ISO. 1986. « The Ottawa Report on Reference Models for Manufacturing Standards ». ISO TC184/SC5/WG1 N51, Version 1.1.
- Ivanov, Dmitry. 2018. « Supply Chain Risk Management: Bullwhip Effect and Ripple Effect ». In *Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management*, par Dmitry Ivanov, 265:19-44. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-69305-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-69305-7_2).
- Jain, A. K., et H.A. Elmaraghy. 1997. « Production scheduling/rescheduling in flexible manufacturing ». *International Journal of Production Research* 35 (1): 281-309. <https://doi.org/10.1080/002075497196082>.
- Jensen, Mikkel T. 2001. « Improving Robustness and Flexibility of Tardiness and Total Flow-Time Job Shops Using Robustness Measures ». *Applied Soft Computing* 1 (1): 35-52. [https://doi.org/10.1016/S1568-4946\(01\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S1568-4946(01)00005-9).
- Jimenez, Jose-Fernando, Abdelghani Bekrar, Gabriel Zambrano-Rey, Damien Trentesaux, et Paulo Leitão. 2017. « Pollux: a dynamic hybrid control architecture for flexible job shop systems ».

- International Journal of Production Research* 55 (15): 4229-47. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1218087>.
- Jimenez, Jose-Fernando, Lamia Berrah, Damien Trentesaux, et Claude Chapel. 2022. « Towards the ethical awareness integration on industrial performance management systems ». *IFAC-PapersOnLine*, 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2022, 55 (10): 3232-37. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.142>.
- Jolliffe, Ian T. 2013. *Principal Component Analysis*. Édition : Softcover reprint of the original 2nd ed. 2002. New York: Springer-Verlag New York Inc.
- Jorge Leon, V., S. David Wu, et Robert H. Storer. 1994. « Robustness Measures and Robust Scheduling for Job Shops ». *IIE Transactions* 26 (5): 32-43. <https://doi.org/10.1080/07408179408966626>.
- José-García, Adán, Julie Jacques, Vincent Sobanski, et Clarisse Dhaenens. 2023. « Biclustering Algorithms Based on Metaheuristics: A Review ». In *Metaheuristics for Machine Learning*, 39-71. Computational Intelligence Methods and Applications. Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-3888-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3888-7_2).
- Kádárová, Jaroslava, Jozef Kováč, Michaela Durkáčová, et Gabriel Kádár. 2014. « Education in Industrial Engineering in Slovakia ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 3rd Cyprus International Conference on Educational Research, CY-ICER 2014, 30 January – 1 February 2014, Lefkosa, North Cyprus, 143 (août): 157-62. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.379>.
- Kadri, Farid. 2014. « 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. » Theses, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01119943>.
- Kadri, Farid, Sondes Chaabane, Fouzi Harrou, et Christian Tahon. 2014a. « Modélisation et prévision des flux quotidiens des patients aux urgences hospitalières en utilisant l'analyse de séries chronologiques ». *7ème conférence de Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH)*, 8. Liège, Belgique.
- Kadri, Farid, Sondes Chaabane, Fouzi Harrou, et Christian Tahon.. 2014b. « Time series modelling and forecasting of emergency department overcrowding ». *Journal of Medical Systems*, 2014.
- Kadri, Farid, Sondès Chaabane, et Christian Tahon. 2014a. « A simulation-based decision support system to prevent and predict strain situations in emergency department systems ». *Simulation Modelling Practice and Theory* 42 (mars): 32-52. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.12.004>.
- Kadri, Farid, Sondes Chaabane, et Christian Tahon. 2014b. « Vers la résilience des services d'urgences hospitalières : gestion efficace des situations de tension ». *10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation- MOSIM'14 – 5 au 7 novembre 2014 - Nancy –France*, 10. Nancy.
- Kadri, Farid, Sondes Chaabane, et Christian Tahon. 2016. « Toward a decision support system for the management of strain situations in hospital emergency departments ». In *Uncertainty Modelling in Knowledge Engineering and Decision Making*, Volume 10:568-74. World Scientific Proceedings Series on Computer Engineering and Information Science. WORLD SCIENTIFIC. [https://doi.org/10.1142/9789813146976\\_0091](https://doi.org/10.1142/9789813146976_0091).
- Kadri, Farid, Fouzi Harrou, Sondès Chaabane, Ying Sun, et Christian Tahon. 2016. « Seasonal ARMA-based SPC charts for anomaly detection: Application to emergency department systems ». *Neurocomputing* 173, Part 3 (janvier): 2102-14. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.10.009>.
- Kadri, Farid, Fouzi Harrou, Sondès Chaabane, et Christian Tahon. 2014. « Time Series Modelling and Forecasting of Emergency Department Overcrowding ». *Journal of Medical Systems* 38 (9): 107. <https://doi.org/10.1007/s10916-014-0107-0>.

- Kadri, Farid, Cyrille PACH, Sondès Chaabane, Thierry Berger, Damien Trentesaux, Christian Tahon, et Yves Sallez. 2013. « Modelling and management of the strain situations in hospital systems using un ORCA approach ». *IEEE IESM'2013*, Rabat, Morocco.
- Kahneman, Daniel, et Amos Tversky. 1982. « Intuitive prediction: Biases and corrective procedures ». In *Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases*, édité par Amos Tversky, Daniel Kahneman, et Paul Slovic, 414-21. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511809477.031>.
- Kalai, Rim, et Claude Lamboray. 2007. « L' $\alpha$ -robustesse lexicographique : une relaxation de la  $\beta$ -robustesse », octobre.
- Kamissoko, D., F. Pérès, P. Zaraté, et D. Gourc. 2015. « Complex System Representation for Vulnerability Analysis ». *IFAC-PapersOnLine* 48 (3): 948-53. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.205>.
- Karakra, Abdallah, Franck Fontanili, Elyes Lamine, et Jacques Lamothe. 2019. « HospiT'Win: A Predictive Simulation-Based Digital Twin for Patients Pathways in Hospital ». *2019 IEEE EMBS International Conference on Biomedical & Health Informatics (BHI)*, 1-4. Chicago, IL, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/BHI.2019.8834534>.
- Khakzad, Nima. 2015. « Application of Dynamic Bayesian Network to Risk Analysis of Domino Effects in Chemical Infrastructures ». *Reliability Engineering & System Safety* 138 (juin): 263-72. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.02.007>.
- Kharraja, S., P. Albert, et S. Chaabane. 2007. « Impact de la mise en place d'une salle d'induction mutualisée dans un bloc opératoire ». *Logistique & Management* 15 (1): 85-93.
- Kharraja, S., P. Albert, et S. Chaabane. 2009. « The Impact of Induction Room on Operating Theatre Performances ». *Intelligent Patient Management*, 207-20.
- Kouvelis, Panos, et Gang Yu. 1997. « A Robust Discrete Optimization Framework ». In *Robust Discrete Optimization and Its Applications*, édité par Panos Kouvelis et Gang Yu, 26-73. Nonconvex Optimization and Its Applications. Boston, MA: Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2620-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2620-6_2).
- Larroque, Benoît. 2008. « Observateurs de systèmes linéaires : application à la détection et localisation de fautes ». Thèse, Tarbes, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes. <https://oatao.univ-toulouse.fr/7684/1/larroque.pdf>
- Lay, Jules Le, Vincent Augusto, Edgar Alfonso-Lizarazo, Malek Masmoudi, Baptiste Gramont, Xiaolan Xie, Bienvenu Bongue, et Thomas Celarier. 2023. « COVID-19 Bed Management Using a Two-Step Process Mining and Discrete-Event Simulation Approach ». *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 1-0. <https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3274847>.
- Le Pape. 1995. « Experiments with a distributed architecture for predictive scheduling and execution monitoring ». In *Artificial Intelligence in reactive Scheduling*, By Roger Kerr and Elizabeth szelke Vol. 34. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/00207549608905071>.
- Lebrun Y., Vispi N., Lepreux S., Chaabane S., Kolski C. (2022). « Simulation on an RFID Interactive Tabletop with Tangible Objects of Future Working Conditions: Prospects for Implementation in the Hospital Sector ». In *S. Chaabane, E. Cousein, P. Wieser, Healthcare Systems: Challenges and Opportunities*, ISTE & Wiley, London, pp. 115-127.
- Lehmann, E.L., et J.P Romano. 2005. *Testing Statistical Hypotheses*. 3<sup>rd</sup> edition. Springer Science & Business Media.
- Lemoigne, Jean-Louis. 1994. *la théorie du système général théorie de la modélisation*. Presses universitaires de France, 4<sup>ème</sup> édition.

- Li, Chen, et Qing Chang. 2022. « Hybrid Feedback and Reinforcement Learning-Based Control of Machine Cycle Time for a Multi-Stage Production System ». *Journal of Manufacturing Systems* 65 (octobre): 351-61. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.020>.
- Liu, Yu, Shenle Pan, Pauline Folz, Fano Ramparany, Sébastien Bolle, Eric Ballot, et Thierry Coupaye. 2023. « Cognitive digital twins for freight parking management in last mile delivery under smart cities paradigm ». *Computers in Industry* 153 (décembre): 104022. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.104022>.
- Luft, Nils, et Christoph Besenfelder. 2014. « Flexibility Based Assessment of Production System Robustness ». *Procedia CIRP* 19: 81-86. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.141>.
- Lundberg, J, et B Johansson. 2007. « Pragmatic resilience ». *Proceedings of the Resilience Engineering Workshop*. Vadstena, Sweden: R. Woltjer, J. Lundberg and B. Johansson (eds.).
- Luo, Mon-Yen, et Chu-Sing Yang. 2002. « Enabling Fault Resilience for Web Services ». *Comput. Commun.* 25 (3): 198-209.
- Luthans, Fred, Gretchen R. Vogelgesang, et Paul B. Lester. 2006. « Developing the Psychological Capital of Resiliency ». *Human Resource Development Review* 5 (1): 25-44. <https://doi.org/10.1177/1534484305285335>.
- Marcon, Eric, Sondes Chaabane, Yves Sallez, et Thérèse Bonte. 2017a. « Caregivers Routing Problem in Home Health Care: Literature Review ». In *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*, édité par Theodor Borangiu, Damien Trentesaux, André Thomas, Paulo Leitão, et José Barata Oliveira, 319-26. Studies in Computational Intelligence. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51100-9\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51100-9_28).
- Marcon, Eric, Sondes Chaabane, Yves Sallez, Thérèse Bonte, et Damien Trentesaux. 2017b. « A multi-agent system based on reactive decision rules for solving the caregiver routing problem in home health care ». *Simulation Modelling Practice and Theory* 74 (mai): 134-51. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2017.03.006>.
- Mardia, K. V. 1974. « Applications of Some Measures of Multivariate Skewness and Kurtosis in Testing Normality and Robustness Studies ». *Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, Series B (1960-2002)* 36 (2): 115-28.
- Martinez, Clea, Marie-Laure Espinouse, et Maria Di Mascolo. 2024. « An exact two-phase approach to re-optimize tours in home care planning ». *Computers & Operations Research* 161 (janvier): 106408. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106408>.
- McFarlane, Duncan, Rengarajan Srinivasan, Alena Puchkova, Alan Thorne, et Alexandra Brintrup. 2018. « A Maturity Framework for Operational Resilience and Its Application to Production Control ». *Studies in Computational Intelligence* 762: 51-62. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73751-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73751-5_5).
- Mekhaldi, Rachda Naila. 2022. « Conception et développement des méthodes de prédiction de la durée de séjour hospitalier centrées sur des techniques de “machine learning” ». These de doctorat, Valenciennes, Université Polytechnique Hauts-de-France. <https://www.theses.fr/2022UPHF0004>.
- Mekhaldi, Rachda Naila, Patrice Caulier, Sondes Chaabane, Abdelahad Chraïbi, et Sylvain Piechowiak. 2021. « A Comparative Study of Machine Learning Models for Predicting Length of Stay in Hospitals ». *Journal of Information Science and Engineering* 37 (septembre): 1025-38.
- Mélèse, Jacques. 1991. *L'analyse modulaire des systèmes*, AMS. Éditions d'Organisation. <https://www.decitre.fr/livres/l-analyse-modulaire-des-systemes-ams-9782708113473.html>.
- Meller, Russell, Benoit Montreuil, Collin Thivierge, et Zachary Montreuil. 2012. « Functional Design of Physical Internet Facilities: A Road-based Crossdocking Hub ». *Progress in Material Handling Research: 2012*, janvier. [https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr\\_2012/42](https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr_2012/42).

- Mentes, Ayhan, et Osman Turan. 2018. « A new resilient risk management model for Offshore Wind Turbine maintenance ». *Safety Science*, juin. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.022>.
- Mnassri, Baligh. 2012. « Analyse de données multivariées et surveillance des processus industriels par analyse en composantes principales ». Aix-Marseille Université. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00749282>.
- Mogollon, J., V. Goepp, O. Avila, et R. De Guio. 2023. « Automated Input Data Management for Discrete Event Simulation Models of Emergency Departments ». *25th International Conference on Enterprise Information Systems ICEIS 2023*, Prague, Czech Republic, avril.
- Mondal, S. C., J. Maiti, et P. K. Ray. 2010. « Development of a Measurement Metric for Manufacturing Process Robustness ». *International Journal of Productivity and Quality Management*, août. <https://www.inderscienceonline.com/doi/10.1504/IJQM.2010.034404>.
- Mondal, S.C., P.K. Ray, et J. Maiti. 2014. « Modelling robustness for manufacturing processes: a critical review ». *International Journal of Production Research* 52 (2): 521-38. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.837588>.
- Monostori, Judit. 2018. « Supply Chains Robustness: Challenges and Opportunities ». *Procedia CIRP* 67: 110-15. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.185>.
- Montreuil, Benoit, Russell Meller, et Eric Ballot. 2010. « Towards a Physical Internet: the Impact on Logistics Facilities and Material Handling Systems Design and Innovation ». *Progress in Material Handling Research: 2010*, septembre. [https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr\\_2010/40](https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr_2010/40).
- Morisse, Marcel, et Corvin Prigge. 2017. « Design of a Business Resilience Model for Industry 4.0 Manufacturers ». *Amcis 2017 Proceedings*. Atlanta: Assoc Information Systems. <http://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/da971ff1-4ecf-4900-b2e1-40637b2902e8-21c36469/relevance/1>.
- Mosterman, Pieter J. 2001. « Diagnosis of Physical Systems with Hybrid Models Using Parametrized Causality ». In *Hybrid Systems: Computation and Control*, édité par Maria Domenica Di Benedetto et Alberto Sangiovanni-Vincentelli, 447-58. Lecture Notes in Computer Science 2034. Springer Berlin Heidelberg. [http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45351-2\\_36](http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45351-2_36).
- Mourali, Yosra, Benoit Barathon, Maxime Bourgois Colin, Sondès Chaabane, Raja Fassi, Alice Ferrai, Yohan Guerrier, et al. 2023a. « Jeu sérieux sur table interactive avec objets tangibles : cas de la sensibilisation au handicap en entreprise ». Poster, Mardi des chercheurs, IMTD, Université Polytechnique Hauts-de-France, Valenciennes, France, juin. <https://hal.science/hal-04185917>.
- Mourali, Yosra, Benoit Barathon, Maxime Bourgois Colin, Sondès Chaabane, Raja Fassi, Alice Ferrai, Yohan Guerrier, et al. 2023b. « Design and Prototyping of a Serious Game on Interactive Tabletop with Tangible Objects for Disability Awareness in Companies ». *Studies in Health Technology and Informatics* 306 (août): 318-25. <https://doi.org/10.3233/SHTI230638>.
- Mourali, Yosra, Benoit Barathon, Maxime Bourgois Colin, Sondès Chaabane, Raja Fassi, Yohan Guerrier, Dorothee Guilain, et al. 2023c. « Conception centrée utilisateur d'un jeu sérieux sur table interactive avec objets tangibles : application au handicap en entreprise ». *IHM'23 - 34e Conférence Internationale Francophone sur l'Interaction Humain-Machine*. Troyes, France: AFIHM and Université de Technologie de Troyes. <https://hal.science/hal-04045921>.
- Moyaux, Thierry, Yinling Liu, Guillaume Bouleux, et Vincent Cheutet. 2023. « An Agent-Based Architecture of the Digital Twin for an Emergency Department ». *Sustainability* 15 (4): 3412. <https://doi.org/10.3390/su15043412>.

- Mujjuni, F., T. Betts, L. S. To, et R. E. Blanchard. 2021. « Resilience a Means to Development: A Resilience Assessment Framework and a Catalogue of Indicators ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 152 (décembre): 111684. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111684>.
- Nakayama, Hidehisa, Nirwan Ansari, Abbas Jamalipour, et Nei Kato. 2007. « Fault-resilient sensing in wireless sensor networks ». *Computer Communications* 30 (11–12): 2375-84.
- Namdar, Jafar, Xueping Li, Rupy Sawhney, et Ninad Pradhan. 2018. « Supply chain resilience for single and multiple sourcing in the presence of disruption risks ». *International Journal of Production Research* 56 (6): 2339-60. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1370149>.
- Neely, Andy, Mike Gregory, et Ken Platts. 1995. « Performance measurement system design: A literature review and research agenda ». *International Journal of Operations & Production Management* 15 (4): 80-116. <https://doi.org/10.1108/01443579510083622>.
- Nguyen, Angie, Omar Bougacha, Béranger Lekens, Samir Lamouri, Robert Pellerin, et Christophe Couvreur. 2023. « On the use of logistics data to anticipate drugs shortages through data mining ». *Procedia Computer Science*, CENTERIS – International Conference on ENTERprise Information Systems / ProjMAN – International Conference on Project MANAGEMENT / HCist – International Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies 2022, 219 (janvier): 949-56. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.371>.
- Nguyen, Khanh T.P., et Kamal Medjaher. 2019. « A New Dynamic Predictive Maintenance Framework Using Deep Learning for Failure Prognostics ». *Reliability Engineering & System Safety* 188 (août): 251-62. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.018>.
- Nouiri, Maroua, Abdelghani Bekrar, Abderrazak Jemai, Damien Trentesaux, Ahmed Chiheb Ammari, et Smail Niar. 2017. « Two Stage Particle Swarm Optimization to Solve the Flexible Job Shop Predictive Scheduling Problem Considering Possible Machine Breakdowns ». *Computers & Industrial Engineering* 112 (octobre): 595-606. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.03.006>.
- OECD. 2019. « Evaluation Criteria - OECD ». 2019. <https://www.oecd.org/dac/evaluation/daccriteriaforevaluatingdevelopmentassistance.htm>.
- Ondel, Olivier. 2006. « Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur - machine asynchrone ». Ecole Centrale de Lyon. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00113102>.
- Ouedraogo, Kiswendsida Abel. 2013. « Apprentissage renforcé appliqué à l'évaluation de la résilience d'un Système Homme-Machine face à des situations critiques ». Thèse, Valenciennes, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00838711>.
- Pacaux-Lemoine, Marie-Pierre, Damien Trentesaux, Gabriel Zambrano Rey, et Patrick Millot. 2017. « Designing Intelligent Manufacturing Systems through Human-Machine Cooperation Principles: A Human-Centered Approach ». *Computers & Industrial Engineering* 111 (septembre): 581-95. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.014>.
- Pach, C., T. Berger, Y. Sallez, et D. Trentesaux. 2015. « Reactive control of overall power consumption in flexible manufacturing systems scheduling: A Potential Fields model ». *Control Engineering Practice* 44 (novembre): 193-208. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.08.003>.
- Pach, Cyrille, Thierry Berger, Thérèse Bonte, et Damien Trentesaux. 2014a. « ORCA-FMS: A Dynamic Architecture for the Optimized and Reactive Control of Flexible Manufacturing Scheduling ». *Computers in Industry* 65 (4): 706-20. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.02.005>.
- Pach, Cyrille, Thierry Berger, Thérèse Bonte, et Damien Trentesaux. 2014b. « ORCA-FMS: A Dynamic Architecture for the Optimized and Reactive Control of Flexible Manufacturing Scheduling ». *Computers in Industry* 65 (4): 706-20. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.02.005>.

- Pach, Cyrille, Thierry Berger, Yves Sallez, Thérèse Bonte, Emmanuel Adam, et Damien Trentesaux. 2014c. « Reactive and energy-aware scheduling of flexible manufacturing systems using potential fields ». *Computers in Industry*, ICT for Sustainability in Industry, 65 (3): 434-48. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.11.008>.
- Pai, Ping-Feng, et Chih-Sheng Lin. 2005. « A Hybrid ARIMA and Support Vector Machines Model in Stock Price Forecasting ». *Omega* 33 (6): 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.07.024>.
- Pan, Shenle, Damien Trentesaux, Duncan McFarlane, Benoit Montreuil, Eric Ballot, et George Q. Huang. 2021. « Digital interoperability in logistics and supply chain management: state-of-the-art and research avenues towards Physical Internet ». *Computers in Industry* 128 (juin): 103435. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103435>.
- Paprocka, Iwona. 2019. « The Model of Maintenance Planning and Production Scheduling for Maximising Robustness ». *International Journal of Production Research* 57 (14): 4480-4501. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1492752>.
- Paredes, Yenny, Jairo Montoya-Torres, et Valérie Botta-Genoulaz. 2022. « Taxonomy of Scheduling Problems with Learning and Deterioration Effects ». *Algorithms* 15 (novembre): 439. <https://doi.org/10.3390/a15110439>.
- Paredes-Astudillo, Yenny Alexandra, Valérie Botta-Genoulaz, et Jairo R. Montoya-Torres. 2023. « Impact of learning effect modelling in flowshop scheduling with makespan minimisation based on the Nawaz-Enscore-Ham algorithm ». *International Journal of Production Research* 0 (0): 1-16. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2204967>.
- Pascal, Vrignat, Aggab Toufik, Avila Manuel, Duculty Florent, et Kratz Frédéric. 2019. « Improvement Indicators for Total Productive Maintenance Policy ». *Control Engineering Practice* 82 (janvier): 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.09.019>.
- Patriarca, Riccardo, Johan Bergström, Giulio Di Gravio, et Francesco Costantino. 2018. « Resilience engineering: Current status of the research and future challenges ». *Safety Science* 102 (December 2016): 79-100. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.005>.
- Pimm, Stuart L. 1984. « The Complexity and Stability of Ecosystems ». *Nature* 307 (5949): 321-26.
- Portoleau, Tom, Christian Artigues, et Romain Guillaume. 2024. « Robust decision trees for the multi-mode project scheduling problem with a resource investment objective and uncertain activity duration ». *European Journal of Operational Research* 312 (2): 525-40. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.07.035>.
- Punia, Sushil, et Sonali Shankar. 2022. « Predictive Analytics for Demand Forecasting: A Deep Learning-Based Decision Support System ». *Knowledge-Based Systems* 258 (décembre): 109956. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.109956>.
- Qin, S. Joe. 2012. « Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis ». *Annual Reviews in Control* 36 (2): 220-34. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.09.004>.
- Rajendran, Chandrasekharan, et Oliver Holthaus. 1999. « A Comparative Study of Dispatching Rules in Dynamic Flowshops and Jobshops ». *European Journal of Operational Research*.
- Ramezani, Javaneh, et Luis M. Camarinha-Matos. 2020. « Approaches for Resilience and Antifragility in Collaborative Business Ecosystems ». *Technological Forecasting and Social Change* 151 (février): 119846. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119846>.
- Rasmussen, Jens. 1983. « Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-13 (3): 257-66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313160>.
- Rasmussen, Jens. 1997. « Risk management in a dynamic society: a modelling problem ». *Safety Science* 27 (2-3): 183-213. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(97\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(97)00052-0).

- Reniers, Genserik, et Valerio Cozzani. 2013. *Domino Effects in the Process Industries: Modelling, Prevention and Managing*. Newnes.
- Ribeiro, Daniel, António Almeida, Américo Azevedo, et Filipe Ferreira. 2021. « Resilience in industry 4.0 digital infrastructures and platforms ». *Advances in Transdisciplinary Engineering* 15: 390-95. <https://doi.org/10.3233/ATDE210067>.
- Riviere, Louis, Christian Artigues, Hélène Fargier. Two-stage stochastic/robust scheduling using permutable operation groups. 23ème Congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF 2022), Institut National des Sciences Appliquées : INSA Lyon; Université de Lyon, Feb 2022, Villeurbanne - Lyon, France. hal-03595429
- Roy B. Robustesse de quoi, vis-à-vis de quoi, mais aussi robustesse pourquoi en aide à la décision ? In *Newsletters of the European Working Group «Multicriteria Aid for Decisions»*, number 6 in 3, pages 1–6, 2002.
- Saaty, T L. 1994. « How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process ». *Interfaces* 24(6): 19\_43. <https://doi.org/10.1287/inte.24.6.19>.
- Sabuncuoglu, I., et S. Goren. 2009. « Hedging production schedules against uncertainty in manufacturing environment with a review of robustness and stability research ». *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 22 (2): 138-57. <https://doi.org/10.1080/09511920802209033>.
- Saleh, J.H., D.E. Hastings, et D.J. Newman. 2001. « Extracting the essence of flexibility in system design ». *Proceedings Third NASA/DoD Workshop on Evolvable Hardware. EH-2001*, 59-72. <https://doi.org/10.1109/EH.2001.937948>.
- Sallez, Y., T. Berger, S. Raileanu, S. Chaabane, et D. Trentesaux. 2010. « Semi-heterarchical control of FMS: From theory to application ». *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23 (8): 1314-26.
- Schleinkofer, Uwe, Martin Dazer, Kevin Lucan, Oliver Mannuß, Bernd Bertsche, et Thomas Bauernhansl. 2019. « Framework for Robust Design and Reliability Methods to Develop Frugal Manufacturing Systems ». *Procedia CIRP* 81: 518-23. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.148>.
- Schlink, F.J. 1919. « The concept of resilience with respect to indicating instruments ». *Journal of the Franklin Institute*, 1919. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=The%20concept%20of%20resilience%20with%20respect%20to%20indicating%20instruments&publication\\_year=1919&author=F.J.%20Schlink](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=The%20concept%20of%20resilience%20with%20respect%20to%20indicating%20instruments&publication_year=1919&author=F.J.%20Schlink).
- Seeger, Paola Martins, Zakaria Yahouni, et Gülgün Alpan. 2022. « Literature review on using data mining in production planning and scheduling within the context of cyber physical systems ». *Journal of Industrial Information Integration* 28 (juillet): 100371. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100371>.
- Sevaux, Marc, et Kenneth Sörensen. 2004. « A Genetic Algorithm for Robust Schedules in a One-Machine Environment with Ready Times and Due Dates ». *Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies* 2 (2): 129-47. <https://doi.org/10.1007/s10288-003-0028-0>.
- Shafaei, R., et P. Brunn. 1999. « Workshop scheduling using practical (inaccurate) data Part 1: The performance of heuristic scheduling rules in a dynamic job shop environment using a rolling time horizon approach ». *International Journal of Production Research* 37 (17): 3913-25. <https://doi.org/10.1080/002075499189835>.
- Sheard, Sarah. 2008. « 11.2.2 A Framework for System Resilience Discussions ». *INCOSE International Symposium* 18 (1): 1243-57. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2008.tb00875.x>.
- Sheffi, Yossi. 2005. *The Resilient Enterprise - Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage*. Boston, MA: MIT Press.

- Sheffi, Yossi, et B. Rice Jr. James. 2005. « A Supply Chain View of the Resilient Enterprise », *MIT Sloan Management Review*, 47 (1): 41-48.
- Shekarian, Mansoor, Seyed Vahid Reza Nooraie, et Mahour Mellat Parast. 2019. « An Examination of the Impact of Flexibility and Agility on Mitigating Supply Chain Disruptions ». *International Journal of Production Economics*, juillet, 107438. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.07.011>.
- Simon, Herbert A. 1962. « The Architecture of Complexity ». *Proceedings of the American Philosophical Society* 106 (6): 467-82.
- Skobelev, Petr, et Damien Trentesaux. 2017. « Disruptions Are the Norm: Cyber-Physical Multi-Agent Systems for Autonomous Real-Time Resource Management ». In *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*, édité par Theodor Borangiu, Damien Trentesaux, André Thomas, Paulo Leitão, et José Barata Oliveira, 287-94. *Studies in Computational Intelligence*. Springer International Publishing.
- Srinivasan, Rengarajan, Duncan McFarlane, et Alan Thorne. 2016. « Identifying the requirements for resilient production control systems ». *Studies in Computational Intelligence* 640: 125-34. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-30337-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30337-6_12).
- Stockmann, Christian, Herwig Winkler, et Martin Kunath. 2021. « Robustness assessment in production systems ». *Journal of Manufacturing Technology Management* 32 (4): 932-51. <https://doi.org/10.1108/JMTM-06-2020-0223>.
- Stolker, R J M, D M Karydas, et J L Rouvroye. 2008. « A comprehensive approach to assess operational resilience ». *Proceedings of the third resilience engineering symposium*, 247-53.
- Stricker, N., et G. Lanza. 2014. « The Concept of Robustness in Production Systems and Its Correlation to Disturbances ». *Procedia CIRP* 19: 87-92. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.078>.
- Stricker, Nicole, András Pfeiffer, Emanuel Moser, Botond Kádár, Gisela Lanza, et László Monostori. 2015. « Supporting Multi-Level and Robust Production Planning and Execution ». *CIRP Annals* 64 (1): 415-18. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.115>.
- Subbaraj, P., et B. Kannapiran. 2010. « Artificial Neural Network Approach for Fault Detection in Pneumatic Valve in Cooler Water Spray System ». *International Journal of Computer Applications* 9 (7): 43-52. <https://doi.org/10.5120/1395-1881>.
- Sun, Can, Thomas Rose, Claudia Colella, et Jürgen Schubert. 2016. « One Small Change Can Lead to Large Complexity: A First Glimpse at the Master Data Change and Its Impact on the Semiconductor Supply Chain ». *IFAC-PapersOnLine*, 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016, 49 (12): 710-15. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.857>.
- Świerczek, Artur. 2014. « The Impact of Supply Chain Integration on the “Snowball Effect” in the Transmission of Disruptions: An Empirical Evaluation of the Model ». *International Journal of Production Economics*, The International Society for Inventory Research, 2012, 157 (novembre): 89-104. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.08.010>.
- Tanguy, Benoit. 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 ». Thèse, Paris, École Nationale Supérieure des Mines de Paris. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00005651>.
- Tanguy, Benoit. 2005. « Quelle(s) modélisation(s) de l'essai charpy pour une meilleure prédiction de la courbe de résilience ». *Séminaire LMT*.
- Tolio, T., M. Urgo, et J. Váncza. 2011. « Robust Production Control against Propagation of Disruptions ». *CIRP Annals* 60 (1): 489-92. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.047>.

- Torbali, Bilge, et Gülgün Alpan. 2023. « A multi-agent-based real-time truck scheduling model for cross-docking problems with single inbound and outbound doors ». *Supply Chain Analytics* 3 (septembre): 100028. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100028>.
- Touzout, Faycal A., Hichem Haddou Benderbal, Amirhossein Khezri, et Lyes Benyoucef. 2021. « Process Plan Generation for Reconfigurable Manufacturing Systems: Exact Versus Evolutionary-Based Multi-Objective Approaches ». In *Heuristics for Optimization and Learning*, édité par Farouk Yalaoui, Lionel Amodeo, et El-Ghazali Talbi, 1-15. Studies in Computational Intelligence. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58930-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58930-1_1).
- Tran, Kim Phuc, éd. 2022. *Machine Learning and Probabilistic Graphical Models for Decision Support Systems*. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003189886>.
- Trentesaux, Damien, Jean-Pierre Campagne, et Jacques Erschler. 2000. « A Generic Design Framework for Decentralized Management: The DMU Model ». *IFAC Proceedings Volumes* 33 (17): 1021-26. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)39545-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)39545-9).
- Trentesaux, Damien, Cyrille Pach, Abdelghani Bekrar, Yves Sallez, Thierry Berger, Thérèse Bonte, Paulo Leitão, et José Barbosa. 2013. « Benchmarking flexible job-shop scheduling and control systems ». *Control Engineering Practice* 21 (9): 1204-25. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.05.004>.
- Turban, Efraim. 1993. *Decision support and expert systems: Management support systems*. 3rd Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA ©, ISBN:0024216917.
- Turban, Efraim, Ramesh Sharda, et Dursun Delen. 2011. *Decision Support and Business Intelligence Systems*. 9th ed. Boston: Prentice Hall.
- Usuga Cadavid, Juan Pablo, Bernard Grabot, Samir Lamouri, Robert Pellerin, et Arnaud Fortin. 2020a. « Valuing Free-Form Text Data from Maintenance Logs through Transfer Learning with CamemBERT ». *Enterprise Information Systems*, juillet, 1-29. <https://doi.org/10.1080/17517575.2020.1790043>.
- Usuga Cadavid, Juan Pablo, Samir Lamouri, Bernard Grabot, Robert Pellerin, et Arnaud Fortin. 2020b. « Machine Learning Applied in Production Planning and Control: A State-of-the-Art in the Era of Industry 4.0 ». *Journal of Intelligent Manufacturing* 31 (6): 1531-58. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01531-7>.
- Venkatasubramanian, Venkat, Raghunathan Rengaswamy, Surya N. Kavuri, et Kewen Yin. 2003. « A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods ». *Computers & Chemical Engineering* 27 (3): 327-46. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00162-X](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00162-X).
- Vispi, Nicolas, Yoann Lebrun, Sophie Lepreux, Sondès Chaabane, et Christophe Kolski. 2021. « Simulation on RFID Interactive Tabletop of Working Conditions in Industry 4.0 ». In *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, édité par Theodor Borangiu, Damien Trentesaux, Paulo Leitão, Olivier Cardin, et Samir Lamouri, 343-54. Studies in Computational Intelligence. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2_24).
- Walha, Faiza. 2018. «Dynamic optimization methods for a rail-road Pi-Hub allocation problem ». Thèse, Tunisie: Université de Sfax.
- Walha, Faiza, Abdelghani Bekrar, Sondes Chaabane, et Taicir Loukil. 2014. « A Rail-Road PI-Hub Allocation Problems: Model and Heuristic ». *Ist International Physical Internet Conference*, Québec City, Canada.

- Walha, Faiza, Abdelghani Bekrar, Sondes Chaabane, et Taicir Moalla Loukil. 2016. « A Rail-Road PI-Hub Allocation Problem: Active and Reactive Approaches ». *Computers in Industry* 81 (septembre): 138-51. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.04.007>.
- Walha, Faiza, Sondes Chaabane, Abdelghani Bekrar, et Taicir Moalla Loukil. 2015. « A Simulated Annealing Metaheuristic for a Rail-Road PI-Hub Allocation Problem ». In *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*, édité par Theodor Borangiu, André Thomas, et Damien Trentesaux, 307-14. Studies in Computational Intelligence. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-15159-5\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15159-5_28).
- Walker, B, S Carpenter, J Anderies, N Abel, G.S Cumming, M Janssen, L Lebel, J Norberg, J.D Peterson, et R Pritchard. 2002. « Resilience Management in Social-ecological Systems: a Working Hypothesis for a Participatory Approach ». *Conservation Ecology* 6 (1): 14.
- Westrum, Ron. 2006. « A Typology of Resilience Situations ». In *Resilience Engineering: Concepts And Precepts*, édité par Erik Hollnagel, David Woods, et Nancy Leveson, 55-65. Ashgate Publishing.
- Woods, David. 2006. « Essential characteristics of resilience ». In *Resilience engineering: Concepts and precepts*, 21-33. Aldershot, UK Ashgate: E. hollnagel, D.D. woods and N. leveson (eds.).
- Woods, David, et Matthieu Branlat. 2012. « Essential characteristics of resilience ». In *Resilience Engineering in Practice.*, 127-43.
- Woods, David D. 2015. « Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering ». *Reliability Engineering & System Safety*, Special Issue on Resilience Engineering, 141 (septembre): 5-9. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.018>.
- Xia, Tangbin, Yutong Ding, Yifan Dong, Zhen Chen, Meimei Zheng, Ershun Pan, et Lifeng Xi. 2022. « Collaborative Production and Predictive Maintenance Scheduling for Flexible Flow Shop with Stochastic Interruptions and Monitoring Data ». *Journal of Manufacturing Systems* 65 (octobre): 640-52. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.10.016>.
- Xiong, Jian, Li-ning Xing, et Ying-wu Chen. 2013. « Robust Scheduling for Multi-Objective Flexible Job-Shop Problems with Random Machine Breakdowns ». *International Journal of Production Economics* 141 (1): 112-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.04.015>.
- Yadegari, Ehsan, Damien Lamy, et Xavier Delorme. 2023. « Reactive Flexible Job Shop Problem with Stress Level Consideration ». In *Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Responsible Manufacturing, Service, and Logistics Futures*, édité par Erlend Alfnes, Anita Romsdal, Jan Ola Strandhagen, Gregor von Cieminski, et David Romero, 632-46. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham: Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43670-3\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43670-3_44).
- Yahiaoui, Ala-Eddine, Sohaib Afifi, et Hamid Allaoui. 2023. « Enhanced iterated local search for the technician routing and scheduling problem ». *Computers & Operations Research* 160 (décembre): 106385. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106385>.
- Youn, Byeng D., Chao Hu, Pingfeng Wang, et Jounghaek Yoon. 2011. « Resilience allocation for resilient engineered system design ». *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* 17 (11): 1082-89. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2011.17.11.1082>.
- Zambrano Rey, Gabriel, Thérèse Bonte, Vittaldas Prabhu, et Damien Trentesaux. 2014. « Reducing myopic behavior in FMS control: A semi-heterarchical simulation–optimization approach ». *Simulation Modelling Practice and Theory, Simulation-Optimization of Complex Systems: Methods and Applications*, 46 (août): 53-75. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.01.005>.
- Zhang, Liwen, Elyes Lamine, Franck Fontanili, Christophe Bortolaso, Mustapha Derras, et Hervé Pingaud. 2019. « A Decision-Making Support System for Operational Coordination of Home

- Health Care Services ». *2019 IEEE/ACS 16th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/AICCSA47632.2019.9035219>.
- Zhang, W.J., et C.A. van Luttervelt. 2011. « Toward a Resilient Manufacturing System ». *CIRP Annals* 60 (1): 469-72. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.041>.
- Zhu, Quanyan, et Tamer Başar. 2015. « Game-Theoretic Methods for Robustness, Security, and Resilience of Cyberphysical Control Systems: Games-in-Games Principle for Optimal Cross-Layer Resilient Control Systems ». *Control Systems, IEEE* 35 (février): 46-65. <https://doi.org/10.1109/MCS.2014.2364710>.
- Zitzmann, Immanuel. 2014. « How to Cope with Uncertainty in Supply Chains? - Conceptual Framework for Agility, Robustness, Resilience, Continuity and Anti-Fragility in Supply Chains », 25.
- Zolghadri, Marc, Florent Couffin, Patrice Leclaire, et Simon Collart-Dutilleul. 2014. « Complex Systems Renewal: Positioning, Concepts and Architectural Issues ». *IFAC Proceedings Volumes* 47 (3): 8731-36. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01771>.
- Zonta, Tiago, Cristiano André Da Costa, Felipe A. Zeiser, Gabriel De Oliveira Ramos, Rafael Kunst, et Rodrigo Da Rosa Righi. 2022. « A Predictive Maintenance Model for Optimizing Production Schedule Using Deep Neural Networks ». *Journal of Manufacturing Systems* 62 (janvier): 450-62. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.12.013>.



## Liste des publications

### Revue internationale avec comité de lecture

- Attajer A., Darmoul S., Chaabane S., Sallez Y. (2022). An analytic hierarchy process augmented with expert rules for product driven control in cyber-physical manufacturing systems. *Computers in Industry*, 143. [IF=11.245] [DOI=10.1016/j.compind.2022.103742].
- Mekhaldi R., Caulier P., Chaabane S., Chraibi A., Piechowiak S. (2021). A Comparative Study of Machine Learning Models for Predicting Length of Stay in Hospitals. *Journal of Information Science and Engineering*, 37 (5), pp. 1025-1038. [IF=0.541] [DOI=10.6688/JISE.202109 37(5).0003].
- Ben ida I., Balti M., Chaabane S., Jemai A. (2021). Adaptative vital signs monitoring system based on the early warning score approach in smart hospital context. *IET Smart Cities*, 3, pp. 16:28 [DOI=10.1049/smc2.12004].
- Benbelkacem S., Kadri F., Atmani B., Chaabane S. (2019). Machine Learning for Emergency Department Management. *International Journal of Information Systems in the Service Sector (IJISSS)*, 11 (3), pp. 19-36
- Marcon é., Chaabane S., Sallez Y., Bonte T., Trentesaux D. (2017). A multi-agent system based on reactive decision rules for solving the caregiver routing problem in home health care. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 74, pp. 134-151. [IF=1.954] [DOI=10.1016/j.simpat.2017.03.006].
- Kadri F., Harrou F., Chaabane S., Sun Y., Tahon C. (2016). Seasonal ARMA-based SPC charts for anomaly detection: Application to emergency department systems. *Neurocomputing*, 173(3), pp. 2102–2114. [IF=3.317] [DOI=10.1016/j.neucom.2015.10.009].
- Walha F., Bekrar A., Chaabane S., Loukil T. (2016). A rail-road PI-hub allocation problem: Active and reactive approaches. *Computers in Industry*, 81, pp. 138-151. [IF=2.691] [DOI=10.1016/j.compind.2016.04.007].
- Harrou F., Kadri F., Chaabane S., Tahon C., Sun Y. (2015). Improved Principal Component Analysis for Anomaly Detection: Application to an Emergency Department. *Computers & Industrial Engineering*, 88, pp. 63–77. [IF=1.783] [DOI=10.1016/j.cie.2015.06.020].
- Kadri F., Harrou F., Chaabane S., Tahon C. (2014). Time series modelling and forecasting of emergency department overcrowding. *journal of medical systems*, 38:107, pp. 20. [IF=2.456] [DOI=10.1007/s10916-014-0107-0].
- Kadri F., Chaabane S., Tahon C. (2014). A simulation-based decision support system to prevent and predict strain situations in emergency department systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 41, pp. 32-52. [IF=1.169] [DOI=10.1016/j.simpat.2013.12.004].
- Bornschlegell A., Pelle J., Harmand S., Bekrar A., Chaabane S., Trentesaux D. (2012). Thermal optimization of a single inlet T-junction. *International Journal of Thermal Sciences*, 53, pp. 108-118. [IF=2.563] [DOI=10.1016/j.ijthermalsci.2011.09.016].
- Chaari T., Chaabane S., Loukil T., Trentesaux D. (2011). A genetic algorithm for robust hybrid flow shop scheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(9), pp. 821-833. [IF=1.012] [DOI=10.1080/0951192X.2011.575181].

- Sallez Y., Berger T., Raileanu S., Chaabane S., Trentesaux D. (2010). Semi-heterarchical control of FMS: From theory to application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(8), pp. 1314–1326. [IF=2.368] [DOI=10.1016/j.engappai.2010.06.013].
- Chaabane S., Meskens N., Guinet A., Laurent M. (2008). Comparison of two methods of operating theatre planning: Application in Belgian Hospital. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 17(2), pp. 171-186.

## **Revue nationale avec comité de lecture**

- Bonvoisin F., Chaabane S., Senechal O., Tahon C. (2014). Evaluation de la performance des blocs opératoires : du modèle aux indicateurs. *Logistique & Management*, 22(4), pp. 33-42
- Chaabane S., Meskens N., Guinet A., Laurent M. (2007). Comparaison des performances d'une méthode de planification appliquée à plusieurs politiques de programmation opératoire. *Logistique et Management*, 15, pp. 17-26, ISSN 1250-7970
- Kharraja S., Albert P., Chaabane S. (2007). Impact de la mise en place d'une salle d'induction mutualisée dans un bloc opératoire. *Logistique et Management*, 15, pp. 85-73, ISSN 1250-7970.

## **Coordination d'ouvrage**

- Chaabane S., Cousein E., Wieser P. (2022). *Healthcare Systems: Challenges and Opportunities*. John Wiley & Sons, ISBN 9781786307996.
- Chaabane S., Cousein E., Wieser P. (2022). *Systèmes de soins et de santé : Défis d'aujourd'hui et opportunités de demain*. ISTE Editions, ISBN 9781784058678.

## **Chapitre d'ouvrage**

- Kadri F., Chaabane S., Vanderhaegen F. (2024). The Resilience of Emergency Departments: Definition and Characterization. *Studies in Computational Intelligence*, 1136, Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitão, P., Berrah, L., Jimenez, JF., ISBN 978-3-031-53444-7 [DOI=[https://doi.org/10.1007/978-3-031-53445-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-53445-4_9)].
- Nissoul S., Pacaux-Lemoine M.-P., Chaabane S. (2024). Exploring Human-Machine Relations and Approaches for Task Management in Dynamic Environments: A Comprehensive Literature Review. *Studies in Computational Intelligence*, 1136, Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitão, P., Berrah, L., Jimenez, JF., ISBN 978-3-031-53444-7 [DOI=[https://doi.org/10.1007/978-3-031-53445-4\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-53445-4_22)].
- Pacaux-Lemoine M.-P., Flemisch F., Chaabane S. (2024). Calibration and Resilience of Human-AI Systems Cooperation in Industry. *Studies in Computational Intelligence*, 1136, Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitão, P., Berrah, L., Jimenez, JF., ISBN 978-3-031-53444-7 [DOI=[https://doi.org/10.1007/978-3-031-53445-4\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-031-53445-4_24)].
- Lebrun Y., Vispi N., Lepreux S., Chaabane S., Kolski C. (2022). Simulation de l'activité de travail sur table interactive RFID avec objets tangibles : perspectives d'usages à l'hôpital. In S. Chaabane, E. Cousein & P. Wieser, *Systèmes de soins et de santé : défis d'aujourd'hui et opportunités de demain*, ISTE Editions, London, pp. 125-138
- Lebrun Y., Vispi N., Lepreux S., Chaabane S., Kolski C. (2022). Simulation on an RFID Interactive Tabletop with Tangible Objects of Future Working Conditions: Prospects for Implementation in the

Hospital Sector. In S. Chaabane, E. Cousein, P. Wieser, *Healthcare Systems: Challenges and Opportunities*, ISTE & Wiley, London, pp. 115-127

- Chaabane S., Kadri F. (2020). Toward proactive and reactive simulation-based Emergency Department Control System to cope with strain situations. In Masmoudi M., Jarbouli B., Siarry P., *Operations Research and Simulation in Healthcare*, Springer, pp. 121-145, ISBN 978-3-030-45223-0
- Marcon é., Chaabane S., Sallez Y., Bonte T. (2017). Caregivers routing problem in Home Health Care: literature review. In Borangiu, Trentesaux, Thomas, Leitão, Oliveira, *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*, 694, *Studies in computational intelligence*, Springer, pp. 319-326
- Walha F., Chaabane S., Bekrar A., Loukil T. (2015). A Simulated Annealing Metaheuristic for a Rail-Road PI-Hub Allocation Problem. *Service Orientation in Holonic and Multi-agent Manufacturing*" Springer International Publishing, vol. 594, Springer International Publishing, pp. 307-314 [DOI=10.1007/978-3-319-15159-5\_28].
- Kharraja S., Albert P., Chaabane S. (2009). The Impact of Induction Room on Operating Theatre Performances. *Intelligent Patient Management*, *Studies in Computational Intelligence*, 189, pp. 207-220, ISBN 978-3-642-00178-9

## **Conférence internationale avec actes et comité de lecture**

- Nissoul S., Pacaux-Lemoine M.-P., Chaabane S. (2023). Exploring Human-Machine Relations and Approaches for Task Management in Dynamic Environments: A Comprehensive Literature Review. *Proceedings of SOHOMA International conference*, Annecy, France, septembre.
- Pacaux-Lemoine M.-P., Flemisch F., Chaabane S. (2023). Calibration and Resilience of Humans-AI Systems Cooperation in industry. *Proceedings of SOHOMA International conference*, Annecy, France, septembre.
- Mourali Y., Barathon B., Bourgois colin M., Chaabane S., Fassi R., Ferrai A., Guerrier Y., Guilain D., Kolski C., Lebrun Y., Lepreux S., Pudlo P., Sauvé J. (2023). Design and Prototyping of a Serious Game on Interactive Tabletop with Tangible Objects for Disability Awareness in Companies. D. Archambault and G. Kouroupetroglou, *Assistive Technology: Shaping a Sustainable and Inclusive World*, IOS Press, pp. 318-325, août.
- Mourali Y., Barathon B., Bourgois colin M., Chaabane S., Fassi R., Ferrai A., Guerrier Y., Guilain D., Kolski C., Lebrun Y., Lepreux S., Pudlo P., Sauvé J. (2023). Serious game for company governance: supporting inte-gration, prevention of professional disintegration and job retention of people with disabilities. *DISAB Workshop*, co-located with the 14th ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems (EICS 2023), Swansea, UK, juin.
- Kadri F., Chaabane S., Vanderhaegen F. (2023). The resilience of emergency departments: Definition and characterization. *Proceedings of SOHOMA International conference*, Annecy, France, septembre, janvier.
- Goepf V., Berrah L., Drira E., Chaabane S. (2022). Towards a framework to position resilience and Industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, Volume 55, Issue 10, pp. 2258-2263, janvier, ISBN 2405-8963 [DOI=10.1016/j.ifacol.2022.10.044.].
- Attajer A., Chaabane S., Darmoul S., Sallez Y., Riane F. (2022). Evaluation of Operational Resilience in Cyber-Physical Production Systems: literature review. *IFAC-PapersOnLine*, volume 55, Issue 10, pp. 2264-2269, janvier, ISBN 2405-8963 [DOI=10.1016/j.ifacol.2022.10.045.].
- Berger T., Santin J.-J., Chaabane S., Dequidt A., Sallez Y. (2021). SmartLab: A Concept of Reconfigurable Assembly System Designed at INSA Hauts-de-France. Borangiu, Trentesaux, Leitão, Cardin,

- Joblot, Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future, volume 1034, Studies in Computational Intelligence, Springer, Cluny, France, pp. 391–402, novembre, ISBN 978-3-030-99108-1 [DOI=10.1007/978-3-030-99108-1\_28].
- Attajer A., Darmoul S., Chaabane S., Riane F., Sallez Y. (2021). Benchmarking Simulation Software Capabilities Against Distributed Control Requirements: FlexSim Vs AnyLogic. Borangiu T., Trentesaux D., Leitão P., Cardin O., Lamouri, Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future, 952, Studies in Computational Intelligence, Springer, Paris, France, mars. [DOI=10.1007/978-3-030-69373-2\_38].
  - Vispi N., Lebrun Y., Lepreux S., Chaabane S., Kolski C. (2020). Simulation on RFID interactive tabletop of working conditions in industry 4.0. Borangiu T., Trentesaux D., Leitão P., Cardin O., Lamouri S., Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future, 952, Studies in Computational Intelligence, Springer, Paris, France, octobre. [DOI=10.1007/978-3-030-69373-2\_24].
  - Mekhaldi R., Caulier P., Chaabane S., Chraïbi A., Piechowiak S. (2020). Using Machine Learning Models to Predict the Length of Stay in a Hospital Setting. 8th World Conference on Information Systems and Technologies (WorldCIST'2020), Budva, Montenegro, avril, ISBN 978-3-030-45687-0 [DOI=10.1007/978-3-030-45688-7\_21].
  - Chaabane S., Trentesaux D. (2019). Coping with disruptions in complex systems: a framework. IFAC-PapersOnLine, 9th IFAC/IFIP/IFORS/IIE/INFORMS Conference Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM'19), 52(13), Elsevier, Berlin, Allemagne, pp. 2413-2418, août. [DOI=10.1016/j.ifacol.2019.11.568].
  - Walha F., Bekrar A., Chaabane S., Loukil T. (2016). A road rail PI hub allocation problem: Heuristic in static and dynamic case. IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA'2016), Agadir, Morocco, janvier.
  - Kadri F., Chaabane S., Tahon C. (2016). Toward a decision support system for the management of strain situations in hospital emergency departments. Conference on Uncertainty Modelling in Knowledge Engineering and Decision Making (FLINS 2016), Roubaix, France, janvier.
  - Kadri F., Chaabane S., Tahon C. (2016). Reactive Control System to Manage Strain Situations in Emergency Departments. 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2016), Lisbon, Portugal, janvier.
  - Kadri F., Chaabane S., Bekrar A., Tahon C. (2015). Resilience-Based Performance Assessment of Strain Situations in Emergency Departments. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM'15, Seville, Spain, pp. 609 - 618, octobre. [DOI=10.1109/IESM.2015.7380221].
  - Kadri F., Harrou F., Sun Y., Chaabane S., Tahon C. (2015). Early Detection of Abnormal Patient Arrivals at Hospital Emergency Department. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM'15, Seville, Spain, pp. 221 - 227, octobre. [DOI=10.1109/IESM.2015.7380162].
  - Walha F., Bekrar A., Chaabane S., Loukil T. (2014). A rail-road PI-hub allocation problems: model and heuristic. 1st International Physical Internet Conference, Québec, mai.
  - Walha F., Chaabane S., Bekrar A., Loukil T. (2014). The Cross docking under uncertainty: state of the art. 3rd International Conference on Advanced Logistics and Transport, IEEE, Hammamet, Tunisia, pp. 369-373, mai, ISBN 978-1-4799-4839-6
  - Chaari T., Chaabane S., Aissani N., Trentesaux D. (2014). Scheduling under uncertainty: survey and research directions. 3rd International Conference on Advanced Logistics and Transport, IEEE, Hammamet, Tunisia, pp. 267-272, mai, ISBN 978-1-4799-4839-6

- Kadri F., Pach C., Chaabane S., Berger T., Trentesaux D., Tahon C., Sallez Y. (2013). Modelling and management of the strain situations in hospital systems using an ORCA approach. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM'13, I4E2, Rabat, Morocco, pp. 202-210, octobre, ISBN 978-2-9600532-4-1
- Bekrar A., Chaabane S., Trentesaux D., Bornschlegell A., Pelle J., Harmand S. (2011). Hybrid PSO-tabu search for solving non-linear constrained problem. ICSI 2011: International conference on swarm intelligence, Cergy, pp. paper #22, juin.
- Chaari T., Chaabane S., Loukil T., Trentesaux D. (2010). A Two-Stage Algorithm for Effective and Robust Hybrid Flow Shop Scheduling. 9th International Conference on Multiple Objective Programming and Goal Programming (MOPGP'10), Sousse, Tunisia, pp. 111, mai.
- Chaabane S., Chaari T., Trentesaux D. (2009). Integrated sizing support system using simulation and design of experiments. The 39th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Troyes, France, juillet, ISBN 978-1-4244-4136-5
- Chaari T., Chaabane S., Trentesaux D., Tahon C. (2008). Démarche méthodologique et outil d'aide au dimensionnement des blocs opératoires. Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH), lausanne-Suisse, pp. 833-840, septembre, ISBN 978-2-8399-0316-5
- Bonvoisin F., Valli B., Chaabane S., Tahon C. (2008). Développement d'un outil d'aide à la sélection d'indicateurs de performance pour un hôpital. Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH), Lausanne, septembre, ISBN ISBN 978-2-8399-0316-5
- Hamek S., Anceaux F., Chaabane S., Tahon C. (2008). La gestion de soins en hospitalisation à domicile : une nouvelle forme de logique hospitalière étendue hors des murs. 4ème édition de la conférence Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers GISEH, Lausanne, Suisse, septembre.
- Chaari T., Chaabane S., Loukil T., Trentesaux D. (2008). Optimisation du dimensionnement d'un atelier de production basé sur les ordonnancements des scénarios de production prévisionnels, Cas d'un Flow shop hybride. 7ème conférence internationale francophone MOSIM, Paris, pp. 790-798, avril, ISBN 978-2-7430-1057-7.
- Bouhamou F., Chaabane S., Tahon C., Piechowiak S. (2007). Generating master surgical schedule using integer programming. Third International Conference on Operational Research Applied to Health Services, Saint-Etienne, France, juillet.
- Bouhamou F., Chaabane S., Piechowiak S., Tahon C. (2007). Planification du bloc opératoire d'un centre hospitalier : retour d'expérience. 7ème congrès international de génie industriel (5-8 juin 2007), Université de Québec, Canada, juin.
- Kharraja S., Albert P., Chaabane S. (2007). Induction Room: which impact on operating theatre planning? International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM'07), Beijing, China, mai.

## **Conférence nationale avec actes et comité de lecture**

- Mourali Y., Barathon B., Bourgois colin M., Chaabane S., Fassi R., Guerrier Y., Guilain D., Kolski C., Lebrun Y., Lepreux S., Sauvé J. (2023). Conception centrée utilisateur d'un jeu sérieux sur table interactive avec objets tangibles : application au handicap en entreprise. IHM'23, 34ème conférence internationale francophone sur l'Interaction Humain-Machine, Troyes, France, avril.
- Chaabane S., Di mascolo M., Fontanili F. (2022). Gestion et ingénierie des systèmes hospitaliers à l'ère du numérique et des innovations organisation. GISEH 2020 - 10 ème Conférence Francophone en Gestion et

- Ingénierie des Systèmes Hospitaliers, 5, Valenciennes, France, pp. 1, janvier. [DOI=<https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2022.0772>].
- Santin J.-J., Berger T., Chaabane S., Dequidt A., Sallez Y. (2021). Système d'assemblage reconfigurable- Utilisation dans un cadre didactique. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Laval, mars.
  - Lebrun Y., Vispi N., Lepreux S., Chaabane S., Kolski C. (2020). Simuler les futures conditions de travail sur table interactive RFID avec objets tangibles : perspectives dans le domaine hospitalier. GISEH 2020, 10ème conférence francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (26-29 octobre), Valenciennes, France, octobre.
  - Belhor M., El amraoui A., Chaabane S., Jemai A., Delmotte F. (2020). Planification des Ressources Humaines en Hospitalisation à Domicile. 10ème conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers, GISEH2020, Valenciennes, octobre.
  - Kadri F., Abdennbi K., Chaabane S., Nouaouri N. (2020). Approche basée sur les réseaux de neurones récurrents pour la prévision de la demande de soins aux urgences hospitalières. 10ème conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers, GISEH2020, octobre.
  - Mekhaldi R., Caulier P., Chaabane S., Piechowiak S., Chraïbi A. (2019). Apports de l'intelligence artificielle à la prédiction des durées de séjours hospitaliers. atelier IA& santé, PFIA, Toulouse, juillet.
  - Chaabane S., Kadri F., Anceaux F., Tahon C. (2018). Gestion dynamique de flux patients pour l'évitement des situations de tensions dans un service des urgences. 9ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH'18), Genève, Suisse, janvier.
  - Kadri F., Chaabane S., Tahon C. (2014). Vers la résilience des services d'urgences hospitalières : gestion efficace des situations de tension. 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation- MOSIM'14, Nancy, novembre.
  - Benbelkacem S., Kadri F., Chaabane S., Atmani B. (2014). A data mining-based approach to predict strain situations in hospital emergency department systems. 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation- MOSIM'14, Nancy, novembre.
  - Combes C., Kadri F., Chaabane S. (2014). Predicting hospital length of stay using regression models: application to emergency department. 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation- MOSIM'14, Nancy, novembre.
  - Kadri F., Chaabane S., Harrou F., Tahon C. (2014). Modélisation et prévision des flux quotidiens des patients aux urgences hospitalières en utilisant l'analyse de séries chronologiques. 7ème conférence de Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH), Liège, Belgique, juillet.
  - Kadri F., Chaabane S., Tahon C. (2013). Service d'urgences hospitalières : situations de tension et résilience. Journées Doctorales MACS - JD MACS, Strasbourg, juillet.
  - Bonvoisin F., Chaabane S., Valli B., Tahon C. (2011). Vers un outil d'aide à la décision pour la gestion des blocs opératoires basé sur les indicateurs de performance. 12ème congrès de la société Française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision, ROADEF'2011, Saint-Etienne, France, mars.
  - Bouhamou F., Chaabane S., Tahon C., Piechowiak S. (2008). Logistique hospitalière : Génération d'un plan d'allocation de plages horaires par programmation en nombres entiers. 9ème congrès de la société Française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision, ROADEF'08, Clermont Ferrand, France, février.
  - Chaari T., Chaabane S., Loukil T., Trentesaux D. (2008). Approche de résolution conjointe du dimensionnement et de l'ordonnancement d'un Flow shop hybride à plusieurs étages. 9ème congrès de la

société Française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision, ROADEF'08, Clermont-Ferrand , France, pp. 125-126, février.

## **Séminaire et autres communications**

- Mourali Y., Barathon B., Bourgois colin M., Chaabane S., Fassi R., Ferrai A., Guerrier Y., Guilain D., Kolski C., Lebrun Y., Lepreux S., Pudlo P., Sauvé J. (2023). Jeu sérieux sur table interactive avec objets tangibles : cas de la sensibilisation au handicap en entreprise. Poster, Mardi des chercheurs, IMTD, Université Polytechnique Hauts-de-France, Valenciennes, France, juin.
- Bigerelle M., Caulier P., Chaabane S., Delcroix V., Grislin-Le strugeon E., Piechowiak S. (2021). Laboratoire LAMIH : Recherches en Santé et IA. Bulletin de l'AFIA, N°112, pp. 59-61, avril.
- Mekhaldi R., Caulier P., Chaabane S., Piechowiak S., Delerue D. (2019). Apports de l'intelligence artificielle à la prédiction des durées de séjours hospitaliers. JD JN MACS Bordeaux, Bordeaux, juin.
- Kadri F., Chaabane S., Tahon C. (2013). Conception et mise en œuvre d'un système d'aide à la décision pour l'anticipation de situation de tensions dans les urgences hospitalières. 2ème Journée Régionale des Doctorants en Automatique (JRDA), Université de Valenciennes et de Hainaut Combrésis, décembre.
- Kadri F., Chaabane S., Tahon C. (2012). Modélisation et gestion des situations de tension dans les urgences hospitalières. , 1ère Journée Régionale Des Doctorants En Automatique, 06 Décembre 2012, IUTA de Lille., décembre.
- Kadri F., Chaabane S., Tahon C. (2012). Système d'aide à la décision pour la gestion de situations de tension dans les urgences hospitalières. Journée GDR MACS, Clermont Ferrand, novembre.

## **Rapport de contrat de recherche**

- Sallez Y., Berger T., Bonte T., Chaabane S., Bekrar A. (2019). PI-NUTS (Physical InterNet crossdocking hUb conTrol System). Projet ANR, Rapport final, Valenciennes.

