



**HAL**  
open science

# Contribution au développement de modèles d'aide à la décision en maintenance pour des systèmes à dépendances multiples: Vers une maintenance prescriptive

Phuc Do Van, Université de Lorraine

## ► To cite this version:

Phuc Do Van, Université de Lorraine. Contribution au développement de modèles d'aide à la décision en maintenance pour des systèmes à dépendances multiples: Vers une maintenance prescriptive. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2019. tel-02409208v2

**HAL Id: tel-02409208**

**<https://hal.science/tel-02409208v2>**

Submitted on 20 Dec 2019

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

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

---

# HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Université de Lorraine

**Phuc DO**

Maître de Conférences

---

## Contribution au développement de modèles d'aide à la décision en maintenance pour des systèmes à dépendances multiples : Vers une maintenance prescriptive

---

Soutenance prévue le: 11 décembre 2019

### Composition du jury:

<i>Rapporteurs :</i>	Zineb Simeu-abazi	Professeur à Polytech'Grenoble
	Pierre Dehombreux	Professeur à l'Université de Mons, Belgique
	Bruno Castanier	Professeur à l'Université d'Angers
<i>Examineurs :</i>	Anne Barros	Professeur à CentraleSupélec
	François Péres	Professeur à École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
	Christophe Bérenguer	Professeur à Grenoble INP
	Antoine Grall	Professeur à l'Université de technologie de Troyes
	Benoît Iung	Professeur à l'Université de Lorraine
<i>Invité :</i>	Phil Scarf	Professeur à l'Université de Salford, Angleterre

---

Centre de Recherche en Automatique de Nancy — UMR 7039

Université de Lorraine — CNRS



Mis en page avec la classe thesul.

# Remerciements

Je tiens ici à exprimer mes remerciements sincères à Bruno Castanier, Professeur à l'Université d'Angers, Pierre Dehombreux Professeur à l'Université de Mons, Zineb Simeu-Abazi Professeur à Polytech'Grenoble, Christophe Bérenguer professeur Professeur à l'INP Grenoble, Anne Barros Processeur à CentraleSupélec, Antoine Grall Processeur à l'Université de Technologies de Troyes, François Péres Professeur à l'ENI de Tarbes, Philip Scarf Processeur à l'Université de Salford (UK) pour m'avoir fait l'honneur et le plaisir de participer à mon jury d'Habilitation à Diriger des Recherches et d'y consacrer un temps précieux.

Je tiens particulièrement à remercier Benoit Iung Professeur à l'Université de Lorraine, toute ma reconnaissance pour ces quelques années de travail en commun, sur une thématique passionnante. Le co-encadrement sous sa direction est un partage et une expérience à renouveler, en appliquant le principe d'interchangeabilité.

Je tiens également à remercier l'ensemble des collaborateurs, collègues que j'ai côtoyés durant cette carrière, dans les équipes et projets auxquels j'ai contribué. Plus particulièrement, Eric, Alexandre, Nicolae, Jean-François, Alexis, David, Mario, ... plus ceux que j'oublie mais qui ont été importants.

Mes anciens doctorants ne sont pas oubliés, j'ai conservé avec la plupart d'entre eux des relations amicales qui se poursuivent au travers du temps, Hai-Canh, Kim-Anh, Hung, Duc-Hanh, Minh-Tuan, ... sans eux rien n'aurait été possible, car une thèse est un binôme Je ne peux également manquer l'occasion d'adresser une pensée particulière à mes parents et ma famille (mon épouse Huong, ma fille Athéna & mon fils Alex) pour leur estime, leur soutien inconditionnel et leur patience.



## Préambule

Ce document présente la synthèse de mes activités en tant qu'enseignant-chercheur sur la période 2008-2011 à l'Université de Technologie de Troyes (UTT) et sur la période 2011-2019 à l'Université de Lorraine (UL), en vue de l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches. Il est divisé en trois parties distinctes. La première partie est relative à une notice d'activités. La deuxième partie présente mes travaux de recherche passés et actuels qui sont structurés en trois axes originaux. Enfin, mon projet de recherche et d'enseignement est détaillé dans la troisième partie.



# Sommaire

---

---

## I Notice d'activités

---

---

<b>1</b>	<b>Notice d'activités</b>	<b>3</b>
1.1	État civil . . . . .	3
1.2	Formation universitaire . . . . .	4
1.3	Déroulement de carrière . . . . .	4
1.4	Synthèse des activités d'enseignement et d'administration . . . . .	5
1.4.1	Activités d'enseignement . . . . .	5
1.4.2	Activités d'administration . . . . .	10
1.5	Synthèse des activités de recherche . . . . .	10
1.5.1	Présentation générale . . . . .	10
1.5.2	Activités d'encadrement de la recherche . . . . .	16
1.5.3	Rayonnement scientifique . . . . .	20
1.5.4	Participation à des projets de recherche . . . . .	25
1.5.5	Responsabilités scientifiques . . . . .	26
1.6	Synthèse du projet de recherche et d'enseignement . . . . .	27
1.7	Liste des publications . . . . .	28

## II Description des travaux de recherche

---

---

<b>Introduction à la thématique de recherche abordée</b>	<b>41</b>
<b>2 Positionnement des trois axes de recherche investigués</b>	<b>43</b>
2.1 Introduction au processus d'optimisation de maintenance . . . . .	43
2.2 Modélisation et formulation du comportement dysfonctionnel . . . . .	45
2.2.1 Au niveau composant . . . . .	46
2.2.2 Au niveau système . . . . .	47
2.3 Élaboration de stratégies de maintenance adaptées . . . . .	48
2.3.1 Au niveau composant . . . . .	48
2.3.2 Au niveau système . . . . .	49
2.4 Évaluation et optimisation de stratégies de maintenance . . . . .	53
2.5 Récapitulatif des axes de recherche élaborés . . . . .	55
<b>3 Travaux sur la modélisation de dégradation avec multiples facteurs d'influence</b>	<b>57</b>
3.1 Modèles de dégradation avec des actions de maintenance imparfaite . .	57
3.1.1 Présentation générale . . . . .	57
3.1.2 Synthèse des travaux majeurs développés . . . . .	59
3.2 Modèles de dégradation avec interactions d'états entre composants . .	63
3.2.1 Présentation générale . . . . .	63
3.2.2 Synthèse des travaux majeurs développés . . . . .	65
3.3 Conclusion . . . . .	69
<b>4 Travaux sur des indicateurs d'aide à la décision en maintenance</b>	<b>71</b>
4.1 Développement de nouveaux indicateurs fiabilistes . . . . .	71
4.1.1 Présentation générale . . . . .	71
4.1.2 Synthèse des travaux majeurs développés . . . . .	73
4.2 Construction d'indicateurs d'efficacité énergétique . . . . .	77
4.2.1 Présentation générale . . . . .	77
4.2.2 Synthèse des travaux majeurs développés . . . . .	79
4.3 Conclusion . . . . .	83

---

<b>5 Travaux sur l'élaboration de stratégies de maintenance prévision-</b>	<b>85</b>
<b>nelle</b>	
5.1 Stratégies de maintenance conditionnelle avec surveillance imparfaite . . . . .	86
5.1.1 Présentation générale . . . . .	86
5.1.2 Synthèse des travaux majeurs développés . . . . .	87
5.2 Stratégies de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des	
pièces de rechange . . . . .	93
5.2.1 Présentation générale . . . . .	93
5.2.2 Synthèse des travaux majeurs développés . . . . .	95
5.3 Regroupement dynamique avec contraintes et opportunité de mainte-	
nance . . . . .	103
5.3.1 Présentation générale . . . . .	103
5.3.2 Synthèse des travaux majeurs développés . . . . .	105
5.4 Regroupement dynamique pour un système à structure complexe . . . . .	109
5.4.1 Présentation générale . . . . .	109
5.4.2 Synthèse des travaux majeurs développés . . . . .	111
5.5 Regroupement dynamique pour un système distribué . . . . .	116
5.5.1 Présentation générale . . . . .	116
5.5.2 Synthèse des travaux majeurs développés . . . . .	118
5.6 Conclusion . . . . .	120

---



---

### III Projet de recherche et d'enseignement

---



---

<b>6 Présentation du projet de recherche et d'enseignement</b>	<b>125</b>
6.1 Contexte . . . . .	125
6.1.1 Vers un système de production cyberphysique (CPPS) . . . . .	127
6.1.2 Maintenance des CPS/CPPS : vers une maintenance prescriptive	128
6.2 Modèles de pronostic de défaillance avec dépendances multiples . . . . .	132

6.2.1	Construction de modèles de dégradation avec des dépendances multiples . . . . .	135
6.2.2	Développement d’approches de pronostic avec considération de dépendances multiples et d’erreurs de mesure . . . . .	136
6.2.3	Extension et déploiement d’approches de pronostic au niveau composant . . . . .	138
6.3	Vers un système autonome de planification de la maintenance . . . . .	140
6.3.1	Développement de modèles d’aide à la décision autonome en maintenance . . . . .	141
6.3.2	Développement d’une plate-forme expérimentale . . . . .	143
6.4	Récapitulatif des moyens, ressources prévisionnelles . . . . .	147
6.5	Positionnement du projet de recherche . . . . .	149
6.6	Collaborations et rayonnement . . . . .	150
6.6.1	Collaborations de recherche . . . . .	150
6.6.2	Renforcement du rayonnement . . . . .	150
6.7	Projet d’enseignement . . . . .	151
6.7.1	Innovation d’unités d’enseignement existantes . . . . .	151
6.7.2	Création de nouveaux travaux pratiques . . . . .	153

---

---

## Annexes

---

---

<b>A</b>	<b>Attestations de co-direction de thèses</b>	<b>155</b>
<b>B</b>	<b>Deux dépôts de projets</b>	<b>159</b>
B.1	Projet DP1 . . . . .	159
B.2	Projet DP2 . . . . .	160

<b>Bibliographie</b>	<b>161</b>
----------------------	------------

# Liste des tableaux

1.1	Bilan des publications . . . . .	15
1.2	Bilan des revues publiées et en soumission . . . . .	15
1.3	Synthèse des encadrements scientifiques . . . . .	17
3.1	Durée avant la défaillance de C1 dans différents scénarios . . . . .	67
3.2	Estimateurs des paramètres de modèles de dégradation . . . . .	68



# Table des figures

1.1	Bilan des activités d'enseignement avant 09/2011 . . . . .	6
1.2	Bilan des activités d'enseignement depuis 09/2011 . . . . .	9
1.3	Aperçu des trois axes de recherche avec les encadrements et les collaborations associés . . . . .	14
1.4	Nombre de citations selon GoogleScholar en Septembre 2019 . . . . .	16
2.1	Aperçu des axes de recherche et les contributions associées . . . . .	56
3.1	Illustration des impacts d'une action de maintenance imparfaite avec $d = 0$ .	60
3.2	Illustration de la fonction de coût d'une action de maintenance imparfaite.	62
3.3	Illustration sur la distribution de $u^k$ avec différentes valeurs de $\xi$ , $t$ et $k$ . .	63
3.4	Illustration de l'évolution de la dégradation avec interactions d'états entre deux composants . . . . .	66
3.5	Système de transmission mécanique de deux composants . . . . .	67
3.6	Evolution de la dégradation d'engrenages d'entraînement dans trois scénarios expérimentaux . . . . .	68
3.7	Ajustement des estimations, par filtre particulaire, des données de dégradation C1 dans l'exécution 1 . . . . .	69
3.8	Ajustement des estimations, par filtres particulaires, des données de dégradation C2 dans l'exécution 1 . . . . .	70
4.1	Trajectoires de dégradation et RIM pour un système à deux composants. .	74
4.2	Approche d'agrégation pour calculer l'efficacité énergétique au niveau système . . . . .	80
4.3	Illustration du concept de REEL et son application pour l'aide à la décision en maintenance . . . . .	81
4.4	Approche générique pour le pronostic de REEL . . . . .	82
5.1	Illustration du processus de dégradation et de discrétisation. . . . .	88
5.2	Illustration de la stratégie de maintenance proposée. . . . .	89

5.3	Illustration du modèle d'observation avec dégradation du système de surveillance . . . . .	90
5.4	Illustration de la stratégie de maintenance proposée. . . . .	92
5.5	Proposed maintenance policy and its related policies. . . . .	93
5.6	Procédure de la prise de décision de maintenance préventive multi-niveaux. . . . .	101
5.7	Approche proposée pour le regroupement d'actions de maintenance . . . . .	106
5.8	Illustration sur la construction du planning provisoire de maintenance . . . . .	106
5.9	Illustration du processus de mise à jour suite à la survenue d'une opportunité de maintenance. . . . .	109
5.10	Exemple de modifications de structure du système . . . . .	112
5.11	Approche de regroupement d'actions de maintenance pour un système à structure complexe . . . . .	112
5.12	Changements de la structure d'un système par mission . . . . .	114
5.13	Procédure de mise à jour pour les contextes dynamiques de type 1 . . . . .	115
5.14	Procédure de mise à jour pour les contextes dynamiques de type 2 . . . . .	116
5.15	Procédure de mise à jour pour les contextes dynamiques de type 3 . . . . .	116
5.16	Illustration d'un système distribué (GDPS) à 5 sites. . . . .	119
5.17	Illustration de l'algorithme d'optimisation proposé. . . . .	120
6.1	Comparaison de l'usine d'aujourd'hui et l'usine du futur . . . . .	126
6.2	Architecture récursive d'un système CPPS . . . . .	128
6.3	Evolution de la maintenance selon un point de vue industriel . . . . .	129
6.4	Un cadre de maintenance prescriptive pour entités CPS . . . . .	130
6.5	Un cadre de l'approche de maintenance prescriptive pour un CPS ou CPPS . . . . .	132
6.6	Approches de pronostic . . . . .	133
6.7	Illustration de l'approche de pronostic proposée. . . . .	137
6.8	Un modèle générique d'aide à la planification autonome de maintenance . . . . .	142
6.9	Vues réelle et schématique de la plate-forme TELMA . . . . .	144
6.10	Vue fonctionnelle de la plate-forme TELMA . . . . .	145
6.11	Prototypage du système autonome de planification à l'échelle réduite . . . . .	146
6.12	Aperçu des ressources doctorales et collaborations externes prévisionnelles sur les 6 ans à venir . . . . .	148

Première partie  
Notice d'activités



# Chapitre 1

## Notice d'activités

### 1.1 État civil

**Van Phuc DO**

Né le 01 Juillet 1980

Marié 2 enfants

#### **Adresse personnelle**

23 rue de Maugray  
54600 Villers-les-Nancy, France

#### **Adresse professionnelle**

Centre de Recherche en Automatique de Nancy  
(CRAN)  
Campus sciences BP70239  
54506 Vandoeuvre Cedex, France  
Tel :+33(0) 3 72 74 56 90  
Fax :+33 (0)3 72 74 53 28  
E-mail : phuc.do@univ-lorraine.fr

#### **Situation actuelle**

- Maître de conférences au 5ème échelon de la classe normale, à l'Université de Lorraine (emploi n° 1323), et en poste à TELECOM Nancy depuis septembre 2011
- Rattaché à la 61ième section du CNU.
- Chercheur au CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy, UMR CNRS 7039). Impliqué dans le projet SdF-PHM2 (Sûreté de Fonctionnement, PHM et Maintenance) du département ISET (Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques)
- Depuis Octobre 2016 : bénéficiaire de la PEDR B.

## 1.2 Formation universitaire

**1998 - 2003** : Ingénieur polytechnique en génie électrique à l'Institut National Polytechnique de Hanoi - Vietnam.

**2003 - 2004** : Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en "Optimisation et Sécurité des Systèmes" à l'Université de Technologie de Troyes (UTT).

**2005-2008** : Thèse de doctorat en Sciences de l'Ingénieur (spécialité optimisation et sûreté des systèmes) soutenue à l'UTT au sein du laboratoire "Modélisation et Sécurité des Systèmes" (LM2S) de l'institut Charles Delaunay (ICD, UMR CNRS 6279)

Titre : Contribution au développement et à l'étude de facteurs d'importance fiabilistes pour les systèmes markoviens.

Jury : Didier Theilliol (Président), Yves Dutuit et Michel Roussignol (Rapporteurs), Jean-Louis Bon et Emanuel Borgonovo (Examineurs), Christophe Bérenguer et Anne Barros (Directeurs de thèse)

## 1.3 Déroulement de carrière

Date	Faits marquants
10/2005	Vacataire à l'Université de Technologie de Troyes (UTT)
10/2008	Soutenance de la thèse de doctorat à l'UTT
10/2008	Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (Temps plein) à l'UTT
09/2009	Enseignant Chercheur Contractuel à l'UTT
03/2011	Démarrage de la thèse de Hai-Canh Vu (UTT) Directeur de thèse : Pr. Anne Barros (50%); co-directeur de thèse : Dr. Phuc Do (50%)
09/2011	Nommé en tant que Maître de Conférences à l'Université Henri Poincaré Enseignant à l'École Supérieure d'Informatique et Applications de Lorraine (ESIAL) Chercheur au CRAN CNRS UMR 7039
10/2011	Démarrage de la thèse de Kim-Anh Nguyen à l'UTT Directeur de thèse : Pr. Antoine Grall (50%); co-directeur de thèse : Dr. Phuc Do (50%)
09/2012	Titularisation
01/2014	Démarrage de la thèse de Anh Hoang à l'École doctorale IAEM Lorraine <sup>1</sup> Directeur de thèse : Pr. Benoit Iung (50%); co-directeur de thèse : Dr. Phuc Do (50%)

---

1. Informatique, Automatique, Electronique, Mathématique de Lorraine

## 1.4. Synthèse des activités d'enseignement et d'administration

Date	Faits marquants
05/2015	Responsable de la première année de la formation initiale de TELECOM Nancy
04/2016	Démarrage de la thèse de Ho-Si-Hung Nguyen à l'Ecole doctorale IAEM Loraine Directeur de thèse :Pr. Benoit Iung (50%); co-directeur de thèse : Dr. Phuc Do (50%)
07/2016	Co-chair de la conférence internationale MIMAR2016 <sup>2</sup>
12/2017	Co-Guest editor d'un numéro spécial "Maintenance Modelling" de la revue RESS <sup>3</sup>
06/2018	Co-chair de la conférence internationale MIMAR2018 <sup>4</sup>
10/2018	Démarrage de la thèse de Duc-Hanh Dinh à l'Ecole doctorale IAEM Loraine Directeur de thèse :Pr. Benoit Iung (50%); co-directeur de thèse : Dr. Phuc Do (50%)
10/2018	Démarrage de la thèse de Minh-Tuan Truong à l'Ecole doctorale IAEM Loraine Directeur de thèse :Pr. Benoit Iung (50%); co-directeur de thèse : Dr. Phuc Do (50%)
02/2019	Démarrage du projet "vers un système autonome-intelligent pour l'optimisation de maintenance dans un contexte de l'industrie 4.0" en collaboration avec notre partenaire brésilien UFPE <sup>5</sup>

## 1.4 Synthèse des activités d'enseignement et d'administration

### 1.4.1 Activités d'enseignement

Depuis 2005, mes activités d'enseignement s'articulent principalement autour de trois thématiques : génie informatique ; systèmes à événements discrets (SED) ; gestion et pilotage de la production. **Parmi ces thématiques, la partie relative aux SED est directement reliée à mes activités de recherche.** Pour chacun de ces thèmes, mon enseignement s'est structuré autour de cours magistraux (CM), de travaux dirigés (TD) et de travaux pratiques (TP) pour un volume global cumulé d'environ 2700h eqTD (soit environ de 190 h par an). Mes enseignements en génie informatique couvrent les domaines de la modélisation algorithmique à la programmation (langage C et Delphi). Mes enseignements en SED vont de la définition des concepts de base d'un système à événements discrets aux méthodes avancées pour l'évaluation et la prédiction de ses performances (temps de réponse, débit, fiabilité/disponibilité, etc) en utilisant des processus stochastiques (Markov, file d'attente, ..). Mes enseignements en gestion/pilotage de la production quant à eux portent sur la définition des concepts de base en production (articles, nomenclatures, gammes, etc.) jusqu'aux méthodes de gestion/pilotage de la production (MRP, juste-à-temps, OPT, Grafcet).

---

2. 9th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability, London, UK 12-14 July, 2016.

3. Reliability Engineering & System Safety

4. 10th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability, Manchester, UK 13-16 June, 2018.

5. Université fédérale du Pernambouc

Ce parcours en enseignement s'est construit sur deux périodes différentes (avant 2011 et après 2011) mais en continuité de contenu.

**Avant 01/09/2011 :**

Mes activités pédagogiques avant la date de ma nomination à l'UL dans la composante ESIAL/TELECOM Nancy (01/09/2011) ont été effectuées à l'Université de Technologie de Troyes (UTT) majoritairement en tant que vacataire puis ATER et enfin enseignant-chercheur contractuel.

- Plus de 850 heures d'enseignement effectuées (Cours, TD et TP) pour 9 modules d'enseignement différents pour la formation d'ingénieurs en Systèmes Industriels en 2A et 3A de l'UTT ;
- Encadrement de 22 stagiaires de fin d'études en Systèmes Industriels de l'UTT.

**Faits majeurs :**

- responsabilité de 2 modules d'enseignement (UE-soutien logistique intégré et SAV ; UE-Introduction au langage C) avec une moyenne de 50 étudiants par UE ;
- création complète d'un module d'enseignement (UE-soutien logistique intégré et SAV) : élaboration de contenu, invitation d'intervenants industriels.

Un bilan de mes activités d'enseignement avant 09/2011 est donné dans la figure 1.1.

Module	Niveau	Vacataire			ATER			Enseignant-Chercheur contractuel					
		2005-2008			2008/2009			2009/2010			2010/2011		
		CM	TD	TP	CM	TD	TP	CM	TD	TP	CM	TD	TP
Soutien logistique intégré et SAV*	ING/M1							14	28		14	28	
Introduction au langage C*	ING/M1							28		28	28		28
Sûreté de fonctionnement	ING/M1			101			34			34			34
Régulation automatique	ING/M1			54			36			18			18
Bases de l'informatique	ING/M1			34		34			34			34	
Outils de modélisation et d'évaluation des performances	ING/M1					34			34			34	
Éléments d'automatisme et contrôle industriel	ING/M1					6							
Analyse de la valeur et analyse fonctionnelle	ING/M1			34		34							
Interface Homme-Machine et ergonomie	ING/M1			42									
<b>Total</b>				<b>265</b>		<b>108</b>	<b>70</b>	<b>42</b>	<b>96</b>	<b>80</b>	<b>42</b>	<b>96</b>	<b>80</b>

\* : Module d'enseignement dont je suis le responsable  
 ING/M1 : Formation d'ingénieurs /Master 1 à l'Université de Technologie de Troyes

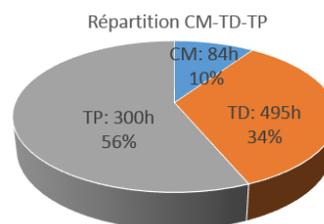


FIGURE 1.1 – Bilan des activités d'enseignement avant 09/2011

**Depuis 01/09/2011 :**

En septembre 2011, j'ai été nommé en tant que Maître de Conférences (McF) à l'Université Henri Poincaré dans la composante ESIAL (École supérieure d'Informatique et Applications de Lorraine), une école associée au groupe de l'Institut Mines-Télécom depuis 2011. En janvier 2012, l'Université Henri Poincaré a été fusionnée dans l'Université de Lorraine avec d'autres Universités Lorraines. Ma composante d'affectation ESIAL a changé également son nom et est devenue TELECOM Nancy à partir de juin 2012.

Depuis ma nomination, j'effectue chaque année plus de 200 heures (HETD) d'enseignements (Cours, TD et TP) pour 8 modules d'enseignement différents pour des étudiants ingénieurs (Bac+3 à Bac+5) de TELECOM Nancy.

- UE-Mathématiques Appliquées pour l'Informatique (MAI)
- UE-Langage de programmation C et Shell (C-Shell)
- UE-Modèles des systèmes à événements discrets (MSED1)
- UE-Gestion de Production (GP)
- UE-Analyse fonctionnelle & simulation de flux (AFSF)
- UE-De la planification au pilotage de la production (PPP)
- UE-Evaluation de performances (EP)
- UE-Entreprise 4.0 (EN4)

Parmi ces 8 modules enseignés, je suis responsable de 5 modules d'enseignement (EP, AFSF, PPP, GP et EN4) dont tous les cinq ont été partiellement ou complètement créés à partir de mes investissements (rédaction de support de cours, création de TDs et TPs).

De plus, j'ai participé au montage et à l'enseignement de deux nouveaux modules MISC981 (Pratique de la maintenance prévisionnelle) et MISC982 (Pronostic pour la maintenance prédictive - PHM) pour le Master Ingénierie des Systèmes Complexes (étudiants de niveau M2) à la Faculté des Sciences et Technologies de l'UL.

J'encadre chaque année 3 ou 4 stagiaires de fin d'études et un groupe projet industriel de 3 ou 4 étudiants de TELECOM Nancy. Depuis 2013, j'encadre également chaque année 3 apprentis en 1A, 2A et 3A.

***Faits majeurs :***

- responsabilité de 5 modules d'enseignement à TELECOM Nancy
- création complète d'un module d'enseignement (élaboration de contenu des cours, TD, TP) intitulé "Evaluation de performances" ;
- participation à "l'amélioration" de deux modules d'enseignement (élaboration de contenu des TD et montage d'une manip de TPs) intitulés "analyse fonctionnelle & simulation de flux" et "de la planification au pilotage de la production" ;

- porteur du projet de création d'un nouveau module d'enseignement intitulé "entreprise 4.0" destiné aux étudiants en spécialisation SIE (systèmes d'information des entreprises) de TELECOM Nancy ;
- Participation au montage et à l'enseignement de deux nouveaux modules pour le Master Ingénierie des Systèmes Complexes de l'UL (modules en cohérence avec mes activités de recherche sur le pronostic)

J'ai été impliqué également dans la formation par apprentissage de TELECOM Nancy. Plus précisément, depuis sa création en 2013 j'enseigne à la fois les CMs, TDs et TPs pour un module complet (UE-Evaluation de performances) pour les étudiants en deuxième année de cette formation (environ 15 étudiants par année). De plus, je suis tuteur académique de 3 apprentis par année. Cette fonction a pour objectif d'accompagner les apprentis dans leurs formation et missions industrielles (ex., échange régulier avec les apprentis suivis et leurs maîtres d'apprentissage à la fois sur la formation effectuée à TELECOM Nancy et l'avancement sur les missions confiées au sein de l'entreprise d'accueil).

Un bilan de mes activités d'enseignement depuis 09/2011 est donné dans la figure 1.2.

Module	Niveau	2011/2012			2012/2013			2013/2014			2014/2015			2015/2016			2016/2017			2017/2018			2018/2019		
		CM	TD	TP	CM	TD	TP	CM	TD	TP	CM	TD	TP	CM	TD	TP	CM	TD	TP	CM	TD	TP			
EN4*	ING/MI																								
EP*	ING/MI		20	44	32	20	44	32	32	56	38	32	56	38	32	56	38	32	46	22	32	46	22		
AFSF*	ING/MI	6	10	10	6	10	10	6	10	10	6	10	10	6	12	10	6	12	14	6	12	14	14		
PPP*	ING/MI		6	16		6	16		6	16		6	16		6	16		6	16		6	16	16		
GP*	ING/L3	28	12	38	24	38	24	38	24	68	48	38	24	38	24	38	24	42	32						
MSED	ING/L3											10			10			10				22	8		
MAI	ING/L3	4	26	4	26	4	26	4	26																
C-Shell*	ING/L3											6	1												
MISC981	M2																				4	6			
MISC982	M2																					4	16		
Total		10	70	38	30	124	82	30	124	82	42	166	112	44	120	88	38	122	88	38	116	84	46	102	76

\* : Unité d'enseignement dont je suis le responsable

ING/MI : Formation d'ingénieurs/MI à TELECOM Nancy de l'UL

M2 : Formation de Master 2 en Ingénierie des Systèmes Complexes (ISC) à la Faculté des Sciences et Technologies de l'UL

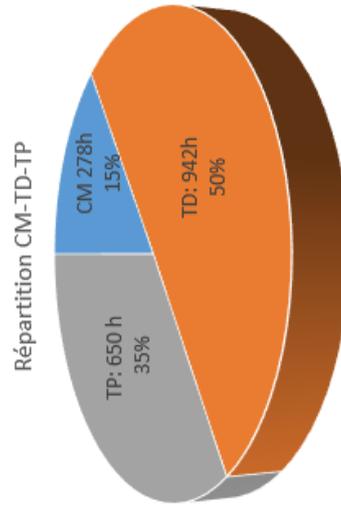


FIGURE 1.2 – Bilan des activités d'enseignement depuis 09/2011

## 1.4.2 Activités d'administration

Depuis 09/2015, je suis responsable pédagogique et administratif de la première année de la formation initiale de TELECOM Nancy (environ 130/140 étudiants par année). J'ai en charge principalement la préparation et la présidence des jurys, des échanges pédagogiques avec les étudiants et la direction de l'école sur la cohérence dans l'évaluation des contenus.

Je suis également membre du conseil de perfectionnement de TELECOM Nancy depuis septembre 2015.

## 1.5 Synthèse des activités de recherche

### 1.5.1 Présentation générale

Avant ma nomination comme McF, j'ai développé mes activités de recherche au sein du laboratoire de Modélisation et Sûreté des Systèmes (LM2S) de l'Université de Technologie de Troyes (UTT) en tant que doctorant, ATER et enseignant-chercheur. Depuis 01/09/2011, j'ai réalisé mes activités de recherche au sein de l'équipe SYMPA (Systèmes de Production Ambiants) du CRAN (CNRS UMR 7039) qui est devenu en 2013 le département ISET (Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques) du CRAN.

Globalement ma thématique de recherche traite du domaine de la maintenance et de la sûreté de fonctionnement. Mon objet de recherche est des systèmes complexes étant composés de composants multiples inter-connectés selon une structure complexe avec de fortes dépendances entre eux. Mes activités de recherche contribuent à assurer leur bon fonctionnement et optimiser leurs activités de maintenance en m'appuyant sur des outils scientifiques comme des processus stochastiques, des lois de probabilité et des algorithmes de prédiction/optimisation. En ce sens, mes travaux de recherche faits à l'UTT ont surtout cherché à analyser l'importance fiabiliste des composants dans un système à composants multiples par rapport à la défaillance du système global. Ceci doit permettre aux décideurs de prendre la bonne décision en maintenance. Dans la continuité de ces travaux, depuis mon intégration au CRAN, mes activités de recherche sont focalisées sur la thématique de modèles d'aide à la décision en maintenance pour des systèmes à dépendances multiples. Ces activités sont réalisées au sein du projet SdF-PHM2 (Sûreté de Fonctionnement, PHM et Maintenance) du département ISET (Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques). Mes activités de recherche au CRAN se structurent principalement autour de trois axes de contribution :

**Axe 1 : Modélisation de dégradation avec multiples facteurs d'influence.** L'objectif de cet axe de recherche est de développer des nouveaux modèles de dégradation

permettant de prendre en considération différents facteurs d'influence (la qualité d'actions de maintenance imparfaites, des interactions entre composants).

**Problématiques scientifiques adressées :** Dans cet axe, les problématiques majeures concernent :

- la modélisation de la qualité d'une action de maintenance imparfaite ;
- la modélisation des interactions intrinsèque et extrinsèque entre composants ;
- le modèle de dégradation permettant de prendre en compte des interactions d'états entre composants ;
- l'estimation des paramètres des modèles proposés avec les données réelles ou simulées.

**Originalité majeure :** L'originalité scientifique rattachée à cet axe de recherche est relative à l'intégration de facteurs d'influences dans le processus de dégradation, qui peut être modélisé par une combinaison de processus stochastiques. Ce dernier permet de fournir une meilleure prédiction sur la durée de vie résiduelle ou la date de défaillance d'un système et une meilleure planification de maintenance.

**Résultat scientifique :** Les travaux de recherche développés autour de cet axe se sont traduits à ce jour par 3 revues internationales indexées JCR<sup>6</sup> et 5 papiers de communication publiés dans des conférences internationales.

**Axe 2 : Développement d'indicateurs d'aide à la décision en maintenance.** L'objectif est de proposer des indicateurs permettant de synthétiser différentes informations ponctuelles relatives aux composants/systèmes (état courant/niveau de dégradation, efficacité énergétique) pour la prise de décision de maintenance.

**Problématiques scientifiques adressées :** Dans cet axe, les problématiques majeures concernent :

- la définition et formulation d'indicateurs aux différents niveaux d'abstraction (composant, système/fonction) d'un système mais non pas uniquement au niveau composant ;
- la prise en compte de différentes informations ponctuelles dans les indicateurs proposés ;
- le pronostic de l'évolution de ces indicateurs tenant compte de processus de dégradation, des paramètres d'influence, etc. C'est-à-dire la contextualisation du pronostic.

---

6. Journal Citation Reports

**Originalité majeure :** Une originalité majeure de cet axe est le fondement d'un indicateur, hors des indicateurs conventionnels, répondant à la demande de "développement durable". Cet indicateur est représentatif de la performance énergétique, appelé REEL (Remaining energy-efficient lifetime). Nous avons développé également une approche générique permettant d'utiliser des algorithmes de pronostic existant afin de prédire l'évolution de cet indicateur d'efficacité énergétique.

**Résultat scientifique :** Les travaux de recherche développés autour de cet axe se sont traduits à ce jour par 3 revues internationales indexées JCR et 5 papiers de communication publiés dans des conférences internationales.

Axe 3 : **Elaboration de stratégies de maintenance prévisionnelle et regroupement dynamique d'actions de maintenance.** L'objectif est d'élaborer des stratégies de maintenance applicables aux niveaux composants et/ou systèmes. Les stratégies développées doivent permettre de prendre en considération des différentes caractéristiques du système à maintenir (surveillances imparfaites, interactions multiples entre composants, structure complexe/distribuée, etc.) tout en respectant les exigences/contraintes liées à la fois au système cible (missions multiples, niveau de disponibilité) et au système de soutien (actions de maintenance imparfaite, nombre limité de réparateurs, etc.) dans un contexte dynamique (survenue d'opportunité de maintenance, de nouvelles contraintes, ...).

**Problématiques scientifiques adressées :** Dans cet axe, les problématiques majeures concernent :

- la modélisation et quantification des impacts des facteurs d'influence liés au système cible en décision de maintenance ;
- l'élaboration de règles de décisions adaptées permettant de sélectionner les actions de maintenance en respectant les exigences liées à la fois au système cible et au système de soutien ;
- un nombre important de variables décisionnelles (classiquement une variable pour chaque composant maintenu) à réduire et optimiser sans perdre l'optimalité du problème global ;
- la formalisation et le calcul des critères d'optimisations choisis.

**Originalité majeure :** L'originalité scientifique rattachée à ce travail porte sur l'optimisation de processus de décision en maintenance. En effet, nous avons proposé des règles de maintenance adaptées en se basant sur l'état actuel, la durée de vie utile/résiduelle des composants/système. Nous avons développé

des modèles de regroupement dynamique d'action de maintenance pour différents types de systèmes à composants multiples (structure en série, structure complexe/distribuée). Les modèles d'aide à la décision en maintenance développés permettent également de mettre à jour un planning de maintenance dans un contexte dynamique.

**Résultat scientifique :** Les travaux de recherche développés autour de cet axe se sont traduits à ce jour par 14 revues internationales indexées JCR et 18 papiers de communication publiés dans des conférences internationales.

**Outillages scientifiques :** Ces 3 axes de contributions font appel à des outillages scientifiques que je maîtrise et plus précisément :

- Des outils de modélisation : processus stochastiques (gamma, Wiener, Markov, Weibull, etc.) ; lois de probabilité (Normale, Béta, etc.) ;
- Des algorithmes d'optimisation : programme dynamique, algorithme génétique (GA), MULTIFIT. Pour les calculs, je développe à la fois des méthodes analytiques et des méthodes numériques (simulation Monte-Carlo) ;
- Des techniques spécifiques : Filtres particulaires, réseaux de neurones artificiels.

Pour n'importe quel de ces axes de recherche, les problématiques scientifiques sont abordées dans la communauté française GDR MACS CNRS et plus précisément les GT H2M (anciennement MACOD), S3 et aussi la communauté IMdR-SdF. Au niveau international, elles s'incrivent dans des thématiques fortes des différentes communautés comme ESRA (European Safety and Reliability Association), MIMAR (Modelling in Industrial Maintenance and Reliability), IFAC AMEST (Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology), IFAC SafeProcess (Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes) ainsi que la communauté savante PHM (Prognostics and Health Management) aussi bien au sein de PHM society<sup>7</sup> que de l'IEEE PHM<sup>8</sup>. De plus, des communautés de l'Asset management se réfèrent à tout ou partie de ces travaux. Par rapport à ces communautés, j'ai pris une part active à leurs activités en participant à de nombreux événements organisés (soumission de papiers, membre de comités de programme, président de sessions). De plus, j'ai fait partie des comités d'organisation de certaines conférences (ESREL2011, AMEST'16, MIMAR2016 (co-chair), MIMAR2018 (co-chair)).

Ces travaux de recherche ont fait l'objet aussi d'encadrement de doctorants (j'ai co-encadré 4 thèses (Hai-Canh Vu, Kim-Anh Nguyen, Anh Hoang et Ho-Si-Hung Nguyen)

---

7. <https://www.phmsociety.org>

8. <http://phmconf.org/>

dont 2 réalisées à l'UTT<sup>9</sup> (attestations officielles fournies par l'UL et l'UTT sont données dans l'annexe A) et je co-encadre actuellement 2 thèses (les thèses de Duc-Hanh Dinh et Minh-Tuan Truong ont démarré en Octobre 2018) et de Master (j'ai encadré et/ou co-encadré 5 Masters de recherche). Depuis septembre 2019, je co-encadre un doctorant brésilien au sein du CRAN pour une période de 6 mois. En outre, je collabore avec des chercheurs internes (au CRAN), des chercheurs externes nationaux (UTT/Troyes, INPG/Grenoble, ENIT) et des chercheurs externes internationaux (NTNU<sup>10</sup>/Norway, Salford university/UK, City university of Hongkong, Bocconi University/Italy).

La figure 1.3 donne un aperçu général sur les encadrements, les types de collaborations ainsi que la production scientifique en revues pour chaque axe de recherche abordé.

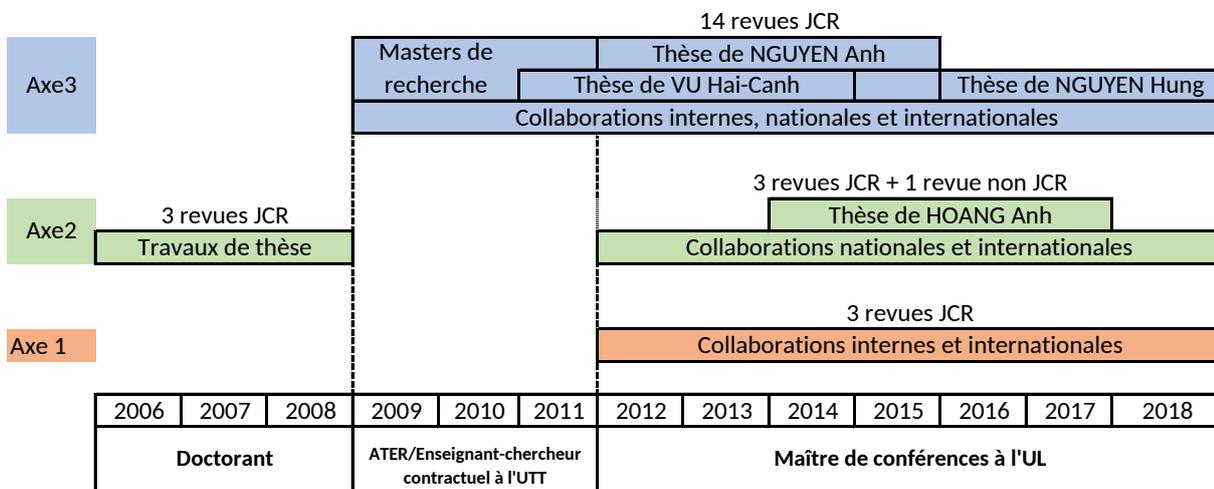


FIGURE 1.3 – Aperçu des trois axes de recherche avec les encadrements et les collaborations associés

Dans la globalité, mes travaux de recherche ont été publiés à ce jour dans 24 revues dont 23 revues internationales indexées JCR et 45 communications dans des conférences nationales et internationales avec actes et comité de lecture. Ces publications en revue sont majoritairement ciblées sur trois journaux de notre communauté RESS<sup>11</sup> (11 revues), JRR<sup>12</sup> (3 revues) et IEEE TR<sup>13</sup> (2 revues). Le tableau 1.1 donne la synthèse de mes publications par rapport à mon parcours professionnel alors que le tableau 1.2 synthétise mes revues publiées et en soumission, la liste exhaustive de ces publications est donnée en Section 1.7.

9. J'ai initié ces deux thèses financées par le gouvernement Vietnamien à l'UTT avant mon intégration au CRAN

10. Norwegian University of Science and Technology

11. Reliability Engineering & System Safety, impact factor 4.13

12. Journal of risk and reliability, impact factor 1.37

13. IEEE Transactions on Reliability, impact factor 2.72

Type de production	Avant nomination	Depuis nomination	Total
<b>Revues internationales JCR</b>	3	20	23
Revues internationales JRC en soumission	0	4	4
Revue nationale	0	1	1
Conférences internationales avec actes	7	38	45
Conférences nationales avec actes	1	0	1
Direction d'ouvrages et de proceedings	0	3	3
Book chapters	0	4	4
Contrats de recherche	1	3	4
Rapports de thèse et DEA	2	0	2

TABLE 1.1 – Bilan des publications

Nom de revue JCR	IF <sup>14</sup>	Art. publiés	Art. soumis	1er auteur	2ième auteur
<b>Reliability Engineering and System Safety</b>	4.13	11	1	6	6
<b>Journal of Risk and Reliability</b>	1.37	3	0	2	1
<b>IEEE Trans. on Reliability</b>	2.72	2	0	0	2
Journal of Cleaner Production	5.65	1	0	0	1
European Journal of Operational Research	3.42	1	0	1	0
CIRP Annals Manufacturing Technology	3.33	1	0	0	1
International Journal of Systems Science	2.18	1	0	0	1
IMA Journal of Management Mathematics	1.27	1	0	0	1
Quality and reliability engineering international	1.40	1	0	0	1
IEEE Trans. on Automation Science and Engineering	3.66	1	0	0	1
International Journal of Production Economics	4.40	0	1	0	0
ISA Transactions	5.17	0	1	0	1
<b>Total</b>		<b>23</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>16</b>

TABLE 1.2 – Bilan des revues publiées et en soumission

Le figure 1.4 donne le nombre de citations sur la base de GoogleScholar par rapport à mes travaux de recherche publiés.

---

14. Impact facteur relevé en 2018.

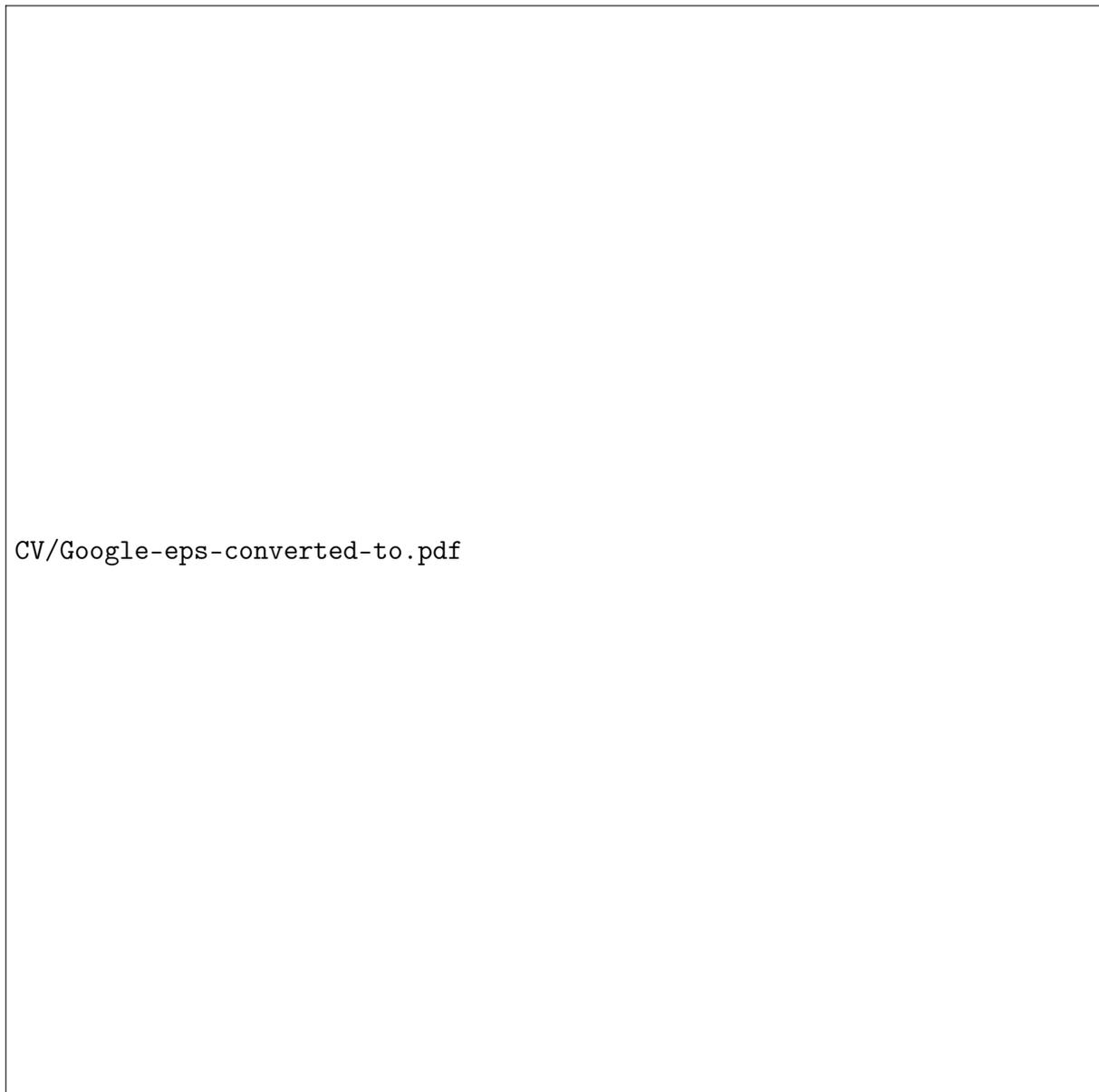


FIGURE 1.4 – Nombre de citations selon GoogleScholar en Septembre 2019

La présentation détaillée de mes activités de recherches est donnée dans la partie II.

## 1.5.2 Activités d'encadrement de la recherche

### Synthèse des encadrements scientifiques

Depuis 2011, j'ai co-encadré 4 thèses soutenues et 2 en cours pour un taux d'encadrement total de 300%. J'ai également co-supervisé 2 post-doctorants et 5 Master Recherche. Le tableau 1.3 donne une synthèse de ces encadrements.

Type d'encadrement	Nombre total	Dont en cours	Pourcentage total d'encadrement
Post-doctorant	2	0	100%
Thèse	4 avec ACT <sup>15</sup> +2	2	300%
Master 2 Recherche	5	0	300%

TABLE 1.3 – Synthèse des encadrements scientifiques

### Liste des post-doctorants encadrés

PD1. **Hai-Canh Vu**, du 02/2017 au 02/2018

*Sujet* : Modèles et algorithmes avancés pour le processus de pronostic

*Encadrement* : 50% Alexandre Voisin - 50% Phuc Do

*Production scientifique* : 3 communications dans des conférences internationales (C40C40, C36 et C35)

*Financement* : LabCOM PHM-Factory

PD2. **Bin Liu**, du 09/2017 au 12/2017

*Sujet* : Algorithmes d'apprentissage pour la prédiction de défaillance

*Encadrement* : 50% Pr.Benoit Iung - 50% Phuc Do

*Production scientifique* : 1 revue internationale indexée JCR (R22) et 1 communication dans une conférence internationale (C41)

*Financement* : LabCOM PHM-Factory

### Liste des thèses soutenues

TH1. **Hai-Canh Vu**, du 04/2011 au 03/2015

*Titre de la thèse* : Stratégies de regroupement pour la maintenance des systèmes à composants multiples avec structure complexe

*Ecole* : Ecole doctorale ST de l'Université de Technologie de Troyes

*Encadrement* : 50% Pr.Anne Barros (UTT) - 50% Phuc Do<sup>16</sup>

*Financement* : Bourse du gouvernement vietnamien + complément fonds propres de l'UTT

*Jury* : rapporteurs (Pr.Bruno Castanier et Dr.HDR Laurent Bouillaut), examinateurs (Pr. Benoit Iung, Pr. Antoine Grall, Pr. Anne Barros et Dr. Phuc Do), invité (Pr. Christophe Bérenguer).

*Production scientifique* : 4 revues internationales (R18, R11, R9 et R7) et six com-

15. Autorisation à Codiriger une Thèse

16. Dérogation d'HDR du CR du CSR 101116 de l'UTT

munications dans des conférences internationales (C28, C26, C21, C16, C13 et C10)

*Devenir du docteur diplômé* : Enseignant-chercheur à l'UTT

TH2. **Kim-Anh Nguyen**, du 10/2011 au 09/2015

*Titre de la thèse* : Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composant avec structure complexe

*Ecole* : Ecole doctorale ST de l'Université de Technologies de Troyes

*Encadrement* : 50% Pr. Antoine Grall - 50% Phuc Do<sup>17</sup>

*Financement* : Bourse du gouvernement vietnamien + complément fonds propres de l'UTT

*Jury* : rapporteurs (Pr. Pierre Dehombreux et Pr. Christophe Bérenguer), examinateurs (Dr.HDR Eric Zamai, Pr. Mitra Fouladirad, Pr. Antoine Grall et Dr. Phuc Do).

*Production scientifique* : 3 revues internationales (R15, R12 et R6) et 3 communications dans des conférences internationales (C20, C17 et C15)

*Devenir du docteur diplômé* : Maître de conférences à l'Université de Danang, Vietnam

TH3. **Anh Hoang**, du 01/2014 au 07/2017

*Titre de la thèse* : Energy efficiency-based Prognostics for maintenance of industrial systems

*Ecole* : Ecole doctorale IAEM de l'Université de Lorraine

*Encadrement* : 50% Pr. Benoit Iung - 50% Phuc Do<sup>18</sup>

*Financement* : Bourse du gouvernement vietnamien + complément fonds propres du CRAN.

*Jury* : rapporteurs (Pr. Mitra Fouladirad et Pr. Christophe Bérenguer), examinateurs (Pr. Rossi Setchi, Pr. Jay Lee, Pr. Olivier Senechal, Pr. Benoit Iung et Dr. Phuc Do).

*Production scientifique* : 3 revues (R17, R14, RN1) dont 2 revues internationales indexées JCR et 4 communications dans des conférences internationales (C31, C27, C24 et C23)

*Devenir du docteur diplômé* : Maître de conférences à l'Institut National Polytechnique de Hanoi, Vietnam

TH4. **Ho-Si-Hung Nguyen**, du 04/2016 au 09/2019

*Titre de la thèse* : Dynamic grouping maintenance for geographically dispersed production systems

*Ecole* : Ecole doctorale IAEM de l'Université de Lorraine

---

17. Dérogation d'HDR du CR du CSR 110526 de l'UTT

18. ACT accordée le 15 mai 2014

*Encadrement* : 50% Pr.Benoit Iung - 50% Phuc Do<sup>19</sup>

*Financement* : Bourse du gouvernement vietnamien + complément fonds propres du CRAN

*Jury* : rapporteurs (Pr. Anne Barros et Pr. Bruno Castanier), examinateurs (Pr. Antoine Grall, Dr. Thi-Phuong-Khanh Nguyen, Pr. Benoit Iung et Dr. Phuc Do), invité (Dr. Hai-Canh Vu).

*Production scientifique* : 1 revue internationale indexée JCR (R20) et 2 communications dans des conférences internationales (C39 et C34).

*Devenir du docteur diplômé* : Maître assistant à l'Université de Danang, Vietnam

### Liste des thèses en cours

TH5. **Duc-Hanh Dinh**, du 01/10/2018 au 30/09/2021

*Titre de la thèse* : Contribution à la maintenance prévisionnelle d'un système de production à composants multiples avec dépendances

*Ecole* : Ecole doctorale IAEM de l'Université de Lorraine

*Encadrement* : 50% Pr.Benoit Iung - 50% Phuc Do

*Financement* : Contrat doctoral IAEM (Université de Lorraine)

*Production scientifique* : 1 communication dans une conférence internationale (C42) + 1 soumission en revue (RS4)

TH6. **Minh-Tuan Truong**, du 01/10/2018 au 30/09/2021

*Titre de la thèse* : Méthodologie d'optimisation de plan de test pour l'évaluation de la fiabilité de composants optoélectroniques

*Ecole* : Ecole doctorale IAEM de l'université de Lorraine

*Encadrement* : 50% Pr.Benoit Iung - 50% Phuc Do

*Financement* : CEA LETI Grenoble

*Partenariat industriel* : Cette thèse a été débutée dans le cadre d'une collaboration avec le CEA LETI de Grenoble (encadrement industriel : Dr. Laurent Mendizabal)

*Production scientifique* : 1 communication dans une conférence internationale (C44)

### Liste des Masters encadrés

MR1. **Khanh LeSon**, du 03/2009 au 09/2009 (UTT)

*Sujet* : Modélisation de la dégradation et du pronostic pour l'aide à la décision en maintenance

*Encadrement* : 50% Pr.Anne Barros (UTT/NTNU) - 50% Phuc Do

---

19. ACT accordée le 06 avril 2017

- MR2. **Tuan-Anh Bui**, du 03/2009 au 09/2009 (UTT)  
*Sujet* : Modélisation de la maintenance conditionnelle à base de modèles graphiques probabilistes  
*Encadrement* : 100% Phuc Do
- MR3. **Bach-Nguyen Hoang Bui**, du 03/2010 au 09/2010 (UTT)  
*Sujet* : Politique de maintenance conditionnelle imparfaite pour un système à dégradation  
*Encadrement* : 50% Pr.Christophe Bérenguer (UTT/Gipsa-Lab) - 50% Phuc Do
- MR4. **Quoc Anh Tran**, du 03/2010 au 09/2010 (UTT)  
*Sujet* : Stratégies de regroupement dynamique des opérations de maintenance préventive  
*Encadrement* : 50% Pr.Anne Barros (UTT/NTNU) - 50% Phuc Do
- MR5. **Abbas Hamze**, du 04/2016 au 09/2016 (CRAN, UL)  
*Sujet* : Analyse et synthèse d'une méthode de diagnostic/pronostic au sein d'un système hydraulique de contrôle/commande tolérant aux fautes  
*Encadrement* : 50% Christophe Simon (CRAN) - 50% Phuc Do

### Co-production avec les docteurs diplômés

- 9 articles dans des revues d'audience internationale indexées JCR
- 1 article dans des revues d'audience nationale
- 15 articles dans des conférences internationales avec actes et comité de lecture

### 1.5.3 Rayonnement scientifique

#### Participation à des jurys de thèse

- 2015 : *Examineur*, à la demande du Pr. Christophe Bérenguer, pour la thèse de Romain Lesobre à l'école doctorale EEATS de l'Université de Grenoble  
*Titre de thèse* : Modélisation et optimisation de la maintenance et de la surveillance des systèmes multi-composant - Application à la maintenance et à la conception de véhicules industriels  
*Date de soutenance* : 23 Mars 2015
- 2017 : *Examineur*, à la demande du Pr. Antoine Grall (UTT), pour la thèse de Hajar Cherkaoui à l'école doctorale ST de l'UTT  
*Titre de thèse* : Vers une prise de décision robuste en maintenance conditionnelle  
*Date de soutenance* : 21 Decembre 2017

### Participation au comité de suivi de thèses

- Participation au comité de suivi, à la demande du Pr. Christophe Bérenguer, pour la thèse de Elodie Robert à l'école doctorale EEATS de l'Université de Grenoble, démarrée en novembre 2016  
*Titre de thèse* : Gestion de l'état de santé de véhicules pour la maintenance de flotte : prise en compte des contraintes opérationnelles et optimisation conjointe des maintenances et des missions

### Invitation

- 2015 : Chercheur invité d'une semaine à l'Université de Salford (UK) en juin 2015, invitation du Pr. Philip Scarf.
- 2016 : Chercheur invité d'une semaine à l'Université de Salford (UK) en mai 2016, invitation du Pr. Philip Scarf.
- 2016 : Chercheur invité d'une semaine à NTNU (Norwegian University of Science and Technology Trondheim, Norvège) en juin 2016, invitation du Pr. Anne Barros.
- 2019 : Chercheur invité du 08 avril au 20 avril à l'Université fédérale du Pernambouc (Brésil) dans le cadre du projet de collaboration CAFES-COFECUB.

### Accueil de chercheurs étrangers

- 2014 : Accueil du Pr. Phil Scarf venant de l'Université de Salford (UK)  
*Période* : du 19 au 24 janvier 2015  
*Sujet du travail commun* : Modélisation de dégradation avec interactions
- 2018 : Accueil du Pr. Li Li venant de l'Université de Tongji, China  
*Période* : du 10 octobre au 22 novembre 2018  
*Sujet du travail commun* : Optimisation de la maintenance par l'approche guidée par des données.
- 2019 : Accueil du Pr. Cristiano Cavalcante venant de l'Université fédérale du Pernambouc (Brésil) dans le cadre du projet CAFES-COFECUB  
*Période* : du 29 Avril au 12 Mai 2019  
*Sujet du travail commun* : Modèles de maintenance pour l'industrie 4.0
- 2019 : Accueil du doctorant brésilien Lucas ALVES RIBEIRO venant de l'Université fédérale du Pernambouc (Brésil)  
*Période* : 6 mois (de Septembre 2019 à Février 2020)  
*Sujet du travail commun* : Modèles de maintenance sélective pour un système à composants multiples.

## Expertise projet

2018 : Expert auprès de l'ANR, à la demande Aurélien Gaufrès, pour l'évaluation d'un projet de recherche PRC (projet de recherche collaborative), CES 10 - Usine du futur : homme, organisation, technologies.

## Participation aux comités d'organisation de conférences

- Conférence ESREL2011 (20th European Safety and Reliability Annual Conference), September 18-22, 2011 Troyes, France
- Conférence QUALITA2015 (11ème Congrès International Pluridisciplinaire en Qualité, Sécurité de Fonctionnement et Développement Durable), March 17-19, 2015 Nancy, France
- Co-chair de la conférence MIMAR2016 (9th International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability), 12-14 July, 2016 London, UK
- IFAC AMEST'16 (3rd IFAC AMEST Workshop on Maintenance Technologies for Performance Enhancement), October 19-21, 2016 Biarritz, FRANCE.
- Co-chair de la conférence MIMAR2018 (10th International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability), 13-16 June, 2018 Manchester, UK.
- Co-chair du workshop doctoral international (Université de Lorraine - Université de Tongji (Chine)), 26 doctorants dont 15 doctorants chinois, 11-12 June, 2019 Nancy, France.
- Co-chair de la conférence MIMAR2020 (11th International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability), Nottingham, July 2020.

## Participation aux comités de programme de conférences

- The 25th European Safety and Reliability Annual Conference (ESREL2015), September 7-10, 2015, Zurich, Switzerland.
- The first International Conference on Reliability Systems Engineering & 2015 Prognostics and System Health Management Conference-Beijing (2015 ICRSE & PHM-Beijing), October 21-23, 2015, Beijing, China.
- The 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability (ICAMER2016), Vietnam.
- The 27th European Safety and Reliability Annual Conference (ESREL2017), June 18-22, 2017, Portoroz, Slovenia.

- The 2nd International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE 2017), July 10-12, 2017, Beijing, China.
- The 3rd International Conference on Mathematical Techniques in Engineering Applications (ICMTEA2018), December 7-8, Dehradun, India.
- The 29th European Safety and Reliability Annual Conference (ESREL2019), Hannover, Germany, 22 - 26 September 2019.
- The 30th European Safety and Reliability Annual Conference (ESREL2020-PSAM15), Venice, Italy, 21 - 26 June 2020.

### **Responsabilité éditoriale**

- 2016 : Phil Scarf, Shaomin Wu and Phuc Do. Proceedings of the 9th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability, 12-14 July, 2016 London, UK
- 2017 : Co-Guest editor with Shaomin Wu (University of Kent, UK) of the Special Issue on Maintenance Modelling, *Reliability Engineering and System Safety*, Volume 168, December 2017 (32 published papers selected from 130 submissions).
- 2018 : Phil Scarf, Shaomin Wu and Phuc Do. Proceedings of the 10th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability, 13-16 June, 2018 Manchester, UK

### **Membre du comité éditorial de revue**

- International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences (IJMEMS<sup>20</sup>), INDIA

### **Relecture pour des journaux ou des conférences**

- Reliability Engineering & System Safety (*top 10 reviewers en 2018*)
- Journal of Risk and Reliability (*2/3 papers per year*)
- IEEE Transactions on Reliability (*1/2 papers per year*)
- European Journal of Operational Research (*1/2 papers per year*)
- International Journal of Production Research (*1/2 papers per year*)
- Computers & Industrial Engineering (*1/2 papers per year*)
- Computers & Industrial Engineering (*1/2 papers per year*)

---

20. <http://www.ijmems.in>

- Journal of Intelligent Manufacturing (*3 papers*)
- Mathematical Methods of Operations Research (*1 paper*)
- International Journal of Reliability and Safety (*1 paper*)
- Journal of Quality and Reliability Engineering (*1 paper*)
- Applied Mathematical Modelling (*1 paper*)
- Applied Stochastic Models in Business and Industry (*1 paper*)
- Procedia CIRP (*1 paper*)
- Computers in Industry (*1 paper*)
- Journal of Process Mechanical Engineering (*1 paper*)
- Materials (*1 paper*)
- International conferences : ESREL(from 2008 to 2019), IFAC A-MEST (2014, 2016), PHM Society (from 2012 to 2017), PHM IEEE (from 2013 to 2018), IFAC Safeprocess (2012, 2014, 2016), IFAC word congress (depuis 2016)
- Review manager : PHM Europe 2016, PHM US 2017, PHM Europe 2018

### **Prix et des distinctions**

- Un papier de conférence (C37) nommé comme le meilleur papier (best paper award) pour la conférence IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, IEEE-PHM2017 Juin 2017, Dallas, Texas, United States (titre du papier : *Diagnosis for systems with multi-component wear interactions*).
- Deux papiers de conférences (C25, C12) nommés comme un des quatre papiers finalistes pour un Award de meilleur papier pour la conférence Safeprocess2015 et PHM Society 2012 respectivement.
- Un article (R12) s'est inscrit dans la liste des articles les plus cités (top 3) du journal RESS sur Elsevier pour la période 2015-2018. R12 s'est inscrit également dans la liste des articles les plus téléchargés pendant 6 mois.
- Un article (R5) est cité comme des travaux de recherche marquants du CRAN 2013 et du GIPSA-Lab 2013.
- Un article (R14) est cité comme des travaux de recherche marquants du CRAN 2017.
- Un article (R16) est cité comme des travaux de recherche marquants du CRAN 2018.
- Un article (R22) est cité comme des travaux de recherche marquants du CRAN 2019.

### **Publications avec des chercheurs étrangers**

- 3 articles publiés (R22, R19, R16) dans des revues internationales indexées JCR
- 2 soumissions (RS3 et RS1) dans des revues internationales indexées JCR
- 6 communications dans des conférences internationales avec actes et comité de lecture

### **Participation à des groupes de travail et sociétés savantes**

- Communauté nationale : GdR MACS (S3, H2M/ MACOD), IMdR-SdF
- Communauté internationale : ESRA, MIMAR, IFAC, PHM society, PHM IEEE. J'ai d'ailleurs fait plusieurs présentations à des réunions/conférences de ces communautés.
- Président de sessions dans des conférences PHM Italie 2013, ESREL 2015, MIMAR2016

## **1.5.4 Participation à des projets de recherche**

### **Contrats industriels :**

- Participation à un contrat de collaboration avec Electricité de France (EDF), 2003-2004 (participation importante au développement d'un facteur d'importance fiabiliste)
- Participation à un contrat de collaboration, dans le cadre IMdR, avec PrédicT et Sector "Health and Usage Monitoring System (HUMS), Contrat S15309-R01H, 2017 (participation importante à l'étude bibliographique autour des méthodes avancées du pronostic);
- Implication forte à un contrat de collaboration, dans le cadre IMdR, avec PrédicT et Sector "Etude de faisabilité relative à la mise en oeuvre d'une solution de maintenance prédictive", contrat S18143-P01B, 2018. (Co-responsable scientifique avec Pr. Benoit Iung);
- Implication forte à un contrat de collaboration avec Renault automobile "développement d'un outil de lissage des charges de maintenance", 2018/2019 (responsable du développement de l'algorithme et de sa mise en oeuvre);

### **Projets sur financements institutionnels :**

- Participation à deux projets financés par le GIS 3SGS

1. SAFEE - Systèmes dynamiques tolérants aux Fautes et Fiabilités. (2011-2012, partenaires : CRAN, LAGIS, ICD)
  2. APPRODYN - APPROches de la fiabilité DYNAMique pour modéliser des systèmes critiques (2010-2012, partenaire : EDF R&D/MRI, CRAN, INRIA Bordeaux Sud-Ouest, et ICD (UTT))
- Participation au projet européen MoDe - Maintenance à la demande, 8 partenaires européens, 2009-2012. Mon rôle a été de développer une tâche dans le workpackage confié à l'UTT sous la responsabilité du Pr. Christophe Bérenguer.
  - Participation au projet VITTEL (le Vieillissement dans la sûreté de fonctionnement : Évaluation de son impact sur la compétitivité et la fiabilité de l'usine du futur) financé par la région de Lorraine, 2016-2017. Ma contribution a été la modélisation de dégradation avec un processus de gamma.
  - Participation active au laboratoire commun LabCOM PHM Factory ANR-15-LCV1-0005-01, financé par l'ANR en collaboration avec PrédicT, 2015-2018. Mon rôle a été surtout de porter un des trois axes de recherche (développement d'algorithmes de pronostic et ses mises en oeuvre) et encadrer deux postdoctorants.
  - Co-responsable scientifique du projet CAPE-COFECUB "vers un système autonome-intelligent pour l'optimisation de maintenance dans un contexte de l'industrie 4.0" (projet Ph950/19) co-financé par l'ANR en collaboration avec l'équipe UFPE (Université fédérale du Pernambouc), Brésil, 2019-2022.

### 1.5.5 Responsabilités scientifiques

- Responsable de la tâche "modèles de maintenance" (côté UTT) du projet européen MoDe (Maintenance on demand)<sup>21</sup>, 2009-2011
- Co-responsable scientifique pour un dépôt ANR 2014 (projet EPISODE "Energy efficiency-based Prognostics to maintain Services performances Of industrial systems"; partenaires : CRAN, GIPSA-Lab et LGP-ENIT), projet non accepté.
- Porteur d'un dépôt ANR2016 (projet EPISTEME "Energy efficiency-based Prognostics and decision-making To control sustainable factory performances", partenaires : CRAN, GIPSA-Lab et LGP-ENIT), projet non accepté.
- Co-responsable scientifique pour un dépôt ANR/RGC Joint Research Scheme 2019 (projet EPIRUS "Event-based Predictive analytics to Improve prognostics and health management (PHM) of industrial Systems"; partenaires : CRAN, CityU Hong-Kong), projet non accepté.

---

21. <https://fp7-mode.eu/>

- Co-responsable scientifique pour un contrat de collaboration avec Renault "Lissage de charges de la maintenance", projet terminé en 2018.
- Co-responsable scientifique pour un contrat de collaboration avec Prédicit et Sector "Etude de faisabilité relative à la mise en oeuvre d'une solution de maintenance prédictive", contrat S18143-P01B, projet terminé en 2018.
- Co-responsable scientifique pour un dépôt CAPE-COFECUB 2018 "Vers un système autonome-intelligent pour l'optimisation de maintenance dans un contexte de l'industrie 4.0" en collaboration avec un partenaire brésilien UFPE (Université fédérale du Pernambouc), projet accepté et démarré en janvier 2019.
- Co-responsable scientifique pour un dépôt ANR/RGC Joint Research Scheme 2019 (projet "Discrete Event Data-based Prognostics and Health Management for Industrial Systems" ; partenaires : CRAN, CityU Hong-Kong), projet en file d'attente du côté Hong-Kong.
- Porteur d'un dépôt de projet "Advanced prognostics models for a multi-component system with stochastic dependence and sensor data uncertainty" (ref.NSFC6191101206 ; partenaires : CRAN, Tongji university), projet déposé en Mars 2019 et évalué en Octobre 2019.

## 1.6 Synthèse du projet de recherche et d'enseignement

Mon projet de recherche s'inscrit dans la continuité de mes activités de recherche précédentes mais avec une évolution importante au regard de l'objet de recherche adressé (systèmes de production cyberphysiques-CPPS) dans le contexte de l'industrie du futur. Dans ce sens, mon projet de recherche porte sur deux axes de recherche forts :

**Axe 1 :** *Modèles de pronostic de défaillance avec dépendances multiples*

**Axe 2 :** *Vers un système autonome de planification de la maintenance*

L'axe 1 possède un lien fort avec mes travaux de recherche réalisés et peut être mené prioritairement à court et moyen terme. Trois actions concrètes sont prévues : (P1)-construction de modèles de dégradation avec dépendances multiples entre composants ; (P2)-développement d'approches de pronostic avec considération de dépendances multiples et d'erreurs de mesure ; (P3)-extension et déploiement d'approches de pronostic au niveau composant.

L'axe 2 est une piste de recherche innovante et nécessite des investigations rigoureuses pour pouvoir fixer les actions de recherche plus précisément. Néanmoins, deux pistes de recherche sont prévues : (M1)-développement de modèles d'aide à la décision autonome

en maintenance ; (M2)-développement d'une plate-forme expérimentale pour la validation des approches développées.

Mon projet d'enseignement porte sur le transfert de mes résultats de recherche dans les enseignements existants à TELECOM Nancy (formation d'ingénieurs) et à la Faculté des Sciences et Technologies (programme du Master ISC-Ingénierie des Systèmes Complexes). Dans ce sens, mon projet d'enseignement s'appuie non seulement sur l'amélioration de deux unités d'enseignement existantes (UE-Evaluation de performances et UE-Entreprise 4.0) dans un contexte de l'industrie du futur mais aussi sur la création de nouveaux travaux pratiques sur des technologies avancées de l'industrie du futur (capteurs intelligents, technologies prédictives, apprentissage automatique).

La présentation détaillée de mon projet de recherche et d'enseignement est donnée dans le chapitre 6.

## 1.7 Liste des publications

Je dresse ici la liste exhaustive des publications auxquelles j'ai contribué. Mon nom y figure en gras. Les publications faisant référence à des travaux avec des étudiants encadrés sont reconnaissables par le fait que les étudiants encadrés sont soulignés.

### Revue internationale indexée JCR (23)

- R23. **Phuc DO** and Christophe BERENGUER. Conditional reliability-based importance measures. *Reliability Engineering & System Safety*. Volume 193, January, 2020.
- R22. Bin LIU, **Phuc DO**, Benoit IUNG and Min XIE. Stochastic filtering approach for condition-based maintenance considering sensor degradation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. Accepted in May 2019.
- R21. Khanh T.P NGUYEN, **Phuc DO**, Tuan HUYNH, Christophe BERENGUER and Antoine GRALL. Joint optimization of monitoring quality and replacement decisions in condition-based maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*. Volume 189, Pages 177-195, 2019.
- R20. Ho-Si-Hung NGUYEN, **Phuc DO**, Hai-Canh VU and Benoit IUNG. Dynamic maintenance grouping and routing for geographically dispersed production systems. *Reliability Engineering & System Safety*. Volume 185, Pages 392-404, 2019.
- R19. **Phuc DO**, Roy ASSAF, Phil SCRAF and Benoit IUNG. Modelling and application of condition-based maintenance for a two-component system with stochastic and economic dependencies. *Reliability Engineering & System Safety*. Volume 182, Pages 86-97, 2019.

- R18. Hai-Canh VU, **Phuc DO**, Anne BARROS. A study on the impacts of maintenance duration on dynamic grouping modeling and optimization of multi-component systems. *IEEE Transactions on Reliability*, Volume 67, Issue 3 , September 2018, pp. 1377-1392.
- R17. **Phuc DO**, Anh HOANG, Benoit IUNG and Hai-Canh VU. Energy efficiency for condition-based maintenance decision-making : Application to a manufacturing platform. *Journal of Risk and reliability*, Volume 232 issue 4, August 2018, pp. 425-434.
- R16. Roy ASSAF, **Phuc DO**, Samia NEFTI-MEZIANI and Philip SCARF. Wear rate-state interactions within a multi-component system : a study of a gearbox accelerated life testing platform. *Journal of Risk and reliability*, Volume 232 issue 4, August 2018, pp. 379-388.
- R15. Kim-Anh NGUYEN, **Phuc DO** and Antoine GRALL (2017). Joint predictive maintenance and inventory strategy for multi-component systems using Birnbaum's structural importance. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 168, December 2017, pp.249-261
- R14. Anh HOANG, **Phuc DO**, Benoit IUNG. Energy efficiency performance-based prognostics for aided maintenance decision-making : Application to a manufacturing platform. *Journal of Cleaner Production*, Volume 142, Part 4, 20 January 2017, pp.2838-2857
- R13. Benoit IUNG, **Phuc DO**, Eric LEVRAT and Alexandre VOISIN. Opportunistic maintenance based on multi-dependent components of manufacturing systems. *CIRP Annals Manufacturing Technology* Volume 65, Issue 1, 2016, pp.401-404
- R12. Kim-Anh NGUYEN, **Phuc DO** and Antoine GRALL. Multi-level predictive maintenance for multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 144, December 2015, pp.83-94
- R11. Hai-Canh VU, **Phuc DO** and Anne BARROS. A Stationary Grouping Maintenance Strategy Using Mean Residual Life and the Birnbaum Importance Measure for Complex Structures. *IEEE Transactions on Reliability*, Volume : 65, Issue : 1, March 2016, pp.2017-234
- R10. **Phuc DO**, Hai-Canh VU, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Maintenance grouping for multi-component systems with availability constraints and limited maintenance teams. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 142, September 2015, pp.56-67
- R9. Hai-Canh VU, **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Maintenance planning and dynamic grouping for multi-component systems with positive

and negative dependencies. *IMA journal of Management of Mathematics*, Volume 23, issue 2, April 2015, pp.145-170

- R8. **Phuc DO**, Alexandre VOISIN, Eric LEVRAT and Benoit IUNG. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 133, January 2015, pp22-32
- R7. Hai-Canh VU, **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Maintenance grouping strategy for multi-component systems with dynamic contexts. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 132, December 2014, pp.233-249
- R6. Kim-Anh NGUYEN, **Phuc DO** and Antoine GRALL. Condition-based maintenance for multi-component systems using importance measure and predictive information. *International Journal of Systems Science*, Volume 1, Issue 4, November 2014, pp.228-245
- R5. **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER, Keomany BOUVARD and Florent BRISSAUD. Dynamic grouping maintenance strategy with time limited opportunities. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 120, December 2013, pp.51-59
- R4. **Phuc DO** and Christophe BERENGUER. Condition-based maintenance with imperfect preventive repairs for a deteriorating production system. *Quality and Reliability Engineering International*, Volume 26, Issue 6, 2012, pp.624-633
- R3. **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. From differential to difference importance measures for Markov reliability models. *European Journal of Operational Research*, Volume 204, Issue 3, 1 August 2010, pp.513-521
- R2. **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Reliability importance analysis of Markovian systems at steady state using perturbation analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 93, Issue 11, November 2008, pp.1605-1615
- R1. **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Importance measure on finite time horizon and application to Markovian multi-state production systems. *Journal of Risk and Reliability*, Volume 222, Issue 3, 2008, pp.449-461

## Revue nationale (1)

- RN1. Anh HOANG , **Phuc DO**, Benoit IUNG, Eric LEVRAT and Alexandre VOISIN. Considération d'un indicateur d'efficacité énergétique pour la prise de décision en maintenance : De sa définition au fondement de son pronostic. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Volume 49/4-5, Septembre 2016, pp.559-578.

### Revues internationales en soumission (4)

- RS4. Duc-Hanh DINH, **Phuc DO** and Benoit Iung. Degradation modelling and reliability assessment for a multi-component system with structural dependence. *Computer and industrial engineering*. Submitted in October 2019.
- RS3. Roy ASSAF, **Phuc DO**, Samia NEFTI-MEZIANI and Philip SCARF. Diagnostics and Prognostics for Multi-Component Systems with Wear Interactions : Application to a Gearbox Platform. *ISA Transactions*. Submitted in October 2019.
- RS2. Hai-Canh VU, **Phuc DO**, Mitra FOULADIRAD and Antoine GRALL. Flexible maintenance approach for multi-component redundant systems with various types of maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*. Submitted in July 2019.
- RS1. Bin LIU, Xiujie ZHAO Yiqi LIU and **Phuc DO**. Maintenance Optimization for Multi-dimensional Degraded Systems Under Imperfect Inspection. *International Journal of Production Economics*. Submitted in February 2019.

### Direction d'ouvrage et de proceedings (3)

- DO3. Phil SCARF, Shaomin WU and **Phuc DO**. *Proceedings of the 10th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability*, Manchester, UK 13-16 June, 2018
- DO2. Shaomin WU and **Phuc DO**. Guest editorial : Special issue on Maintenance Modelling. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 168, December 2017, pp.1-4
- DO1. Phil SCARF, Shaomin WU and **Phuc DO**. *Proceedings of the 9th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability*, London, UK 12-14 July, 2016.

### Conférences internationales avec comité de lecture (45)

- C45. **Phuc DO**, Benoit IUNG and Cristiano CAVALCANTE. Reliability and maintenance cost forecasting for systems with multistate components using artificial neural networks. *4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*, Rome, Italy, 20 - 22 November 2019.
- C44. Minh-Tuan TRUONG, **Phuc DO**, Laurent MENDIZABAL and Benoit IUNG. Reliability assessment of optoelectronic systems with stochastic interactions under accelerated degradation testing. *4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*, Rome, Italy, 20 - 22 November 2019.

- C43. **Phuc DO**, Christophe BENRENGUER, Emanuele BORGONOVO. Remaining useful life-based importance measure. *29th European Safety and Reliability Conference (ESREL2019)*, Hannover, Germany, 22 - 26 September 2019.
- C42. Duc-Hanh DINH, **Phuc DO**, Benoît IUNG. Modeling the Impact of Disassembly Operations on the Degradation Process of Multi-component Systems. *11th International Conference on Mathematical Methods in Reliability*, MMR 2019, June 2019, Hong-Kong, China.
- C41. Bin LIU, **Phuc DO**, Benoit IUNG, Min XIE and Flavien PEYSSON. Prognostics and Health Management with Discrete Event Data : Discovery of Association Rules. *3rd European Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHME 2018*, 3-6 July 2018, Utrecht, Netherlands
- C40. Hai-Canh VU, **Phuc DO** Van, Mayank Shekhar Jha, Didier Theilliol, Flavien Peysson. On the use of particle filters for prognostics in industrial applications. *3rd European Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHME 2018*, 3-6 July 2018, Utrecht, Netherlands
- C39. Ho-Si-Hung NGUYEN, **Phuc DO**, Benoit IUNG and Hai-Canh VU. Joint maintenance scheduling and routing optimization for Geographically Dispersed Production Systems. *The 10th International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability*, MIMAR 2018, 13-15 June 2018, Manchester, UK.
- C38. Grace BOYER, Nicolae BRINZEI, **Phuc DO** and Jean-Francois PETIN. Reliability modelling and assessment by joint consideration of Petri nets and gamma deterioration processes for systems with multi-component wear interactions. *2017 IEEE 2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS 2017)*, December 20-22 2017, Milan, Italy
- C37. Roy ASSAF, **Phuc DO**, Philip SCARF, Samia NEFTI-MEZIANI. Diagnosis for systems with multi-component wear interactions. *2017 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, PHM2017*, Jun 2017, Dallas, Texas, United States
- C36. Hai-Canh VU, **Phuc DO**, Benoit IUNG and Flavien PEYSSON. A case study on health prediction of an industrial diesel motor using particle filtering. *International Conference on Prognostics and Health Management, PHM-Harbin 2017*, Jul 2017, Harbin, China
- C35. Walid MECHRI, Hai Canh VU, **Phuc DO**, Timothée KLINGELSCHMID and Flavien PEYSSON. A study on health diagnosis and prognosis of an industrial diesel motor : hidden Markov models and particle filter approach. *The 13th International Science Conference Diagnostics of Processes and Systems, DPS'17*, Sep 2017,

Sandomz, Poland

- C34. Ho-Si-Hung NGUYEN, **Phuc DO**, Benoit IUNG, Hai-Canh VU. A dynamic grouping maintenance strategy for geographically dispersed production systems. *10th International Conference on Mathematical Methods in Reliability*, MMR 2017, Jul 2017, Grenoble, France.
- C33. **Phuc DO**, Christophe BERENGUER, Borgonovo EMANUELE. Conditional reliability-based importance measures. *10th International Conference on Mathematical Methods in Reliability*, MMR 2017, Jul 2017, Grenoble, France.
- C32. Phuong-Khanh NGUYEN-THI, Tuan HUYNH, **Phuc DO**, Christophe BERENGUER and Antoine GRALL. A POMDP model for the joint optimization of condition monitoring quality and replacement decisions. *10th International Conference on Mathematical Methods in Reliability*, MMR 2017, Jul 2017, Grenoble, France.
- C31. Anh HOANG, **Phuc DO**, Benoit IUNG. Investigation on the use of energy efficiency for condition-based maintenance decision-making. *3rd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology*, Oct 2016, BIARRITZ, France.
- C30. Phuong-Khanh NGUYEN-THI, Tuan HUYNH, **Phuc DO**, Christophe BERENGUER, Antoine GRALL. Adjusting Condition Monitoring Quality for Condition-Based Maintenance Optimization of Deteriorating Systems. *The 9th International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability*, MIMAR 2016, Jul 2016, London, UK.
- C29. Roy ASSAF, **Phuc DO**, Philip SCARF, Samia NEFTI-MEZIANI. Wear rate-state interaction modelling for a multi-component systems : models and an experimental platform. *3rd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology*, Oct 2016, BIARRITZ, France
- C28. Hai-Canh VU, **Phuc DO**, Anne BARROS and Mary-Ann LUNDTEIGEN. A dynamic grouping model for the maintenance planning of complex structure systems with non-negligible repair time. *The 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability (ICAMER)*, May 04-06, Ho Chi Minh Ville, Vietnam, 2016
- C27. Anh HOANG, **Phuc DO**, Benoit IUNG. Prognostics on energy efficiency performance for maintenance decision-making : Application to industrial platform TELMA. *First International Conference on Reliability Systems Engineering & 2015 Prognostics and System Health Management Conference-Beijing (2015 ICRSE & PHM-Beijing)*, Beijing, 2015.
- C26. Hai-Canh VU, **Phuc DO**, Anne BARROS. A comparison of different maintenance grouping strategies for multi-component systems with complex structure. *Advance*

*in Safety, Reliability and Risk Management - Proc.ESREL 2015*, 7-10 September, Zurich, Switzerland, 2015.

- C25. **Phuc DO**, Philip SCARF and Benoit IUNG. Condition-based maintenance for a two-component system with dependencies. *9th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety of Technical Processes (SafeProcess'15)*, 2-4 September, Paris, 2015
- C24. Anh HOANG, **Phuc DO**, Benoit IUNG, Eric LEVRAT and Alexandre VOISIN. Performance d'efficacité énergétique : concepts et pronostic. *10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation- MOSIM'14* - 5 au 7 novembre 2014 , Nancy, France 2014.
- C23. Anh HOANG, **Phuc DO**, Benoit IUNG. Integrating multilevel energy efficiency-based prognostic approaches into energy management systems of base stations. *The International Conference on Advanced Technologies for Communications (ACT, IEEE)*, Viet Nam 2014
- C22. **Phuc DO**. A joint predictive inspection and maintenance policy for multi-component systems using importance measure and prognostic information. *8th International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR)*, July 10-12, Oxford, UK, 2014
- C21. Hai-Canh VU, **Phuc DO** and Anne BARROS. A modified time based maintenance policy for mono-unit systems. *8th International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR)*, July 10-12, Oxford, UK, 2014
- C20. Kim-Anh NGUYEN, **Phuc DO** and Antoine GRALL. A Joint Predictive Maintenance and Spare Parts Provisioning Policy for Multi-component Systems Using RUL Prediction and Importance Measure. *2nd European Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHME 2014*, Nantes, France 2014
- C19. Anh HOANG, **Phuc DO**, Benoit IUNG, Eric LEVRAT and Alexandre VOISIN. Prognostics and Energy Efficiency : Survey and Investigations. *2nd European Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHME 2014*, Nantes, France 2014
- C18. **Phuc DO**, Alexandre VOISIN, Eric LEVRAT and Benoit IUNG. Remaining useful life based maintenance decision making for deteriorating systems with both perfect and imperfect maintenance actions. *IEEE Prognostics and Health Management*, June 24-27, Washinton, USA, 2013
- C17. Kim-Anh NGUYEN, **Phuc DO** and Antoine GRALL. Predictive grouping maintenance strategy for complex structure systems using importance measure. *Internatio-*

*nal Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*, 15-18 July, Sichuan, China 2013

- C17. Hai-Canh VU, **Phuc DO**, Anne BARROS. (MRL, t) grouping policy for complex structure systems. *Advance in Safety, Reliability and Risk Management - Proc.ESREL 2013*, 29 September - 2 October Amsterdam, Netherlands, 2013
- C15. Kim-Anh NGUYEN, **Phuc DO** and Antoine GRALL. A predictive maintenance strategy for multi-component systems using importance measure. *Advance in Safety, Reliability and Risk Management - Proc.ESREL 2013*, 29 September - 2 October Amsterdam, Netherlands, 2013
- C14. **Phuc DO**, Eric LEVRAT, Alexandre VOISIN and Benoit IUNG. Remaining useful life (RUL) based maintenance decision making for deteriorating systems. *2nd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology (A-Mest'12)*, 22-23 November, Sevilla, Spain, 2012. DOI : 10.3182/20121122-2-ES-4026.00029
- C13. Hai-Canh VU, **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Dynamic grouping maintenance for complex structure systems with non-negligible replacement time. *2nd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology (A-Mest'12)*, 22-23 November, Sevilla, Spain, 2012. DOI : 10.3182/20121122-2-ES-4026.00017
- C12. **Phuc DO**, Alexandre VOISIN, Eric LEVRAT and Benoit IUNG. Condition-based maintenance with both perfect and imperfect maintenance actions. *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2012*. September 23-27, Minneapolis, Minnesota, USA, 2012.
- C11. **Phuc DO**, Hai-Canh VU, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Grouping maintenance strategy with availability constraint under limited repairmen. *8th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety of Technical Processes (Safeprocess'12)*, 29-31 August, Mexico city, Mexico, 2012.
- C10. Hai-Canh VU, **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Maintenance activities planning and grouping for complex structure systems. *Advance in Safety, Reliability and Risk Management - Proc.PSAM 11 & ESREL2012*, 25-29 June 2012,Helsinki, Finland, 2012.
- C9. **Phuc DO**, Keomany BOUVARD, Florent BRISSAUD, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Dynamic grouping maintenance strategy with time limited opportunities. *Advance in Safety, Reliability and Risk Management - Proc.ESREL 2011*, 18-22 September 2011, Troyes, France., 2011

- C8. **Phuc DO** and Christophe BERENGUER. Condition-based maintenance under an imperfect repair policy for a deteriorating production system. *7th International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR) 2011*
- C7. **Phuc DO** and Christophe BERENGUER. Condition based maintenance model for a production deteriorating system. *Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol'10)*, 2010, IEEE 6p
- C6. **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Differential Importance Measure of Markov Models Using Perturbation Analysis. *Risk, Reliability and Societal Safety - Proc.ESREL 2009*, 7-10 September 2009, Prague, Czech Republic. Taylor & Francis, 8 p.
- C5. **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Facteur de sensibilité multi-directionnelle et facteur d'importance fiabiliste différentiel pour un système markovien. *6ème Congrès International pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement - Qualita2009*, 18-20 Mars 2009, Besançon, France. 8 p.
- C4. **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. A new Result on the Differential Importance Measures of Markov systems. *9th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference - Proc.PSAM9*, 18-23 may 2008, Hong Kong, China, 8 p.
- C3. **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Importance Measure on Finite Time Horizon and Application to Markovian Multi-state Production Systems. *Risk, Reliability and Societal Safety - Proc.ESREL 2007*, 25-27 June 2007, Stavanger, Norway. Taylor & Francis, 8 p.
- C2. **Phuc DO**, Sali KHALOULI, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Sensitivity and importance analysis of Markov models using perturbation analysis : application in reliability studies. *Safety and Reliability for managing Risk- Proc. ESREL 2006*, 18-22 September 2006, Estoril, Portugal, pages 1769-1775. Taylor & Francis, 2006.8 p.
- C1. **Phuc DO**, Christophe BERENGUER and Laurence DIEULLE. Comparaison et évaluation des méthodes de calcul des facteurs d'importance fiabilistes pour les systèmes dynamiques. *6ème congrès international pluridisciplinaire qualité et sécurité de fonctionnement, QUALITA2005*, 16-18 Mars 2005, Bordeaux, pages 45-52.

## Colloque et congrès national avec comité de lecture (1)

- CN1. **Phuc DO**, Anne BARROS and Christophe BERENGUER. Etude de sensibilité par analyse de perturbation pour un système Markovien : application à la fiabilité.

---

2ème journées doctorales, 9- 11 juillet 2007, Reims - France. 6 p.

### Book chapters (4)

- BC4. **Phuc DO**, Roy Assaf and Phil Scarf. Opportunistic maintenance policies for multi-components systems. *Springer*. Accepted April 2019.
- BC3. Roy Assaf, **Phuc DO** and Phil Scarf. Towards prognostics and health management of multi-component systems with stochastic dependence. *Springer*. Accepted in April 2019.
- BC2. **Phuc DO**, Anne BARROS. Maintenance grouping models for multicomponent systems. *Mathematics Applied to Engineering*, Elsevier, pp.147-170, 2017, 978-0-12-810998-4
- BC1. Walid MECHRI, Hai Canh VU, **Phuc DO**, Klingelschmid TIMOTHEE and Flavien PEYSSON. A study on health diagnosis and prognosis of an industrial diesel motor : hidden Markov models and particle filter approach. *Advanced Solutions in Diagnostics and Fault Tolerant Control*. Springer International Publishing AG 2017. pp 380-389. ISBN 978-3-319-64473-8

### Contrat de recherche (3)

- CR3. Thomas Sorin, **Phuc Do**, Iung Benoit, Jean-François Barbet, Levrat Eric, Voisin Alexandre, Barbier Florent, Peysson Flavien, Leon David. Etude de faisabilité relative à la mise en œuvre d'une solution de maintenance prédictive. *Contrat S18143-R01, PREDICT, SECTOR, CRAN* - janvier 2019 – p1-60.
- CR2. Rémi Parouty, Benoit Iung, Jean-Baptiste Léger, Jean-François Barbet, Florent Barbier and **Phuc DO**. Health and Usage Monitoring System (HUMS) - Health Monitoring. *Contrat S15309-R01H, CRAN; PREDICT; SECTOR*. 2017, p1-247.
- CR1. Christophe BERENGUER, **Phuc DO**, Anne BARROS, Laurence DIEULLE and Antoine GRALL. Calcul des facteurs d'importance pour les systèmes à modèles comportementaux ou dynamiques, *Rapport du contrat d'Association EDF/UTT*, n° T51/G27369, 22 p, 22 juillet 2004.

### Rapport de thèse et de DEA (2)

- Ra2. **Phuc DO**. Contribution to the development and to the study of reliability importance measures for markovian systems. *Thèse de doctorat de l'Université de Technologies de Troyes*, Septembre 2008, 204 pages.

Ra1. **Phuc DO.** Facteurs d'importance fiabilistes et leurs extensions pour les systèmes dynamiques. *Rapport de recherche de DEA*, Université de Technologies de Troyes, Septembre 2004, 48 pages.

## Deuxième partie

### Description des travaux de recherche



# Introduction à la thématique de recherche abordée

Le maintien en condition opérationnelle de systèmes industriels est un challenge important en regard des nouvelles orientations pour ces systèmes telles que prônées par des initiatives comme l'industrie du futur [202]. En effet la maintenance, en lien avec la production, doit offrir des moyens non plus uniquement pour maîtriser, optimiser des performances de productivité/disponibilité, de sécurité mais aussi des performances plus sociétales comme celles de développement durable. Cette maîtrise/optimisation se construit à partir de la définition d'un plan d'actions de maintenance adapté pour prévenir, éviter ou corriger les dysfonctionnements. Ce plan optimal est d'autant plus difficile à déterminer que ces systèmes sont structurés sur de multiples composants à dépendances fortes (ex. stochastique, fonctionnelle, structurelle) avec des nouvelles propriétés comme l'adaptabilité, l'auto-reconfiguration. La dynamique de ces systèmes est donc une caractéristique essentielle à prendre en compte pour la maintenance. Cela soulève à minima deux questions principales :

- Quels sont les composants du système qui devraient bénéficier en priorité d'une action de maintenance ?
- Pour ces composants, quelles actions de maintenance à envisager ? A quel moment et comment les effectuer (par regroupement ? sur la base d'un compromis coûts directs et indirects de maintenance ...) pour maîtriser au mieux les performances et ceci de façon dynamique ?

Pour répondre à ces questions, des stratégies de maintenance prévisionnelle<sup>22</sup> (ou maintenance prédictive) fondée sur un suivi de la dégradation des composants semblent appropriées. En effet, elle permet par des processus adaptés de surveillance, diagnostic et pronostic, de cibler des composants clés afin d'évaluer leur niveau de potentialité et donc de prévoir des actions en anticipation pour ne plus subir les défaillances. Cependant, le

---

22. Selon la norme NF EN 13306 X 60-319, la maintenance prévisionnelle est une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

déploiement cohérent et à grande échelle, de ces orientations de maintenance manque encore cruellement de fondements, de méthodes et d'outils. En effet, entre autres, la proposition de méthodologies de modélisation des dégradations, de modèles avancés pour le pronostic, d'outils d'aide à la décision dynamique et d'outils d'évaluation des performances en maintenance prévisionnelle constitue un défi scientifique majeur pour la mise en œuvre concrète de ces nouvelles stratégies. Ce défi s'inscrit pleinement dans la discipline scientifique/industriel PHM<sup>23</sup> (IEEE PHM, PHM society), ESRA mais aussi dans les communautés IFAC (TC5.1., TC6.4) ou CIRP (College International pour la Recherche en Productique).

Mes activités de recherche sur ce thème se sont construites pour contribuer à ce défi. Plus précisément par le développement des modèles de maintenance permettant de prendre en considération les interactions entre composants et des contraintes associées à la fois au système maintenu et au système de soutien. Dans ce sens mes activités portent principalement sur trois axes de recherche :

- *Modélisation de dégradation avec multiples facteurs d'influence ;*
- *Développement d'indicateurs d'aide à la décision en maintenance ;*
- *Elaboration de stratégies de maintenance prévisionnelle et de regroupement dynamique d'actions.*

Dans le chapitre 2, un état de l'art succinct sur les travaux réalisés sur ce défi de recherche dans le processus d'optimisation de maintenance est présenté. Cela permet de positionner mes activités de recherche autour des trois axes identifiés ainsi que mes contributions originales par rapport aux travaux déjà existants. Les synthèses des contributions associées à ces trois axes sont présentées dans les chapitres 3, 4 et 5 respectivement.

---

23. Prognostics and Health Management

# Chapitre 2

## Positionnement des trois axes de recherche investigués

### 2.1 Introduction au processus d'optimisation de maintenance

Selon la norme européenne NF-EN-13306-X-60-319 [145], la *maintenance* est définie comme «*l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise*». Les actions de maintenance peuvent être classées en deux grandes catégories suivant l'état de l'entité considérée (composant/système) à l'instant d'intervention :

- Maintenance corrective qui regroupe l'ensemble des activités de maintenance qui interviennent en réponse, et donc consécutivement à la défaillance d'une entité, afin de la remettre en état d'accomplir une ou plusieurs fonctions requises ;
- Maintenance préventive qui regroupe l'ensemble des interventions programmées pour prévenir ou retarder une défaillance.

En plus de leur catégorisation, les actions de maintenance peuvent être classées en deux types selon leur qualité (leur efficacité) :

- Maintenance parfaite signifie qu'une action de maintenance peut restaurer totalement l'entité considérée. C-à-d. que l'état d'une entité après la maintenance peut être considéré comme neuf ;
- Maintenance imparfaite indique qu'une action de maintenance peut restaurer partiellement le système/objet maintenu. L'état de l'entité après la maintenance se

trouve quelque part entre l'état neuf et l'état juste avant la réalisation de la maintenance.

Dans le cadre de l'optimisation de la maintenance, on est souvent amené à identifier non seulement les types d'actions à mettre en oeuvre parmi celles qui sont envisageables mais aussi les dates d'intervention de chaque d'action de maintenance tout en respectant les exigences liées au système maintenu (ex., disponibilité, sécurité) et celles liées à son système de soutien (ex., pièces de rechanges, outils, compétence de réparateurs, coût, etc.). De façon générale, le processus d'optimisation de la maintenance peut être divisé en 3 phases [4, 83] :

1. *Modélisation et formulation du comportement dysfonctionnel.* Cette étape est cruciale pour l'élaboration de règles de décision et/ou l'optimisation de la planification de maintenance. La qualité de la modélisation et de la formulation peut impacter l'optimalité d'un planning de maintenance établi [4].
2. *Élaboration de stratégies de maintenance adaptées.* L'objectif est de construire des règles de décisions adaptées pour la sélection des actions de maintenance en regard du niveau dysfonctionnel des composants/système pour la planification de ces actions tout en respectant l'ensemble des spécifications/contraintes liées à la fois au système maintenu et à son système de soutien.
3. *Évaluation et optimisation des stratégies de maintenance élaborées* précédemment qui visent dans un premier temps à évaluer les plannings de maintenance fournis par une telle stratégie de maintenance définie selon un ou plusieurs critères de performance (ex., critère de coût, disponibilité, sécurité, etc.) puis dans un second temps, à déterminer un planning optimal selon une ou plusieurs fonctions objectifs (ex., minimiser le coût total, maximiser la disponibilité, etc.).

Par rapport à ces trois phases à mener à bien pour assurer l'optimalité, deux "facteurs" cruciaux associés au système à maintenir sont à adresser :

- Le premier facteur est relatif à la complexité des systèmes. En effet, avec le développement rapide des technologies, des systèmes industriels deviennent de plus en plus complexes pour répondre aux besoins techniques (ex., niveau de disponibilité, cadence de production), commerciaux (ex., coût total de cycle de vie) et de développement durable (ex., consommations de moins énergie, etc.) dans des contextes opératoires dynamiques (ex. changement du planning de production, condition environnementale instable, etc.) [4]. La complexité apparaît non seulement au niveau composant (ex., nouveaux matériaux, nouvelles technologies embarquées, multifonctions, etc.) mais aussi au niveau système (ex., multicomposants inter-connectés selon une structure/configuration complexe, dépendances multiples entre composants,

mutilfonctions, etc.).

- Le deuxième est lié aux missions/services multiples à accomplir. En effet, les systèmes industriels doivent souvent assurer plusieurs missions/services avec des performances spécifiques attendues (ex. niveau de fiabilité/disponibilité, niveau d'efficacité énergétique, ...) [2, 99, 123, 125, 183].

Tous ces facteurs ne sont pas encore réellement pris en compte dans le processus d'optimisation. En effet, il manque de conceptualisation, de méthodes et d'outils. Pour remédier à cela, des travaux sont portés dans différentes communautés scientifiques sur chaque phase de ce processus d'optimisation de maintenance.

## 2.2 Modélisation et formulation du comportement dysfonctionnel

L'objectif de cette phase est de quantifier l'évolution du processus dysfonctionnel (défaillance) des composants et du système en prenant en compte des facteurs d'influence liés non seulement aux caractéristiques propres des composants, interactions entre composants mais aussi aux conditions opératoires.

Il existe dans la littérature deux grandes classes de modèles pour modéliser l'évolution dysfonctionnelle d'une entité (composant ou système) :

- *Modèles de durée de vie* : une entité a un comportement binaire qui peut-être soit en marche soit en panne [15]. Pour ce type de modèle, il est nécessaire de déterminer une loi de l'instant de panne qui peut-être directement une fonction de la durée de fonctionnement de l'entité. On trouve dans le cadre de modèles de durée de vie, des méthodes statistiques classiques (ex. loi exponentielle, Weibull, etc.) [170].
- *Modèles de dégradation* : il s'agit de modèles pour lesquels l'espace d'état d'une entité se compose, en plus des états de marche et de panne, des états intermédiaires qui sont appelés «états dégradés». Les états de dégradation permettent de transiter successivement entre l'état neuf ou le moins dégradé et l'état de panne, et une défaillance se produit lorsque le niveau de dégradation atteint un certain seuil. On distingue deux grandes classes de dégradation telles que les modèles à dégradation discrète (ex. Chaîne de Markov) et les modèles à dégradation continue (ex. processus gamma, Wiener, Markov) [204, 32].

Au global, le processus de défaillance d'une entité (modèles de durée de vie ou de dégradation) dépend non seulement des caractéristiques propres de l'entité mais aussi d'autres facteurs d'influence (ex. conditions opératoires, fonctions à accomplir, des interactions

avec d'autres entités, etc.) [59, 151, 179]. Cette double caractérisation soulève à minima une question importante : *comment prendre en considération des facteurs d'influences dans le processus de défaillance/dégradation d'un composant/système?* Cette question (**verrou scientifique n° 1**) est une problématique de recherche adressée dans différentes communautés scientifiques à la fois aux niveaux national (GdR Macs H2M, S3 ou IMdR-SdF) et international (PHM, ESRA, MIMAR<sup>24</sup>, MMR<sup>25</sup>).

En effet, des travaux ont été menés pour modéliser de façon plus élaborée le processus de défaillance d'une entité (composant/système). De façon générale, on peut les classer selon le niveau d'abstraction considéré en sachant qu'en sûreté de fonctionnement et maintenance, un système industriel est généralement représenté par [170] :

- Un ensemble de composants élémentaires dont chaque composant assure une ou plusieurs opérations supportant des fonctions globales du système [204, 212] ;
- Une structure/configuration spécifique selon laquelle les composants du système sont inter-connectés. D'un point de vue point de vue fiabiliste, il existe plusieurs types de structures/configurations : structures en série, structures parallèle ou structures mixtes (appelées également structures complexes) [208, 237].
- Des dépendances entre composants. En effet, il existe trois types de dépendances principales entre composants [7, 104, 152].
  - Dépendances stochastiques signifient que l'état d'un composant peut impacter le processus de défaillance/dégradation d'autres composants [45, 59, 88] ;
  - Dépendances structurelles existent lorsque différents composants forment physiquement une partie et que l'exécution de maintenance sur un composant (i) implique physiquement une intervention sur d'autres composants [197, 45] ; (ii) impacte le processus de défaillance/dégradation d'autres composants [128, 58] ;
  - Dépendances économiques signifient que le coût de maintenance conjointe de quelques composants est différent du coût total de maintenance lorsque ces composants sont maintenus séparément [45, 152, 197].

### 2.2.1 Au niveau composant

Plusieurs modèles de défaillance permettant de prendre en compte des facteurs externes ont été proposés [204, 212, 239]. Par exemple, Huynh et al. [90] a proposé un modèle de dégradation avec la prise en compte de chocs. La prise en considération de facteurs de stress ou modes opératoires dans le processus de dégradation est étudiée dans

---

24. Modelling in Industrial Maintenance and Reliability

25. Mathematical Methods in Reliability

[47]. Par rapport à des travaux effectués, l'outil mathématique utilisé est majoritairement le processus de Lévy qui se base principalement sur un processus gamma ou un processus de Wiener [82, 182]. Dans le contexte de maintenance imparfaite, la qualité d'une action de maintenance peut impacter le niveau de restauration et l'évolution du processus de défaillance de l'entité maintenue. Cependant, dans les travaux existants, peu d'études sont disponibles sur la prise en compte d'impacts d'une action de maintenance imparfaite sur le processus de dégradation. Ce constat nous a amené à travailler sur la *proposition de modèles de dégradation pour un composant soumis à des actions de maintenance imparfaite* (**contribution n° 1**). La synthèse de cette contribution est présentée dans la section 3.1 du chapitre 3 .

## 2.2.2 Au niveau système

Les modèles de défaillance proposés au niveau composant ne peuvent pas être directement appliqués au niveau système car il existe souvent des interactions entre composants qui peuvent impacter le processus de défaillance/dégradation de chaque composant [21, 80, 151]. La prise en compte de ce type d'interaction entre composants dans la modélisation du processus de défaillance/dégradation a été investiguée dans plusieurs travaux de recherche académique et industrielle [80, 179, 238]. Dans le contexte des systèmes à composants multiples soumis à dégradation, il existe un autre type d'interaction entre composants, appelé interaction d'états qui signifie que l'évolution de dégradation d'un composant peut dépendre non seulement de l'état courant (niveau de dégradation) du composant lui-même mais aussi de l'état d'autres composants. Par exemple l'état (qualité) d'une huile peut impacter directement celui des guidages de rotation lubrifiés et soumis à la dégradation superficielle ; réciproquement, les particules d'usure de ces paliers contribuent à la perte de qualité du lubrifiant ; et de même dans une transmission de puissance par engrènement d'un pignon et d'une roue, les dégradations d'état de surface d'un pignon accéléreront l'apparition des piqûres sur la roue, et réciproquement. Cependant, très peu de travaux sont disponibles sur la prise en considération de ce type d'interaction dans la modélisation de dégradation d'un système à composants multiples. Ce constat nous a amené à un travail sur le *développement de modèles de dégradation avec interaction d'états entre composants* (**contribution n° 2**). La synthèse de cette contribution est présentée dans la section 3.2 du chapitre 3 .

## 2.3 Élaboration de stratégies de maintenance adaptées

L'objectif de cette phase est d'élaborer des règles de décisions adaptées pour pouvoir sélectionner de façon efficace les actions de maintenance. Un grand nombre de stratégies de maintenance a été proposé et appliqué aux différents systèmes industriels [11, 72, 151, 181, 212]. Différentes classifications sur les stratégies de maintenance ont été proposées dans la littérature [104, 151, 212]. On peut les classer en deux grandes classes selon le niveau d'abstraction : niveau composant et niveau système.

### 2.3.1 Au niveau composant

Les stratégies de maintenance à ce stade sont proposées pour un composant spécifique, appelé également dans la littérature système à composant unique [5, 205, 165, 96, 212]. On peut distinguer deux types d'approches :

- Maintenance systématique : les actions de maintenance préventive sont programmées à des intervalles de temps prédéterminé (conformément à un calendrier) ou en relation avec sur un cycle d'utilisation spécifique quelque soit l'état du composant. Les stratégies de maintenance systématique sont assez simples à mettre en oeuvre mais elles ne peuvent être adaptées qu'à des contextes opératoires stables [52]. En effet, ce type de stratégie de maintenance est basé uniquement sur le temps de l'échéancier ou sur l'âge initial du composant. Ceci peut conduire à des interventions trop précoces ou trop tardives par rapport à l'état réel de dégradation.
- Maintenance conditionnelle (et prévisionnelle) : les dates et la nature (maintenance parfaite ou imparfaite) des interventions ne sont pas préfixées et dépendent de l'état courant (niveau de dégradation), donné directement ou indirectement par un processus de surveillance du composant. Les stratégies de maintenance conditionnelle sont généralement plus compliquées par rapport à des stratégies de maintenance systématiques mais elles sont plus adaptées en particulier dans un contexte opératoire non stable [31]. La performance d'une telle stratégie de maintenance conditionnelle dépend non seulement du processus de dégradation [36] mais aussi de la qualité de l'information donnée par la surveillance (parfaite/imparfaite) [7, 131, 176]. Différentes règles de décision pertinentes ont été proposées par rapport aux différents types de processus de dégradation (homogène, non-homogène) [7, 204] mais dans ces travaux les surveillances parfaites sont majoritairement considérées. Il existe très peu d'études sur la prise en compte de l'incertitude sur l'état courant dans la décision de maintenance. Sur ce constat, nous avons initié des travaux autour du *développement de stratégies de maintenance conditionnelle dans un contexte de*

*surveillance imparfaite (contribution n° 5)*. La synthèse de cette contribution est présentée dans la section 5.1 du chapitre 5.

### 2.3.2 Au niveau système

Une décision de maintenance optimale pour un composant ne l'est alors plus nécessairement pour le système entier [46, 223] et une simple juxtaposition de stratégies élaborées dans un contexte mono-composant n'est, la plupart du temps, pas satisfaisante [33, 83]. L'adaptation à un cadre multi-composant d'une stratégie efficace pour un composant unique nécessite une attention particulière et n'est pas obligatoirement possible [83]. En effet, une telle stratégie de maintenance efficace au niveau système devrait prendre en considération, d'une part, des impacts associés aux caractéristiques propres du système telles que [89, 151] :

- la structure spécifique du système ;
- des interactions entre composants (ex., dépendances économiques, stochastiques et structurelles) ;
- des contraintes spécifiques techniques ou commerciales.

D'autre part, les décisions en maintenance devraient tenir compte de contraintes spécifiques du système de soutien telles que :

- opportunités de maintenance ;
- nombre limité de réparateurs, leur compétence/habilitation ;
- disponibilité des outils/pièces de rechange.

En outre, un modèle de maintenance efficace devrait permettre de mettre à jour le planning de maintenance en présence d'un contexte opératoire dynamique. Dans la littérature, plusieurs modèles de maintenance ont été proposés au niveau système avec la prise en compte de dépendances économiques entre composants [151, 212]. Dans ce sens, on est souvent amené à grouper quelques d'actions de maintenance car l'exécution simultanée de quelques actions de maintenance peut réduire le coût total de maintenance grâce à des dépendances économiques entre composants (ex. partage de coût de mise en oeuvre, réduction de temps de réparation, réduction de coût d'approvisionnement des pièces d'échange, etc.) [7, 45]. Le regroupement de quelques d'actions de maintenance préventive peut être cependant pénalisé par des coûts indirects (ex. réduction de la durée de vie utile de composants, augmentation de la probabilité de défaillance du système global, compétence pluridisciplinaire de réparateurs, etc.). Dans ce sens, un grand nombre de stratégies de maintenance a été proposé dans littérature. Elles peuvent être classées en deux grandes classes selon la façon de sélectionner les actions de maintenance à réaliser : (1)-stratégies de regroupement

indirect d'actions de maintenance et (2)-stratégies de regroupement direct d'actions de maintenance.

### Stratégies de regroupement indirect d'actions de maintenance

Les stratégies de regroupement indirect d'actions de maintenance, appelées également stratégies de maintenance sélective, avec lesquelles les dates et la nature des interventions d'un composant ou un groupe de composants sont sélectionnées selon un ou plusieurs indicateurs de décision. Précisément, les interventions de maintenance sont déclenchées si ces indicateurs dépassent leur seuils critiques (à optimiser). Dans ce sens, la construction d'indicateurs d'aide à la décision en maintenance joue un rôle important pour la performance d'une telle stratégie de maintenance [96]. Un tel indicateur doit prendre en considération non seulement les informations associées aux composants, les interactions entre eux mais aussi les exigences liées à la fois au système et à la maintenance. Ce dernier point soulève donc un verrou scientifique important : *Quels sont les indicateurs de décision pertinents pour pouvoir sélectionner efficacement un composant ou un groupe de composants à maintenir ? Comment les construire et les évaluer de façon efficace ?*. Pour répondre à ces questions (**verrou scientifique n° 2**), différents types d'indicateurs d'aide à la décision en maintenance ont été proposés dans la littérature comme des indicateurs basés sur le temps (time-based maintenance), sur l'âge (age-based maintenance) [52, 213] ou sur la condition réelle (condition-based maintenance) [204]. Pour ce dernier, les interventions de maintenance effectuées se basent sur des indicateurs représentant l'état de santé ou de performance de l'entité (composant/système) surveillée. Dans ce sens, le niveau de dégradation, le taux de défaillance conditionnel et la durée de vie résiduelle conditionnelle sont les trois indicateurs principaux pour la prise de décision de maintenance [90, 160, 185, 189, 203].

- *Le niveau de dégradation* : C'est un indicateur qui montre l'état de santé le plus intuitif et direct de l'entité à maintenir. De nombreux travaux ont été mis en œuvre se basant sur ce type d'indicateur dans la prise de décision en maintenance conditionnelle. On peut citer ici les travaux dans [32, 33, 49, 70, 71, 84, 217]. Son avantage est qu'il est utilisé directement sans aucune procédure de transformation complémentaire dans le cas de qualité parfaite des informations surveillées. Dans le cas contraire où les informations surveillées sont soumises à des erreurs de détection [209] ou des bruits [27] (le résultat d'une surveillance indirecte), il est nécessaire de réaliser certains traitements intermédiaires avant toute décision d'intervention. Les méthodes d'estimation de dégradation, telles que le filtrage stochastique [90], les modèles de hasards basés sur des covariables, le modèle de Markov caché, etc., sont souvent appliquées dans ces cas [185].

- *Le taux de défaillance conditionnel* : À côté du niveau de dégradation, cet indicateur de taux de défaillance conditionnel permet aussi de tenir compte de différents types d'informations (variables d'environnement, mesures bruitées,...) dans la prise de décision de maintenance conditionnelle [124]. Cette hypothèse semble plus pratique dans certains cas dans lesquels l'élément d'environnement peut avoir une influence significative sur l'évolution de défaillance du système [48]. Néanmoins, les stratégies de maintenance basées sur le taux de défaillance conditionnel restent encore beaucoup moins nombreuses que celles basées sur le niveau de dégradation. Les stratégies de maintenance utilisant l'indicateur de taux de défaillance (conditionnel), qui est estimé à partir du niveau de dégradation et de l'état de l'environnement, font l'objet des travaux [13, 14, 198, 229]. La raison de son peu d'utilisation est que le taux de défaillance est souvent inaccessible car il n'est pas une grandeur physique, et que son utilisation nécessite des calculs relativement complexes.
- *La fiabilité prévisionnelle/durée de vie résiduelle conditionnelle* : Ces deux indicateurs conditionnels précédents ne portent que sur des informations d'état du «passé» et du «présent» du système, mais pas de son état futur. Afin d'incorporer ce type d'information conditionnelle dans la décision en maintenance, on peut faire les prédictions de la durée de vie résiduelle conditionnelle à partir des données de surveillance [12, 76]. Donc, la fiabilité prévisionnelle/durée de vie résiduelle conditionnelle peut caractériser l'état du système de façon beaucoup plus précise que celle classique (la durée de vie résiduelle «non-conditionnelle» [17, 144]) [222] qui est largement appliquée pour les stratégies de maintenance systématique. Dans la pratique industrielle courante, cet indicateur est considéré comme une grandeur très importante à estimer/prédire dans la thématique du pronostic [108, 160, 185, 189] et également un indicateur très prometteur en maintenance prévisionnelle [25, 96, 155, 196]. L'incorporation de la durée de vie résiduelle conditionnelle dans la prise de décision de maintenance prévisionnelle a été récemment investiguée dans plusieurs travaux de recherche [30, 62, 91, 92, 219, 220].

Ce type d'indicateurs de décision semble efficace pour un système à composants multiples. Cependant, les travaux existants ne permettent pas de prendre en compte les informations courantes (état binaire, niveau de dégradation) et des dépendances entre composants. Sur ce constat, nous avons initié des travaux autour du développement de nouveaux indicateurs fiabilistes (RIM, conditional reliability-based importance measures, et son extension R23 ) pour la prise de décision en maintenance (**contribution n° 3**). La synthèse de cette contribution originale est présentée dans la section 4.1 du chapitre 4 .

De plus, d'autres indicateurs sont aujourd'hui considérés en regard de performances moins conventionnelles et plus émergentes comme celles liées au développement durable.

En ce sens, nous avons travaillé sur l'indicateur d'efficacité énergétique et plus spécifiquement sur le *fondement d'indicateurs d'efficacité énergétique pour la prise de décision en maintenance* (**contribution n° 4**). La synthèse de cette contribution originale est donnée dans la section 4.2 du chapitre 4 .

Il est important de noter également que la performance d'une telle stratégie de maintenance sélective dépend non seulement des indicateurs décisionnels choisis, de leur seuils critiques (à optimiser) mais aussi de la structure du système maintenu et de toutes les contraintes liées à la fois au système maintenu et au système de soutien. Il convient de noter que quelques travaux sur la maintenance conditionnelle ont été proposés pour les systèmes à composants multiples avec une structure élémentaire comme structure en série [199], parallèle/parallèle-série [138, 142, 164, 234] ou encore structure  $k$ -sur- $n$  [39, 91, 158]. Cependant, les modèles développés pour les systèmes à structure élémentaire ne peuvent plus être totalement adaptés aux systèmes à composants multiples avec structure complexe car la prise en compte de la structure complexe implique à la fois des dépendances économiques positives et négatives entre composants. En revanche, seulement la dépendance économique positive existe dans les systèmes à structure élémentaire. En outre, l'approvisionnement de pièces de rechange et la maintenance sont deux opérations connexes qui doivent être considérées de façon conjointe pour une optimisation globale [218]. Cependant, ces deux opérations sont souvent étudiées séparément. Dans ce contexte, il est intéressant d'étudier *l'impact de la structure complexe pour les décisions en maintenance sélective et en approvisionnement de pièces de rechange* (**verrou scientifique n° 3**). Afin de répondre en partie à ce défi scientifique, nous avons mené un travail sur le *développement de stratégies de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement de pièces de rechange pour un système à structure complexe* (**contribution n° 6**). La synthèse de cette contribution originale est détaillée dans la section 5.2 du chapitre 5.

## Stratégies de regroupement direct d'actions de maintenance

Les stratégies de regroupement direct, appelé également regroupement dynamique, s'appuient sur le fait que l'ensemble des groupes de composants dans un planning de maintenance sur un horizon fini est conjointement déterminé selon un ou plusieurs critères d'optimisation. La détermination se base sur des algorithmes spécifiques (ex. programmation dynamique, heuristiques, algorithme génétique, etc.) [45, 56]. Les stratégies de regroupement direct d'actions de maintenance permettent également de prendre en considération des informations judicieuses dans un contexte dynamique comme :

- la présence d'une opportunité avec laquelle l'exécution d'interventions de maintenance est autorisée ou moins coûteuse ;

- des changements de comportement/fonction de composants/système (niveau de dégradation, niveau de fiabilité/disponibilité d'une mission) ;
- des changements spécifiques liés au soutien logistique (pièces de rechange/outils de maintenance non disponible, réparateurs insuffisants, etc.) ;
- le changement du contexte opérationnel (planning de production,..) [59, 208].

Il est important de souligner que la structure du système maintenu est un élément clé dans le développement de stratégies de regroupement d'actions de maintenance car une stratégie de regroupement pertinente pour un système avec une structure spécifique (par exemple structure en série) ne peut pas directement être appliquée à un système avec une structure différente. Ce constat pose une question scientifique majeure : *Quelles sont les stratégies de regroupement direct d'actions de maintenance plus adaptées pour un système à structure spécifique ?* (**verrou scientifique n° 4**). Face à cet enjeu, trois pistes de recherche ont été initiées. Chaque piste de recherche a donné lieu à une contribution originale différente :

- *Développement de modèles de regroupement dynamique pour un système à structure en série avec considération d'opportunités de maintenance et des contraintes spécifiques* (**contribution n° 7**) ;
- *Proposition de modèles de regroupement dynamique d'actions de maintenance pour un système avec structure complexe* (**contribution n° 8**) ;
- *Développement de modèles de regroupement dynamique d'actions de maintenance pour un système distribué* (**contribution n° 9**).

Les synthèses de ces trois dernières contributions originales sont présentées dans les sections 5.3, 5.4 et 5.5 du chapitre 5 respectivement.

## 2.4 Évaluation et optimisation de stratégies de maintenance

L'objectif de cette étape est d'évaluer et optimiser une stratégie de maintenance proposée selon des critères de performances spécifiques. Dans ce sens, les critères associés aux plannings de maintenance sont généralement définis et formulés. La recherche d'un planning de maintenance optimal est ensuite étudiée.

### Définition et formulation des objectifs

Dans la littérature, les critères de performance d'un programme de maintenance sont très divers : objectifs économiques (coût) [86, 159] ; disponibilité [200, 214] ; sécurité

[63, 180] ; multi-objectifs [16, 35]. Les critères choisis sont ensuite formulés en intégrant les processus de défaillances des composants et du système, les coûts directs (coûts des opérations surveillance, coûts des actions de maintenance effectuées, ..) et les coûts indirects (coûts d'arrêts, coûts de pénalité, ...) associés à un programme de maintenance donné.

Parmi les critères précédents, le critère de coût semble plus "pertinent" et permet une application plus large dans le contexte d'optimisation de maintenance des systèmes industriels.

### Détermination du planning optimal

La formulation permet de calculer le critère choisi (ex. coût de maintenance) d'un planning de maintenance donné en fonction des valeurs spécifiques des variables de décision associées à une telle stratégie de maintenance proposée. Ensuite, l'optimisation des stratégies de maintenance permet de déterminer la valeur optimale des variables de décision selon une ou plusieurs fonctions objectifs (ex. minimiser le coût total, maximiser la disponibilité, etc.). Il existe une grande diversité pour les méthodes d'optimisation des stratégies de maintenance. Elles peuvent être classées en deux catégories principales : méthodes exactes, méthodes heuristiques/méta-heuristiques.

**Méthodes exactes** Elles sont basées soit sur une résolution algorithmique ou analytique, soit sur une énumération exhaustive de toutes les solutions possibles. Les exemples majeurs de ces méthodes utilisées pour l'optimisation de stratégies de maintenance sont : la programmation dynamique [139, 225], la programmation linéaire en nombres mixtes [1], la programmation non-linéaire [68, 93], l'algorithme d'énumération par séparation et évaluation [65], etc.

Il est important de noter que les méthodes exactes ont permis de trouver des solutions exactes pour des problèmes de taille raisonnable. De plus, elles nécessitent souvent d'avoir des expressions explicites du critère choisi. Cependant, en présence de complexité des modèles de maintenance et des systèmes, l'utilisation des méthodes exactes pose généralement beaucoup de difficultés et nécessite souvent trop de temps de calcul. Dans ce contexte, les méthodes heuristiques et méta-heuristiques sont utilisées pour donner des solutions de bonne qualité (sans garantie d'optimalité) avec des temps de calcul raisonnables.

**Méthodes heuristiques/Méta-heuristiques** : Une méthode heuristique consiste en un ensemble des règles/moyens permettant de limiter considérablement la recherche des solutions dans l'espace des configurations possibles [201]. Les méthodes heuristiques ne sont proposées que pour les problèmes spécifiques, au cas par cas [97, 166]. Les méta-heuristiques sont définies comme un ensemble de concepts utilisés pour

définir des méthodes heuristiques, pouvant être appliquées à une grande variété de problèmes. On peut voir la méta-heuristique comme une “boîte à outils” algorithmique, utilisable pour résoudre différents problèmes d’optimisation et ne nécessitant que peu de modifications pour qu’elle puisse s’adapter à un problème particulier. Les méthodes méta-heuristiques sont largement appliquées pour l’optimisation des stratégies de maintenance : algorithmes génétiques [3, 28, 40, 111, 127, 129, 127, 194], algorithmes d’optimisation par colonies de fourmis [18, 177], algorithmes du recuit simulé [178], algorithmes de la recherche Tabou [81], algorithmes hybrides [24, 173].

Par rapport aux types de systèmes que j’ai adressé dans ma recherche, j’ai été amené à utiliser aussi bien l’une ou l’autre de ces catégories de méthodes. Ceci nous a conduit à proposer différentes contributions méthodologiques en regard des problèmes d’optimisation à résoudre. Chacune des catégories est utilisée dans des problèmes d’optimisation spécifiques associés à des stratégies de maintenance proposées.

## 2.5 Récapitulatif des axes de recherche élaborés

La figure 2.1 donne un aperçu temporel des contributions scientifiques développées. Ces contributions sont structurées selon nos trois axes de recherche :

**Axe 1** -Modélisation de dégradation avec multiples facteurs d’influence : deux contributions scientifiques (contributions n° 1 et n° 2)

**Axe 2** -Développement d’indicateurs d’aide à la décision en maintenance : deux contributions scientifiques (contributions n° 3 et n° 4)

**Axe 3** -Élaboration de stratégies de maintenance prévisionnelle et de regroupement dynamique d’actions : 5 contributions scientifiques (contributions n° 5-n° 9)

La présentation succincte de chaque axe de recherche est donnée dans les chapitres 3, 4 et 5 respectivement.

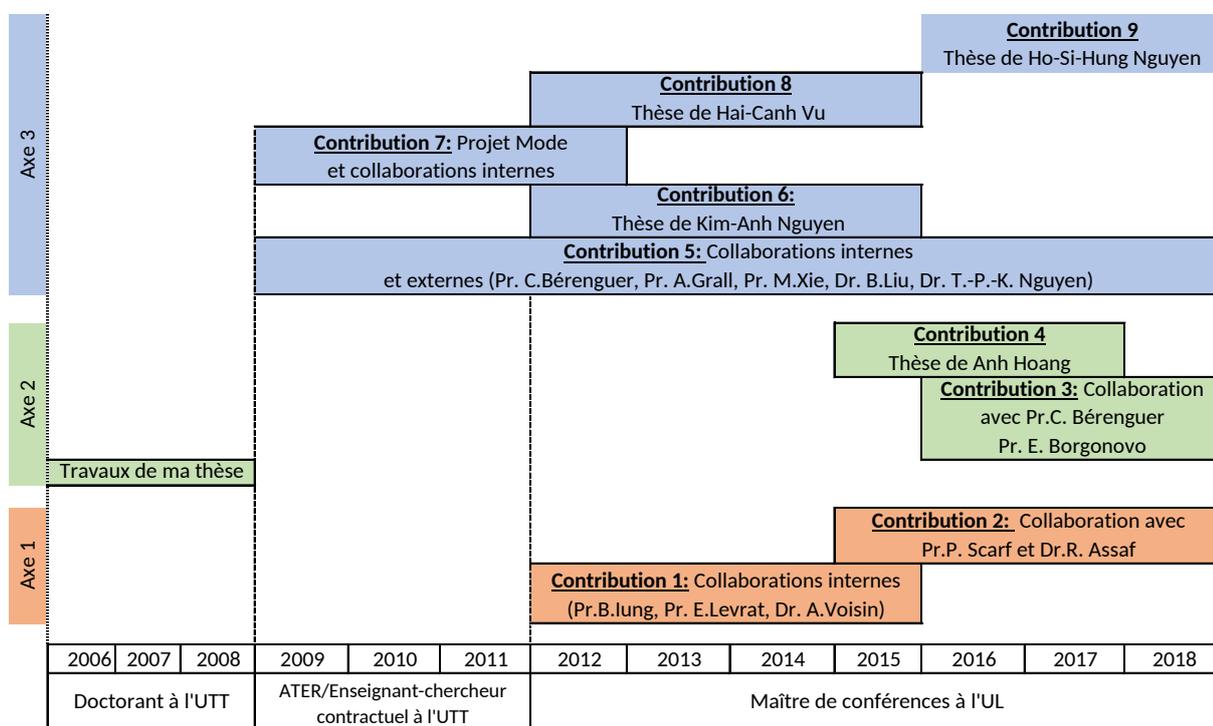


FIGURE 2.1 – Aperçu des axes de recherche et les contributions associées

# Chapitre 3

## Travaux sur la modélisation de dégradation avec multiples facteurs d'influence

Mes travaux sur cet axe de recherche s'appuient sur deux contributions originales. La contribution 1 porte sur la proposition de modèles de dégradation pour un composant soumis à des actions de maintenance imparfaite. Sa synthèse est présentée dans la section 3.1. Dans la section 3.2 est détaillée la description synthétique de modèles de dégradation avec interaction d'états entre composants. Enfin, quelques conclusions et perspectives sur les travaux de recherche réalisés sont données dans la dernière section de ce chapitre.

### 3.1 Modèles de dégradation avec des actions de maintenance imparfaite

#### 3.1.1 Présentation générale

##### Contexte

Ces travaux de recherche ont été réalisés par moi-même en collaboration avec mes collègues du groupe de travail SdF-PHM2 au sein du département ISET/CRAN.

##### Quelques précisions sur la problématique et les enjeux

Une action maintenance parfaite peut restaurer complètement une entité maintenue (composant/système), cependant son coût est souvent élevé tandis qu'une action de maintenance imparfaite restaure partiellement l'entité maintenue mais son coût est plus bas

[143]. De plus, d'un point de vue pratique, la maintenance imparfaite semble plus réaliste car elle peut décrire un plus large éventail des situations réelles [162]. La modélisation des actions de maintenance imparfaites fait l'objet d'un intérêt particulier à la fois du monde de la recherche académique mais aussi du monde industriel [106, 110]. Plusieurs modèles de maintenance imparfaites ont été donc proposés [34, 118, 125]. Cependant, ces modèles proposés ne permettent pas réellement de considérer l'impact d'une action de maintenance imparfaite sur le processus de dégradation d'un composant/système maintenu. Ce constat a requis le développement de modèles avancés de dégradation qui soulève deux problématiques importantes :

- Modélisation d'impacts d'une action de maintenance imparfaite ;
- Formulation mathématique de ces impacts et leur intégration dans le processus de dégradation.

### **Originalité et faits marquants**

Face à cette double problématique, nous avons proposé deux modèles de dégradation permettant de prendre en considération l'impact d'une action de maintenance imparfaite. Ces derniers permettent de suivre de façon plus fine l'évolution de la dégradation d'un composant (ou un système à composant unique) soumis à des interventions de maintenance imparfaite. Ce modèle est la base pour l'optimisation des dates d'inspection, de maintenance ainsi que la nature d'intervention (action de maintenance imparfaite ou parfaite). Le résultat obtenu a mis en évidence la conclusion suivante : la maintenance imparfaite ne peut pas économiquement être appliquée un grand nombre de fois pour un cycle de vie d'un composant/système. En effet, une action de maintenance imparfaite peut accélérer la vitesse du processus de dégradation. Ce dernier conduira rapidement le composant maintenu à son état de défaillance suite à la réalisation d'un nombre important d'actions de maintenance imparfaite.

Le résultat de ce travail ouvre différentes champs d'investigation en modélisation et formulation mathématique et estimation de paramètres pour les communautés PHM, MIMAR, ESRA.

Enfin, en termes de production scientifique, les modèles proposés ont été publiés dans une revue internationale indexée JCR (R8) et 2 communications dans des conférences internationales (C18, C12). Le papier de conférence C12 a été nommé comme un des quatre papiers finalistes pour un Award de meilleur papier pour la conférence PHM Society 2012. La revue R8 s'est inscrite dans la liste des articles les plus cités (top 3) du journal RESS pour la période 2015-2018.

## Outillages scientifiques utilisés

Les modèles développés sont basés sur une combinaison de processus stochastique (Gamma ou Wiener) et des lois de probabilités (Normale, Béta).

### 3.1.2 Synthèse des travaux majeurs développés

De façon générale, l'évolution naturelle de dégradation (sans aucune intervention de maintenance) d'un composant (ou un système à composant unique) est décrite par

$$X(t) = X(s) + \Delta X(t, s, v_0), \quad (3.1)$$

avec

- $X(t), X(s)$  indiquent les niveaux de dégradation à l'instant  $t$  et  $s$  ( $s \leq t$ ) respectivement ;
- $\Delta X(t, s, v_0)$  est l'incrément du niveau de dégradation pendant la période du  $s$  au  $t$  avec une vitesse moyenne  $v_0$ .

Pour modéliser la qualité d'une action de maintenance imparfaite, deux modèles ont été proposés.

#### Modèle 1 :

*Une action de maintenance imparfaite peut réduire partiellement le niveau de dégradation et accélérer la vitesse de dégradation.*

Dans ce modèle, la qualité d'une action de maintenance imparfaite est caractérisée par deux facteurs : la quantité de réduction sur le niveau de dégradation et la quantité d'accélération sur la vitesse du processus de dégradation.

#### Impact d'une action de maintenance imparfaite sur le niveau de dégradation :

La quantité de réduction sur le niveau de dégradation de la  $k$ -ème action de maintenance, notée  $Z^k$ , est définie comme la différence entre les niveaux de dégradation du composant/système maintenu avant et après la réalisation de maintenance. Dans ce sens,  $Z^k$  est borné, c.-à-d. que  $0 \leq Z^k \leq X_{T_i}$  avec  $X_{T_i}$  représente le niveau de dégradation avant la maintenance. En fait, il est montré dans [61] que  $Z^k$  peut être distribué selon une distribution normale tronquée avec densité

$$g_{\mu, \sigma, a, b}(x) = \frac{\frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right)} \mathcal{I}_{[a, b]}(x), \quad (3.2)$$

avec :

- $\mathcal{I}_{[a,b]}(x) = 1$  if  $a \leq x \leq b$  et  $\mathcal{I}_{[a,b]}(x) = 0$  sinon ;
- $\phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{1}{2}\xi^2)$  est la fonction de densité de probabilité de la distribution normale standard et  $\Phi(\cdot)$  est sa fonction de répartition ;
- $\mu = X_{T_i}/2$  et  $\sigma = X_{T_i}/6$  ;
- $a = \mu - 3\sigma = 0$  et  $b = \mu + 3\sigma = X_{T_i}$ ,

Le niveau de dégradation après une intervention de maintenance imparfaite de durée  $d$  est remis à

$$X(T_i + d) = X(T_i) - Z^k$$

**Impact d'une action de maintenance imparfaite sur la vitesse du processus de dégradation :** Il peut être modélisé par une variable continue non-négative  $\epsilon_k$  qui suit une distribution exponentielle avec une probabilité de densité :

$$h(x) = \gamma e^{-\gamma x} \mathcal{I}_{\{x \geq 0\}},$$

avec  $\gamma$  est un réel non-négatif. La valeur moyenne de  $\epsilon_k$  est égale à  $\mathbb{E}[\epsilon_k] = \frac{1}{\gamma}$ .

Avec cette modélisation, si la  $k$ ème action de maintenance est une action corrective ou préventive parfaite, la vitesse moyenne de dégradation après la maintenance est remise à  $v_k = v_0 = \alpha_0/\beta$ . Si la  $k$ ème action de maintenance est une action imparfaite, la vitesse moyenne de dégradation après la maintenance est remise à :

$$v_k = v_{k-1} + \epsilon_k. \tag{3.3}$$

La figure 3.1 illustre les impacts d'une action de maintenance imparfaite sur le processus de dégradation.

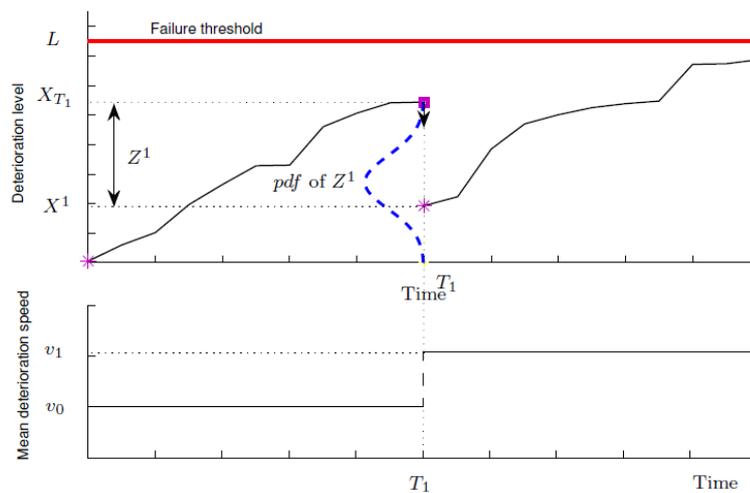


FIGURE 3.1 – Illustration des impacts d'une action de maintenance imparfaite avec  $d = 0$ .

**Coût d'une action de maintenance imparfaite :** Le coût d'une action de maintenance peut dépendre de son impact (restauration) sur le niveau de dégradation avant la maintenance [34, 110, 135] et/ou le niveau d'impact sur la vitesse du processus de dégradation [122, 125, 137]. En ce sens, nous supposons dans ce travail que le coût d'une action de maintenance imparfaite ne dépend que de son impact sur le niveau de dégradation. Dans ce sens, le coût de la  $k$ -ème action de maintenance imparfaite réalisée à l'instant  $T_i$  est calculée par

$$C_p^k = C_p^0 \cdot u(T_i)^\eta, \quad (3.4)$$

avec,

- $u(T_i) = \frac{Z^k}{X_{T_i}}$  est le facteur de restauration sur le niveau de dégradation ;
- $C_p^0$  est le coût d'une action de maintenance parfaite ( $C_p^0 \leq C_p$ ) ;
- $\eta$  est un réel non négatif ;

Selon le modèle de coût proposé, différentes formes de la fonction de coût peuvent être spécifiées en regard de la valeur de  $\eta$ . Plus précisément :

- Si  $\eta = 0$ , le coût de maintenance est constant ( $C_p^k = C_p^0$ ) ;
- Si  $0 < \eta < 1$ , le coût d'une action de maintenance imparfaite  $C_p^k$  est une fonction concave par rapport au facteur de restauration  $u(T_i)$  ;
- Si  $\eta = 1$ ,  $C_p^k$  est une fonction linéaire par rapport au facteur de restauration  $u(T_i)$  ;
- Si  $\eta > 1$ ,  $C_p^k$  est une fonction convexe.

La figure 3.2 illustre différentes formes de la fonction de coût d'une action de maintenance imparfaite.

La description détaillée de ce modèle ainsi que son application en optimisation de maintenance conditionnelle sont présentées dans R8 et C12.

### Modèle 2 :

*Une action de maintenance imparfaite peut réduire à la fois le niveau de dégradation et l'âge virtuel d'un composant/système maintenu mais ne peut pas réduire son âge réel.*

Pour modéliser l'impact d'une action de maintenance imparfaite sur le niveau de dégradation, nous proposons un facteur d'amélioration, noté  $u^k$ , et défini comme suit :

$$u^k = \frac{X(T_i) - X(T_i + d)}{X(T_i)}$$

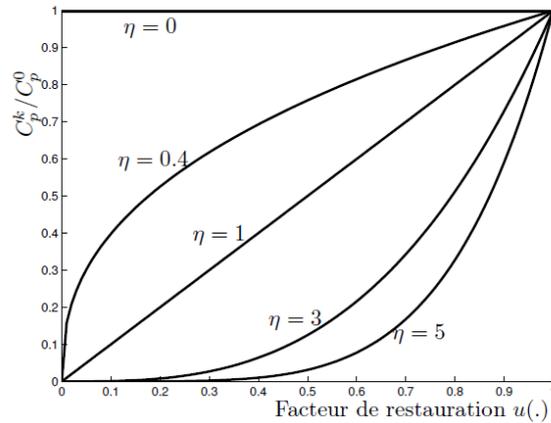


FIGURE 3.2 – Illustration de la fonction de coût d'une action de maintenance imparfaite.

L'impact d'une action de maintenance imparfaite sur l'âge virtuel du composant/système est représenté par

$$t'_a = (1 - u^k)^{1/\alpha} t_a, \quad (3.5)$$

avec  $\alpha$  est un réel positif. La vitesse de dégradation après  $k$ ème intervention de maintenance imparfaite dépend de l'âge virtuel après la maintenance  $t'_a$  ou du facteur d'amélioration  $u^k$  et de l'âge virtuel juste avant l'intervention de maintenance.

$$v_k = v(t_a, u^k) \text{ avec } v_0 = v(., 1) \quad (3.6)$$

Avec cette modélisation, il est évident que  $0 \leq u^k \leq 1$  et que  $u^k$  représente l'impact d'une action de maintenance imparfaite sur le processus de dégradation. Si  $u^k = 0$ , l'action de maintenance imparfaite n'a aucun impact sur l'évolution de la dégradation du système, c.-à-d. que le niveau de dégradation après maintenance restera inchangé. Par contre, si  $u^k = 1$ , le niveau de détérioration et l'âge virtuel du système après maintenance sont remis à zéro, c.-à-d. que le composant/système est complètement restauré et devient comme neuf. En conséquence, l'action imparfaite correspond à une action parfaite.

Les facteurs d'influences principaux sur la qualité d'une action de maintenance  $u^k$  sont :

- le coût de maintenance relatif, noté  $\xi$  qui est défini comme le rapport du coût d'une action de maintenance imparfaite divisé par celui d'une action de maintenance parfaite ( $0 < \xi \leq 1$ );
- l'âge réel  $t$  du composant/système avant la maintenance;
- le nombre d'actions de maintenance imparfaite exécutées depuis le dernier remplacement (action corrective ou préventive parfaite)  $k$ .

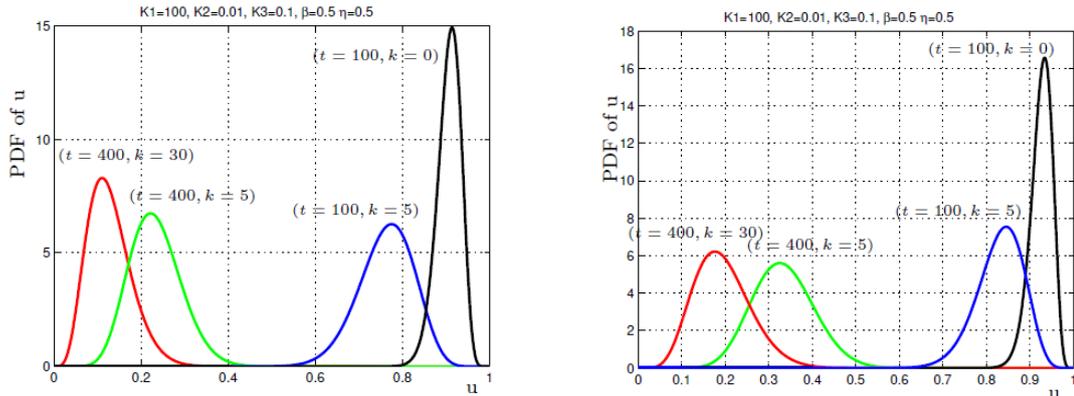


FIGURE 3.3 – Illustration sur la distribution de  $u^k$  avec différentes valeurs de  $\xi$ ,  $t$  et  $k$

La figure 3.3 illustre la distribution de  $u^k$  avec différentes valeurs de  $\xi$ ,  $t$  et  $k$  en utilisant la loi de Beta [54].

La description détaillée de ce modèle ainsi que son application en optimisation de maintenance conditionnelle sont présentées dans C18.

## 3.2 Modèles de dégradation avec interactions d'états entre composants

### 3.2.1 Présentation générale

#### Contexte

Ce travail de recherche a fait l'objet d'une collaboration internationale avec le Pr. Phil Scarf à l'Université de Salford, Manchester, UK.

Il a donné également lieu à un travail de stage Master 2 (Khanh LeSon) et à ma participation au projet VITTEL (voir Section 1.5.4).

#### Quelques précisions sur la problématique et les enjeux

Pour certains systèmes à composants multiples soumis à dégradation, il existe souvent des interactions d'états entre composants [104]. Dans ce contexte, Rasmekomen et Parlikad [168] proposent un modèle de dégradation avec lequel la vitesse de dégradation d'un composant dépend du niveau de dégradation d'autres composants. Il est montré dans ce travail que ce type de dépendance a un impact significatif en optimisation de maintenance conditionnelle. Cependant, la dépendance intrinsèque de l'état n'est pas considérée dans ce

travail. Pour pallier cette problématique, Bian et Gebraeel [20, 21] proposent un modèle plus complet avec la considération à la fois des interactions intrinsèque et extrinsèque d'états (l'évolution de la dégradation d'un composant peut dépendre non seulement de son niveau de dégradation mais aussi du niveau de dégradation d'autres composants). Il est important de noter que le modèle proposé dans ce travail est limité aux dépendances linéaires. Cette hypothèse n'est pas tout à fait justifiée d'un point de vue pratique. De plus, le modèle proposé n'a pas été réellement appliqué sur un cas concret. Dans ce sens, il est intéressant dans un premier temps de développer des modèles de dégradation permettant de prendre en considération des interactions d'états (linéaire et non-linéaire) entre composants. Dans un second temps, il est judicieux d'investiguer l'applicabilité du modèle à un cas réel (plate-forme) pour pouvoir justifier et valider ces modèles. En lien avec ce double besoin, plusieurs problématiques sont soulevées :

- Développement de modèles d'interactions intrinsèque et extrinsèque entre composants ;
- Développement de modèle de dégradation permettant de prendre en compte ces interactions d'états ;
- Estimation des paramètres des modèles proposés avec des données réelles/expérimentales.

### **Originalité et faits marquants**

Face à ces problématiques, nous avons proposé dans un premier temps un modèle général de dégradation permettant de prendre en considération des interactions (intrinsèque et extrinsèque) de dégradation entre composants. Ce dernier nous permet de fournir une meilleure prédiction sur la date de défaillance ou la durée de vie résiduelle (RUL) des composants. Le modèle proposé a été ensuite et testé et validé à partir d'expérimentations menées sur une plate-forme localisée à l'Université de Salford (UK). Les résultats expérimentaux montrent bien l'existence d'interactions d'états entre composants et la pertinence du modèle proposé. Les résultats expérimentaux ainsi que les modèles proposés ouvrent également une porte de recherche sur l'amélioration de méthodes de pronostic existantes pour lesquelles les interactions d'états sont souvent ignorés (par exemple dans les travaux dans la communauté émergente PHM (Prognostics and Health Management)).

En termes de production scientifique, ces travaux de recherche se sont traduits par deux revues internationales indexées JCR (R19, R16), une soumission en revue (RS3) et 3 papiers de conférences (C37, C29, C25). Le papier de conférence C37 a été nommé comme un meilleur papier dans la conférence IEEE PHM 2017. Le papier C25 a été nommé comme un des quatre papiers finalistes pour un Award de meilleur papier à la conférence Safeprocess2015.

## Outillages scientifiques utilisés

Les modèles développés sont basés sur une combinaison de processus gamma et la technique d'estimation de paramètres par filtres particulières.

### 3.2.2 Synthèse des travaux majeurs développés

Comme déjà défini, l'évolution naturelle du niveau de dégradation d'un composant  $i$  peut être décrite par

$$X_{t+1}^i = X_t^i + \Delta X_t^i, \quad (3.7)$$

avec  $\Delta X_t^i$  est l'incrément du niveau de dégradation du composant  $i$  ( $i=1,2,\dots$ ) pendant une unité de temps (de  $t$  à  $t+1$ ).  $\Delta X_t^i$  peut être séparé en deux parties comme suit :

$$\Delta X_t^i = \Delta X_t^{ii} + \Delta X_t^{ji} \text{ with } i, j = 1, 2, \dots \text{ and } (i \neq j), \quad (3.8)$$

avec :

- $\Delta X_t^{ii}$  est l'incrément du niveau de dégradation du composant  $i$  induit par le composant  $i$  lui-même pendant une unité de temps, à savoir l'effet intrinsèque. Cela signifie que  $\Delta X_t^{ii}$  ne dépend que de l'état du composant  $i$  (son niveau de dégradation à l'instant  $t$ ).  $\Delta X_t^{ii}$  peut être spécifié comme une variable déterministe ou aléatoire.
- $\Delta X_t^{ji}$  est l'incrément du niveau de dégradation du composant  $i$  induit par le composant  $j$  pendant une unité de temps, appelée l'effet d'interaction.  $\Delta X_t^{ji}$  représente l'interaction d'état entre les deux composants  $j, i$  et peut être aussi spécifié comme une variable déterministe ou aléatoire.

Quelques variantes du modèle proposé peuvent être spécifiées comme suit :

- Cas 1**  $\Delta X_t^{ii} > 0$  et  $\Delta X_t^{ji} = 0$  : aucun effet d'interactions entre composants et le modèle proposé devient un modèle classique décrivant le comportement de dégradation des composants indépendants [147, 187, 204].
- Cas 2** :  $\Delta X_t^{ii} = 0$  et  $\Delta X_t^{ji} > 0$ , ici, les deux composants sont dépendants mais l'incrément du niveau de dégradation du composant  $i$  ne dépend pas de son niveau de dégradation. Pour ce cas, le modèle proposé correspond au modèle introduit dans [169] où l'effet d'interaction ( $\Delta X_t^{ji}$ ) est décrit par une distribution normale dont les paramètres dépendent du niveau de dégradation du composant  $j$ .
- Cas 3** :  $\Delta X_t^{ii} > 0$  et  $\Delta X_t^{ji} > 0$ , l'évolution de la dégradation de chaque composant dépend non seulement de son état (niveau de dégradation) mais aussi de l'état de l'autre composant.

Considérons par exemple le cas particulier où l'effet intrinsèque  $i$  ( $i = 1, 2, \dots$ )  $\Delta X_t^{ii}$  est aléatoire et distribué selon la loi gamma avec le paramètre de forme  $\alpha^i$  et le paramètre d'échelle  $\beta^i$ . Les effets d'interactions ( $\Delta X_t^{ji}$ ) sont des fonctions non linéaires par rapport au niveau de dégradation du composant  $j$

$$\Delta X_t^{ii} = \Gamma(\alpha^i, \beta^i), \quad (3.9)$$

et,

$$\Delta X_t^{ji} = \mu^j \cdot (X_t^j)^{\sigma^j}, \quad (3.10)$$

avec  $\mu^j, \sigma^j$  sont des nombres réels non négatifs quantifiant l'impact du composant  $j$  sur le processus de dégradation du composant  $i$ . La figure 3.4 illustre l'évolution de la dégradation des deux composants dépendants. A noter que lorsque le niveau de dégradation d'un composant atteint son seuil de défaillance, il est immédiatement remplacé par un nouveau composant correspondant, c.-à-d. que son niveau de détérioration est remis à zéro. Les résultats de la figure 3.4 montrent que l'effet d'interaction a un impact important sur le processus de dégradation des composants.

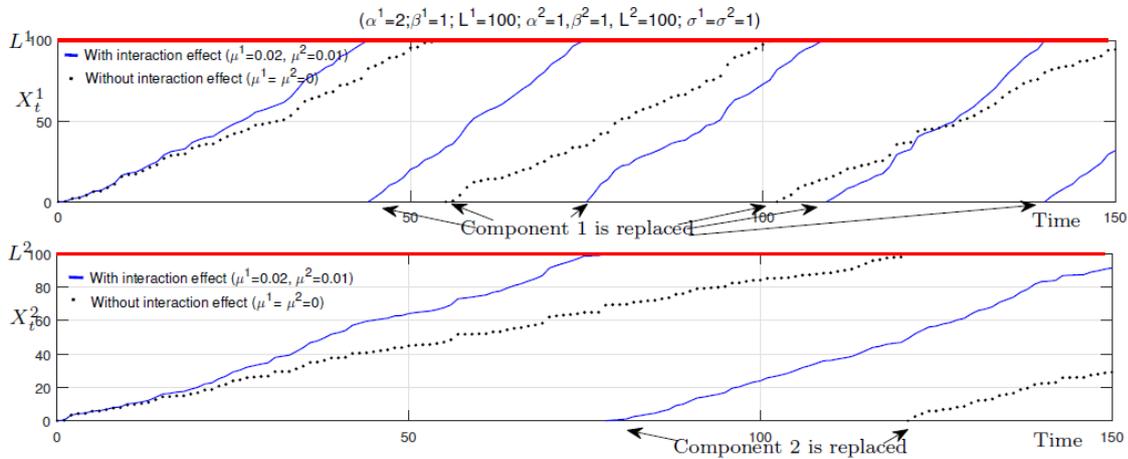


FIGURE 3.4 – Illustration de l'évolution de la dégradation avec interactions d'états entre deux composants

Pour valider les modèles proposés, une plate-forme de transmission mécanique a été construite par notre partenaire britannique (Université de Salford). La plate-forme est principalement composée de deux engrenages d'entraînement (drive gear) et un moteur (voir la figure 3.5). Différents scénarios expérimentaux ont été menés afin d'étudier l'existence d'interactions intrinsèque et/ou extrinsèque d'états entre composants.

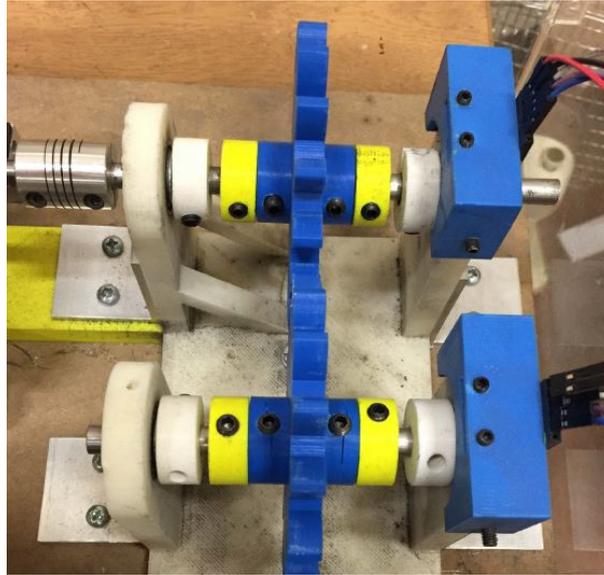


FIGURE 3.5 – Système de transmission mécanique de deux composants

Les données ont été collectées à partir de différents scénarios d'exécutions :

**Exécution 1 :** La première exécution de la plate-forme a été effectuée jusqu'à ce qu'un niveau élevé des vibrations sur la plate-forme soit détecté (seuil  $L = 0,8$ ). Le composant C1 est ensuite remplacé.

**Exécution 2 :** La deuxième exécution a ensuite été effectuée jusqu'à un niveau de vibration forte sur le système. Il est à noter que par rapport à l'exécution 1, l'apparition de fortes vibrations s'est produite sur une période de temps plus courte. Le composant C1 est ensuite remplacé à nouveau.

**Exécution 3 :** La dernière exécution a ensuite été effectuée sur le même principe. L'exécution s'est arrêtée quand un niveau de vibration forte ait été détectée. Ce dernier s'est produit sur une période encore plus courte que lors des deux premiers essais.

Le tableau 3.1 donne la "durée" avant la défaillance du composant C1 dans différents scénarios expérimentaux.

Scénario	Etat de C1	Etat de C2	Nombre de cycles avant la panne de C1	Pourcentage
Exécution 1	Nouveau	Nouveau	7	100
Exécution 2	Nouveau	Dégradé	4	57
Exécution 3	Nouveau	Très dégradé	2	29

TABLE 3.1 – Durée avant la défaillance de C1 dans différents scénarios

L'évolution du niveau de dégradation de chaque composant est donnée dans la figure 3.6.

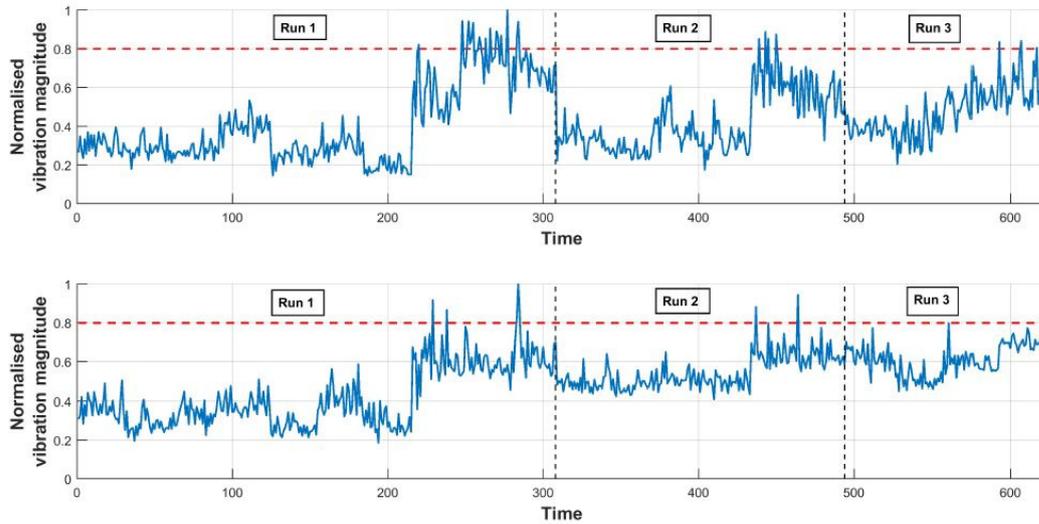


FIGURE 3.6 – Evolution de la dégradation d’engrenages d’entraînement dans trois scénarios expérimentaux

Il est important de noter, dans un premier temps, que les données montrent intuitivement que le composant 1 se dégrade plus rapidement selon l’état du composant 2. Dans un second temps, les données expérimentales obtenues sont utilisées dans les modèles proposés. Dans ce sens, les modèles proposés (Equations (3.8)-(3.10)) sont ajustés avec ces données expérimentales en utilisant des filtres particulières (particle filters). Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 3.2.

Component	$\alpha^i$	$\beta^i$	$\mu^i$	$\sigma^i$
C1	0.0233	0.0425	0.0995	7.6659
C2	0.0125	0.0914	0.0493	9.7375

TABLE 3.2 – Estimateurs des paramètres de modèles de dégradation

Les figures 3.7 et 3.8 montrent l’ajustement de filtres particulières aux données de dégradation du cycle 1 pour les composants 1 et 2 respectivement. Les points gris représentent le niveau de dégradation estimé à chaque pas de temps pour chacune des particules. Par conséquent, ces points gris représentent 1000 trajectoires de dégradation différentes. La ligne pointillée jaune représente la valeur moyenne de ces trajectoires à chaque pas de temps.

Pour mieux valider les résultats obtenus par le filtre particulière, le coefficient de détermination  $R^2$  est calculé. On obtient : pour le composant 1,  $R_1^2 = 0.792$  et pour le composant 2,  $R_2^2 = 0.753$ . En outre, le coefficient de détermination  $R^2$  est calculé également pour le cas où les interactions entre composants ne sont pas considérées (deux

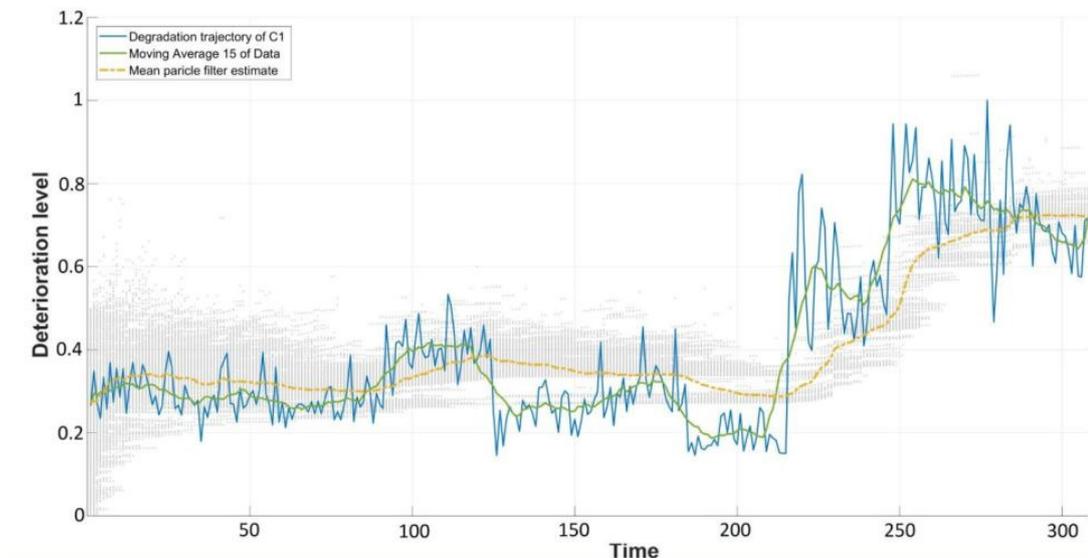


FIGURE 3.7 – Ajustement des estimations, par filtre particulaire, des données de dégradation C1 dans l'exécution 1

processus de dégradation de deux composants sont indépendants). Les résultats obtenus sont :  $R_1^2 = 0.671$  et  $R_2^2 = 0.575$ . Ces résultats montrent que la prise en compte des interactions entre composants permet de fournir une meilleure précision sur l'évolution du processus de dégradation d'un composant.

La description complète des modèles proposés ainsi que les études expérimentales menées sont détaillées dans R16, C37 et C29.

Il est à noter que l'impact des interactions d'états entre composants en optimisation de maintenance conditionnelle a été également menée dans mes recherches. La description détaillée sur cette étude est donnée dans R19 et C17.

### 3.3 Conclusion

Dans cet axe de recherche, différents modèles de dégradation ont été proposés pour un composant isolé ou pour des composants en interaction. Plus précisément :

- Deux modèles de dégradation au niveau composant : les modèles proposés permettent de prendre en considération de façon efficace l'impact d'une action de maintenance imparfaite ;
- Un modèle de dégradation au niveau système qui permet d'intégrer des interactions d'états entre composants.

L'application de modèles de dégradation proposés en pronostic de défaillance et en opti-

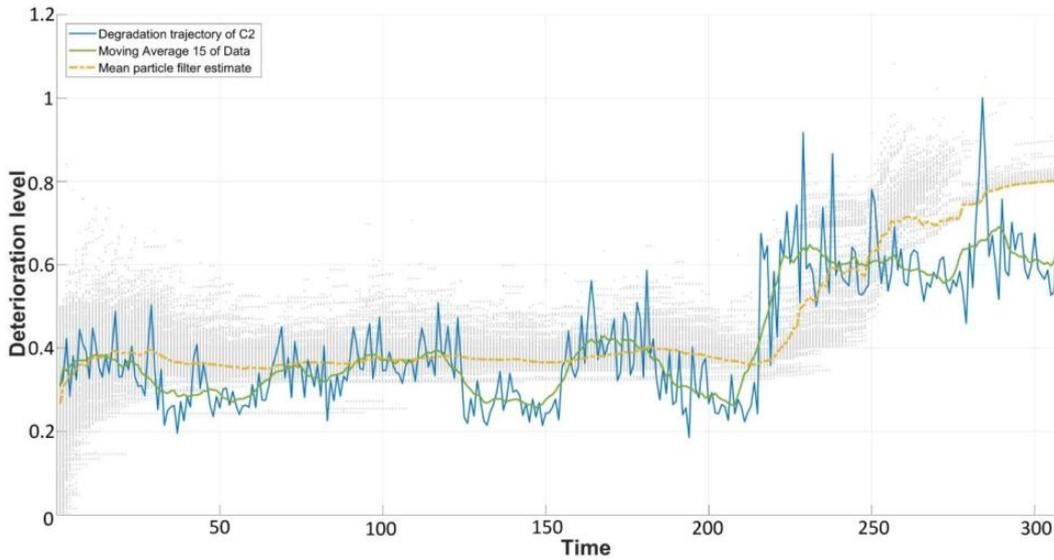


FIGURE 3.8 – Ajustement des estimations, par filtres particulaires, des données de dégradation C2 dans l'exécution 1

misation de maintenance a été également investiguée. Différentes études sur la pertinence de chaque modèle proposé ont été menées à partir de données simulées ou/et expérimentales. Les modèles de dégradation proposés ouvrent différents champs d'investigation en modélisation, formulation mathématique et estimation de paramètres pour des communautés de recherche. L'extension d'un modèle de dégradation proposé est prévu dans mon projet de recherche qui est présenté dans le chapitre 6.

# Chapitre 4

## Travaux sur des indicateurs d'aide à la décision en maintenance

Mes travaux de recherche sur cet axe de recherche s'appuient sur deux contributions originales. La première contribution porte sur le développement de nouveaux indicateurs fiabilistes pour la prise de décision en maintenance (**contribution n° 3**). La synthèse de cette contribution est présentée dans la section 4.1. Dans la section 4.2 est donnée la présentation synthétique de la deuxième contribution rattachée à cet axe de recherche (ou **contribution n° 4** dans l'ensemble de mes travaux de recherche réalisés). Celle-ci est relative à la construction d'indicateurs d'efficacité énergétique pour la prise de décision en maintenance. Enfin, quelques conclusions et perspectives sur les travaux de recherche réalisés autour de cet axe de recherche sont données dans la dernière section de ce chapitre.

### 4.1 Développement de nouveaux indicateurs fiabilistes pour la prise de décision en maintenance

#### 4.1.1 Présentation générale

##### Contexte

Ce travail a fait objet d'une collaboration internationale avec le Pr. Christophe Bérenghier, (Gipsa-Lab, INP-Grenoble) et le Pr. Emanuele Borgonovo, (Bocconi University, Italy).

## Quelques précisions sur la problématique et les enjeux

Les facteurs d'importance fiabilistes permettent de fournir des informations sur l'importance des composants vis-à-vis des performances fiabilistes d'un système. Ces facteurs d'importance sont un outil efficace pour la prise de décision dans les études de fiabilité, d'analyse de risques, en maintenance, en exploitation ou en conception [57]. Dans le cadre de la maintenance conditionnelle/prévisionnelle, l'état courant des composants (ex. état binaire, niveau de dégradation) et la dépendance entre composants (ex. dépendances économiques, stochastiques) sont des facteurs clés pour la prise de décision en maintenance. Cependant, les indicateurs d'aide à la décision en maintenance existants ne permettent pas réellement de prendre en considération ces deux facteurs [22, 109, 227]. Ce constat a requis le développement de nouveaux indicateurs d'aide à la décision en maintenance qui soulèvent les deux problématiques suivantes :

- Définition et formulation de nouveaux indicateurs intégrant à la fois les informations courantes et des interactions entre composants ;
- Application de ces indicateurs proposés dans la prise de décision en maintenance.

## Originalité et production scientifiques

Face à ces problématiques, nous avons proposé deux nouveaux indicateurs d'aide à la décision en maintenance RIM (conditional reliability-based importance measure) et LIM (Mean residual life-based importance measure). Ces indicateurs proposés permettent de prendre en compte à la fois les informations courantes (ex. données par un système de surveillance) et des dépendances (économiques, stochastiques, structurelles) entre composants. Nous avons ensuite proposé une formulation de ces deux indicateurs à la fois pour un composant isolé ou un groupe de composants. L'application de ces deux indicateurs dans la prise de décision en maintenance a été également menée. Les résultats numériques nous ont montré que l'information courante et des interactions entre composants jouent un rôle important dans le classement des composants/groupes de composants pour la prise de décision en maintenance. Cela permet de sélectionner plus efficacement un composant ou un groupe de composants pour la maintenance préventive.

Ces travaux de recherche se sont traduits par une revue internationale indexée JCR (R23) et 2 papiers de conférences (C43 et C33).

## Outillages scientifiques utilisés

Les indicateurs sont développés en se basant principalement sur des outils de modélisation de fiabilité :

- Modèles de durée de vie : lois Weibull, Markov ;

— Modèles de dégradation : processus gamma, Wiener, Markov.

Pour l'évaluation de ces indicateurs, le développement mathématique et la simulation de Monte-Carlo sont utilisés.

## 4.1.2 Synthèse des travaux majeurs développés

### Définition et formulation de l'indicateur décisionnel RIM

L'indicateur RIM (Reliability-based Importance Measure) pour un composant  $i$  est défini comme suit :

$$RIM^i(u, t) = R(t + u | \mathfrak{F}_t, \mathfrak{F}_t^i = 3) - R(t + u | \mathfrak{F}_t), \quad (4.1)$$

avec

- $R(t + u | \mathfrak{F}_t)$  est la fiabilité prévisionnelle du système sachant que l'information disponible sur le système à l'instant  $t$ ,  $\mathfrak{F}_t$  ( $\mathfrak{F}_t = 1$  si le système fonctionne encore à l'instant  $t$ ,  $\mathfrak{F}_t = 0$  sinon) ;
- $R(t + u | \mathfrak{F}_t, \mathfrak{F}_t^i = 3) \geq R(t + u | \mathfrak{F}_t)$  est la fiabilité prévisionnelle du système sachant le composant  $i$  est préventivement remplacé à l'instant  $t$  ;
- $\mathfrak{F}_t^i$  représente l'information disponible sur le composant  $i$  à l'instant  $t$ .
  - $\mathfrak{F}_t^i = 0$  si le composant  $i$  est en panne à l'instant  $t$  ;
  - $\mathfrak{F}_t^i = 1$  si le composant  $i$  fonctionne encore à l'instant  $t$  mais son niveau de dégradation n'est pas disponible ;
  - $\mathfrak{F}_t^i = 2$  si le composant  $i$  fonctionne encore à l'instant  $t$  et son niveau de dégradation est mesuré ;
  - $\mathfrak{F}_t^i = 3$  signifie que le composant  $i$  est préventivement remplacé à l'instant  $t$ .

Il est évident que cet indicateur donne l'amélioration potentielle en fiabilité du système global lorsque la réalisation de la maintenance préventive sur un composant sachant les informations disponibles sur les autres composants. Dans ce sens, l'indicateur RIM peut être utilisé pour classer les composants par rapport à leurs améliorations potentielles en fiabilité.

Par définition, à l'indicateur RIM sont rattachées quelques propriétés suivantes :

- Pour un système cohérent,  $R(t + u | \mathfrak{F}_t, \mathfrak{F}_t^i = 3) \geq R(t + u | \mathfrak{F}_t)$ , par conséquent  $RIM^i(u, t)$  n'est pas négatif ;
- $RIM^i(u, t)$  est borné, c-à-d.,  $0 \leq RIM^i(u, t) \leq 1$ , plus précisément :
  - $RIM^i(u, 0) = 0$  car le composant  $i$  est en état neuf à l'instant initial  $t = 0$  ;

- $RIM^i(0, t) = 0$  si le système fonctionne encore à l'instant  $t$  ;
- $RIM^i(u, t) = 0$  si le composant  $i$  fonctionne encore à l'instant  $t$  et son taux de défaillance est constant (c.-à-d., son processus de défaillance est modélisé par la loi exponentielle) ;
- $RIM^i(0, t) = 1$  si le composant  $i$  est un composant critique et il est en panne avant  $t$ , c.à-d. le système est en panne avant  $t$ . Le remplacement du composant  $i$  à l'instant  $t$  restaure l'état fonctionnel du système.
- $RIM^i(u, t)$  peut dépendre non seulement de  $t$  et  $u$  mais aussi des niveaux d'informations disponibles des composants à l'instant  $t$ . La figure 4.1 illustre l'évolution de l'indicateur RIM par rapport aux niveaux de dégradation de deux composants.

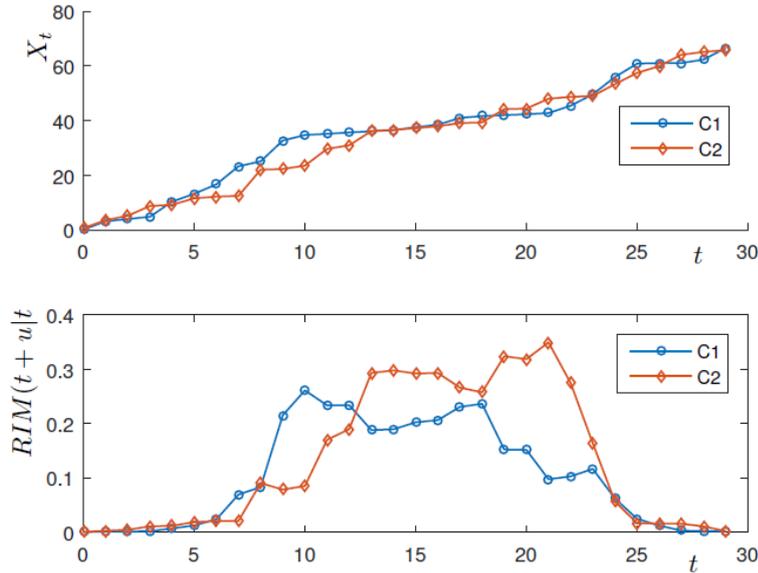


FIGURE 4.1 – Trajectoires de dégradation et RIM pour un système à deux composants.

Cet indicateur peut être appliqué à un groupe de composants ( $G = \{j_1, \dots, j_k\}$  avec  $k = 2, 3, \dots$ ) comme suit :

$$RIM^{\{j_1, \dots, j_k\}}(u, t) = R(t + u | \mathfrak{F}_t, \{\mathfrak{F}_t^{j_2} = 3, \dots, \mathfrak{F}_t^{j_k} = 3\}) - R(t + u | \mathfrak{F}_t). \quad (4.2)$$

$RIM^{\{j_1, \dots, j_k\}}(u, t)$  donne l'amélioration potentielle en fiabilité du système quand un groupe de composants est remplacé simultanément. Ceci permet de classer l'importance d'un groupe de composants par rapport à la fiabilité prévisionnelle du système pour aider la prise de décision en maintenance.

Il est important de souligner que le RIM n'est pas additif, c.-à-d. :

$$RIM^{\{j_1, \dots, j_k\}}(u, t) \neq \sum_{l=1}^k RIM^{\{j_l\}}(u, t). \quad (4.3)$$

Afin d'intégrer le coût de maintenance dans la prise de décision en maintenance, une extension de l'indicateur RIM a été menée. Plus précisément, le  $RIM_c$  pour le composant  $i$  est défini comme suit :

$$RIM_c^i(u, t) = \frac{h(RIM^i(u, t))}{C_P^i}, \quad (4.4)$$

avec,

- $C_P^i$  est le coût de maintenance préventive pour le composant  $i$  ;
- $h(RIM^i(u, t))$  est une fonction de bénéfice en regard de l'amélioration potentielle en fiabilité du système global lorsque la maintenance préventive sur le composant  $i$  est réalisée à l'instant  $t$ . Il convient de noter que  $h(RIM^i(u, t))$  peut être vu comme un gain en termes de coût associé à l'amélioration en fiabilité du système.

Comme  $RIM_c^i(u, t)$  indique le rapport entre le gain induit par le remplacement du composant  $i$  et son coût de maintenance préventive, il fournit une information plus "complète" pour la prise de décision en maintenance. Dans ce sens, on peut distinguer deux cas spécifiques :

- $RIM_c^i(u, t) \geq 1$ , c.-à-d. le gain  $h(RIM^i(u, t))$  est plus grand que le coût de maintenance, par conséquent, la maintenance préventive du composant  $i$  est "rentable" (cost-effective) à l'instant  $t$ , c.-à-d., il est un candidat admissible pour la maintenance préventive à l'instant  $t$  d'un point de vue économique ;
- $0 \leq RIM_c^i(u, t) < 1$ , la maintenance préventive du composant  $i$  n'est pas "rentable". Par conséquent, le composant  $i$  n'est pas un candidat pour la maintenance préventive à l'instant  $i$ .

De façon similaire, le  $RIM_c$  peut être appliqué à un groupe de composants  $G = \{j_1, ..j_k\}$  comme suit :

$$RIM_c^{\{j_1, ..j_k\}}(u, t) = \frac{h(RIM^{\{j_1, ..j_k\}}(u, t))}{C_P^G} \quad (4.5)$$

avec  $C_P^G$  est le coût total de maintenance préventive lorsque le groupe de composants  $G = \{j_1, ..j_k\}$  est remplacé simultanément. Le calcul de  $C_P^G$  est donné dans la l'équation (4.6) en intégrant les dépendances économiques entre composants du groupe.

$$C_P^G = \sum_{i \in G} C_P^i - \underbrace{\left( \sum_{i \in G} c_0^i - c_0^G \right)}_{\text{profit économique : positif}} - \underbrace{C_d \cdot \left( \sum_{i \in G} d^i \cdot \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique}\}} - d^G \cdot \mathcal{I}_{\{G \text{ est critique}\}} \right)}_{\text{profit du coût d'arrêt planifié : positif ou négatif}}, \quad (4.6)$$

avec

- $c_0^i$  et  $c_0^G$  sont les coût de mise en oeuvre (coût de préparation de la maintenance) pour la maintenance du composant  $i$  et du groupe  $G$  respectivement ;
- $d^i$  et  $d^G$  sont les durées de maintenance du composant  $i$  et du groupe  $G$  respectivement ;
- $C_d$  est le coût d'indisponibilité du système par unité de temps.

Il est évident que l'indicateur  $RIM_c$  permet de prendre en considération à la fois les informations disponibles sur les composants à l'instant  $t$  et leur interaction (dépendance économique).

Il est important de noter que les RIM et  $RIM_c$  peuvent fournir deux classements différents des composants/groupes de composants pour la prise de décision en maintenance car leurs fonctions objectifs sont différentes. Ils sont cependant complémentaires, c.-à-d., leur utilisation conjointe permet de fournir les éléments plus "complets" pour la prise de décision. La description détaillée sur l'application de RIM et  $RIM_c$  dans la prise de décision en maintenance est présentée dans R23 et C33.

### Définition et formulation de l'indicateur décisionnel LIM

Afin de prendre en considération la durée de vie résiduelle dans la prise de décision en maintenance, nous avons proposé un autre indicateur, appelé LIM (Mean residual life-based importance measure) sur le même principe du facteur  $RIM/RIM_c$ . Plus précisément, le LIM pour un composant  $i$  est défini comme suit :

$$LIM^i(t) = MRL(t|\mathfrak{F}_t^i = 3) - MRL(t), \quad (4.7)$$

avec

- $MRL(t)$  est la durée de vie moyenne restante du système global sachant les informations disponibles à l'instant  $t$  ;
- $MRL(t|\mathfrak{F}_t^i = 3)$  la durée de vie moyenne restante du système global lorsque le remplacement du composant  $i$  est réalisé à l'instant  $t$ .

Par définition,  $LIM^i(t)$  fournit l'amélioration potentielle sur la durée de vie résiduelle du système quand le composant  $i$  est préventivement remplacé à l'instant  $t$ . Dans ce sens, l'indicateur LIM peut être utilisé pour identifier le composant le plus important à remplacer afin de pouvoir prolonger la durée de vie du système.

Par définition, de l'indicateur LIM dérivent les propriétés suivantes :

- Pour un système cohérent  $MRL(t|\mathfrak{F}_t^i = 3) \geq MRL(t)$ , par conséquent  $LIM^i(t)$  n'est pas négatif ;
- $LIM^i(0) = 0$  ;

- $LIM^i(t) = 0$  si le composant  $i$  fonctionne encore à l'instant  $t$  et son taux de défaillance est constant ;
- $LIM^i(t)$  peut dépendre non seulement du temps mais aussi des informations relatives aux états des composants (état de marche/panne, niveau de dégradation) à l'instant  $t$ .

Il convient de noter que l'indicateur LIM peut être appliqué aux groupes de composants dans le but d'identifier le groupe de composants (ex. groupe de 2 composants) le plus important à remplacer simultanément afin d'améliorer la durée de vie restante du système global. Une extension du LIM, appelé  $LIM_c$ , en intégrant le facteur de coût a été étudiée. De plus, l'application du LIM/ $LIM_c$  dans la prise de décision en maintenance a été également menée. La description détaillée de ces études est donnée dans C43.

Enfin, il est important de souligner qu'une étude comparative sur l'utilisation de deux indicateurs proposés (RIM et LIM) dans la prise de décision a été initiée dans la collaboration avec Pr. Christophe Bérenguer et Pr. Emanuele Borgonovo.

## 4.2 Construction d'indicateurs d'efficacité énergétique pour la prise de décision en maintenance

### 4.2.1 Présentation générale

#### Contexte

Ce travail a fait l'objet de la thèse d'Anh Hoang réalisée au CRAN et soutenue en juillet 2017 que j'ai co-dirigé avec Pr. Benoit Iung. L'objectif de cette thèse est d'investiguer la problématique de considération de l'efficacité énergétique et de sa prévision comme nouvel indicateur dans la prise de décision en maintenance.

#### Quelques précisions sur la problématique et les enjeux

L'optimisation énergétique est considérée comme un défi majeur en regard non seulement d'une compétitivité économique mais aussi d'un impact environnemental et d'une gestion des ressources en énergies [9]. Cette maîtrise est aussi celle défendue par le développement durable et se construit prioritairement par une amélioration de l'efficacité énergétique (EE), c.-à-d., réduire la quantité d'énergie requise pour produire des produits et des services. Elle est d'autant plus grande que l'installation, le système utilisent le moins d'énergie possible tout en étant proche de leur point de fonctionnement nominal optimal. L'EE est donc à considérer aujourd'hui comme un indicateur clé du développement durable, de l'écologie industrielle [19]. Dans la littérature, l'efficacité énergétique

a été récemment étudiée dans des problèmes d'optimisation de maintenance. Cependant, cet indicateur est souvent considéré et intégré dans des modèles de maintenance en termes de coût [42, 231]. Nous nous intéressons à utiliser la performance d'efficacité énergétique comme un indicateur de décision en maintenance. Les indicateurs développés doivent pouvoir (1)-prendre en considération non seulement le niveau de dégradation d'une entité (composant/système) mais aussi des facteurs d'influence (statiques et dynamiques) et (2)-être applicables aux différents niveaux d'abstraction d'un système industriel. En lien avec ce double besoin, plusieurs problématiques sont soulevées :

- Définition et formulation d'indicateurs d'efficacité énergétique pour différents niveaux d'abstraction (composant, système/fonction) ;
- Pronostic de l'évolution de ces indicateurs tenant compte de processus de dégradation, des paramètres d'influence, etc. ;
- Utilisation de ces indicateurs pour la prise de décision en maintenance.

### Originalité et production scientifiques

Face à ces problématiques, nous avons proposé un indicateur d'efficacité énergétique (EEI) défini comme la quantité d'énergie consommée pour produire un produit ou un service spécifique. Nous avons proposé ensuite une formulation générique permettant d'évaluer cet indicateur à la fois aux niveaux composant et fonction/système en tenant compte de l'ensemble facteurs d'influence (y compris niveau de dégradation) associés aux propres composants et aussi aux interactions entre composants. Nous avons développé également une approche générique permettant d'utiliser des algorithmes de pronostic existants pour prédire l'évolution de cet indicateur d'efficacité énergétique. Ceci nous a permis de proposer un indicateur représentatif de la performances énergétique, appelé REEL (Remaining energy-efficient lifetime), une originalité particulière de ce travail. Les indicateurs proposés ont été ensuite appliqués et validés sur la plate-forme TELMA (TELéMAintenance) du pôle AIP-PRIMECA Lorraine (Pôle de Ressources Informatiques pour la MÉCANique de l'Atelier Inter-établissement de Productique).

Le travail développé dans cette contribution ouvre une perspective intéressante sur l'utilisation d'indicateurs émergents (EEI et REEL) dans l'optimisation et la prise de décision en maintenance.

Ces travaux de recherche se sont traduits par deux revues internationales indexées JCR (R17 et R14) et une revue nationale (RN1) ainsi que 5 papiers de conférences (C31, C27, C24, C23 et C19).

## Outillages scientifiques utilisés

Les indicateurs développés sont formulés sur la base de processus stochastiques (processus gamma, Wiener,...) et estimés à partir d'algorithmes de pronostic.

### 4.2.2 Synthèse des travaux majeurs développés

#### Construction de l'indicateur EEI

L'indicateur d'efficacité énergétique(EEI) pour un composant  $i$  est défini comme suit

$$EEI_i(t) = \frac{E_i^t}{O_i^t} = \frac{f(t, SF_i^E, DF_i^E)}{g(t, SF_i^O, DF_i^O)}, \quad (4.8)$$

avec

- $E_i^t$  est la consommation énergétique pendant une unité de temps du composant  $i$  à l'instant  $t$  :

$$E_i^t = f(t, SF_i^E, DF_i^E). \quad (4.9)$$

- $O_i^t$  est la performance en sortie (débit) du composant  $i$  à l'instant  $t$  :

$$O_i^t = g(t, SF_i^O, DF_i^O), \quad (4.10)$$

- $DF_i^E$  est l'ensemble des facteurs dynamiques impactant la consommation d'énergie du composant  $i$  tels que le rendement de transformation de l'énergie, les conditions environnementales dans lesquelles le composant évolue, le niveau de dégradation du composant, la qualité des matières premières ;
- $DF_i^O$  est l'ensemble des facteurs dynamiques affectant la performance en sortie du composant  $i$  tels que la disponibilité des fournisseurs, les déchets, les types de produits ;
- $SF_i^E$  est l'ensemble des facteurs statiques influant sur la consommation d'énergie du composant  $i$  tels que l'âge, la planification de production, les compétences des intervenants de pilotage ;
- $SF_i^O$  est l'ensemble des facteurs statiques affectant la performance du composant  $i$ .

Il est important de noter que les deux fonctions ( $f(\cdot)$   $g(\cdot)$ ) sont à identifier et leur forme dépend forcément des caractéristiques du composant  $i$ .

Considérons un système à  $n$  composants qui sont inter-connectés selon une configuration donnée. L'efficacité énergétique de ce système est définie comme suit :

$$EEI_\Sigma(t) = \frac{E_\Sigma^t}{O_\Sigma^t}, \quad (4.11)$$

Où  $E_{\Sigma}^t$  et  $O_{\Sigma}^t$  sont respectivement l'énergie totale consommée et la performance globale du système. Il est important de noter que la performance au niveau système peut être différente de celle liée au niveau composant. Par exemple, la performance en sortie d'une ligne de production peut être le nombre de produits par une unité de temps, le taux de bons produits tandis que, au niveau composant, la performance en sortie de moteurs de la ligne est le nombre de rotations par minute. Suivant l'architecture d'un système à composants multiples, la sortie d'un composant peut devenir l'entrée d'autres composants (ex. série). Ainsi  $E_{\Sigma}^t$  et  $O_{\Sigma}^t$  sont calculés par :

$$E_{\Sigma}^t = \sum_{i=1}^n \omega_i^t E_i^t$$

$$O_{\Sigma}^t = \sum_{i=1}^n \lambda_i^t O_i^t$$

avec,

- $\omega_i^t$  est le facteur de pondération de l'énergie associé au composant  $i$ .  $\omega_i^t$  est directement lié à l'énergie consommée par le composant quand il est intégré dans le système (considération du composant dans la fonction qu'il remplit avec d'autres composants, et non plus uniquement dans une vision isolée) ;
- $\lambda_i^t$  est le facteur de pondération associé à la sortie du composant.  $\lambda_i^t = 0$  si le composant  $i$  ne fournit pas de produits finaux.

L'illustration de cette approche est présentée dans la figure 4.2.

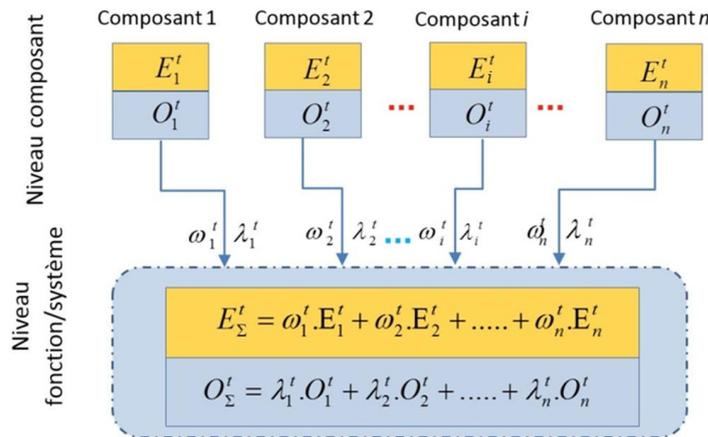


FIGURE 4.2 – Approche d'agrégation pour calculer l'efficacité énergétique au niveau système

### Fondement du concept REEL

Afin d'évaluer la performance d'efficacité énergétique d'une entité (composant, fonction/système) au sens de sa prévision, nous proposons, en dual du concept connu de RUL (Remaining Useful Life), la notion de durée de vie énergétique résiduelle (Remaining Energy-Efficient Lifetime, REEL), définie comme le temps restant avant que cette entité perde sa caractéristique attendue d'efficacité énergétique (seuil d'efficacité énergétique) étant donné l'état actuel de l'entité, les conditions de fonctionnement aux instants passé et futur, les conditions d'usage etc. Mathématiquement, la REEL peut être exprimée comme suit :

$$REEL(t) = \{E[T] : EEI(t+T) = EEI_{threshold} | EEI(t) < EEI_{threshold}\}, \quad (4.12)$$

Où :  $T$  est une variable aléatoire ;  $E[T]$  indique l'espérance mathématique de  $T$  et  $EEI_{threshold}$  est un seuil associé à une propriété d'efficacité énergétique de l'entité. La valeur  $EEI_{threshold}$  est déterminée soit par des exigences de durabilité soit par une phase d'optimisation.

La figure 4.3 illustre le concept de REEL et son application en maintenance.

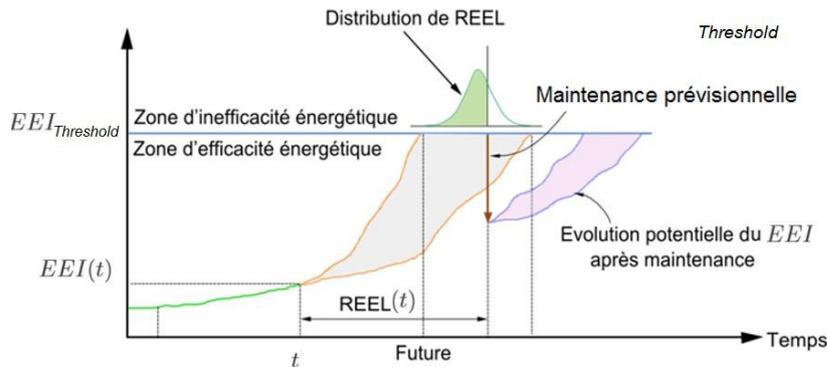


FIGURE 4.3 – Illustration du concept de REEL et son application pour l'aide à la décision en maintenance

Dans la considération EE pour aider à la prise de décision en maintenance prévisionnelle, l'objectif est donc de prédire la performance d'efficacité énergétique (EEI) à différents niveaux d'abstraction du système et par conséquent de calculer la REEL pour chacun de ces niveaux. En ce sens, nous proposons une approche générique se basant sur une combinaison d'approches de pronostic existantes pour prédire l'évolution de l'indicateur EEI et donc calculer la REEL au niveau composant et aussi au niveau fonction/système. L'approche proposée est composée de 3 étapes : (1)-modélisation et formulation de l'indicateur EEI ; (2)-prédiction de l'évolution potentielle des facteurs d'influence, et (3)-calcul

de l'EEI et estimation de REEL. L'illustration de l'approche proposée est donnée dans la figure 4.4.

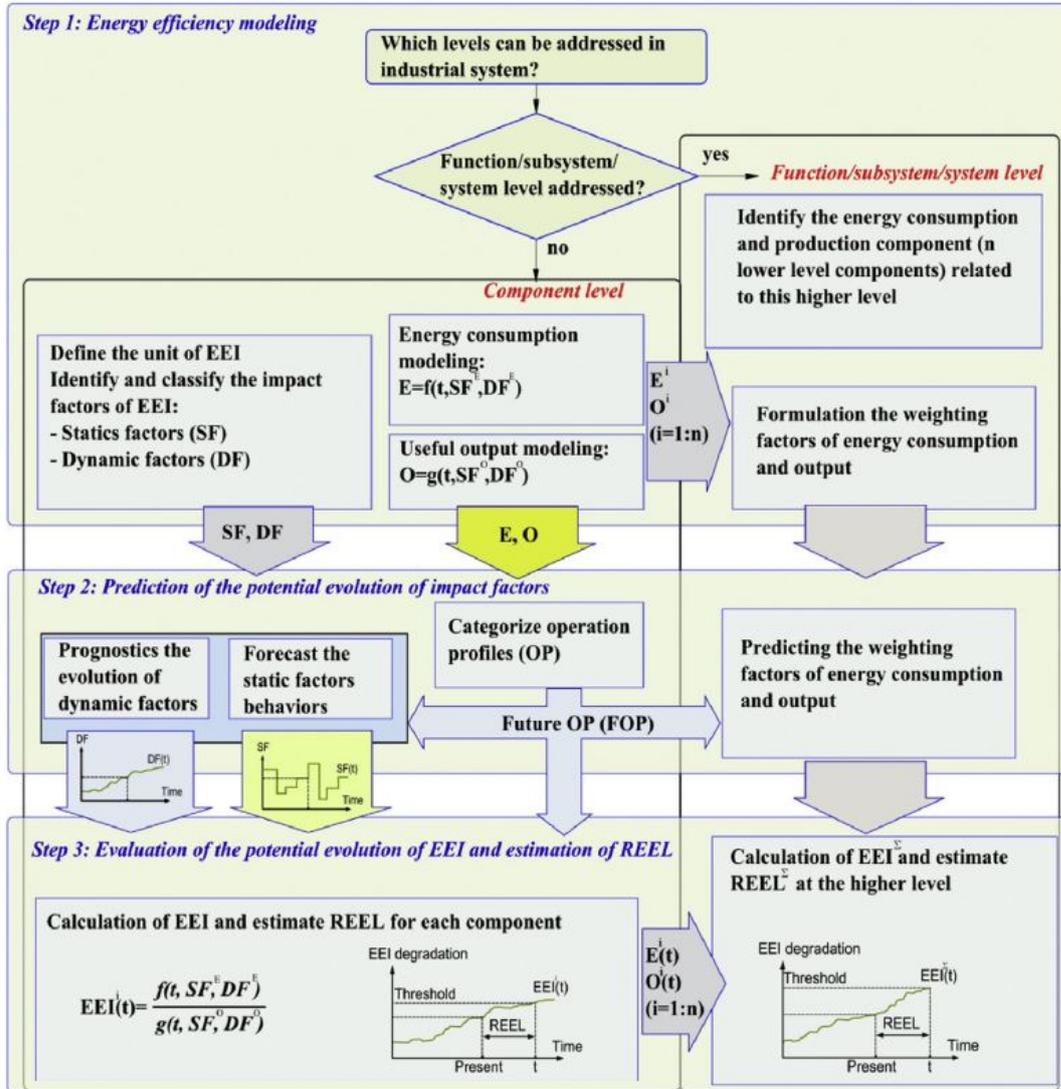


FIGURE 4.4 – Approche générique pour le pronostic de REEL

Pour la validation des concepts proposés (EEI et REEL) ainsi que de l'approche générique pour le pronostic de REEL, des expérimentations ont été menées sur la plate-forme TELMA. La description détaillée est donnée dans R14, C27, C24 et C19.

Il est à noter que l'utilisation de l'indicateur proposé EEI dans l'optimisation de maintenance au niveau composant a été également menée. Les résultats préliminaires sur cette étude montrent bien l'avantage de cet indicateur dans la décision en maintenance conditionnelle par rapport à des indicateurs conventionnels. La description détaillée de cette étude est présentée dans R17 et C31 ou [87].

## 4.3 Conclusion

Dans ce deuxième axe de recherche, des nouveaux indicateurs d'aide à la décision en maintenance ont été proposés pour un système à composants multiples avec dépendances. Plus précisément, les indicateurs proposés sont :

- Deux nouveaux indicateurs fiabilistes synthétisant non seulement les informations relatives aux états des composants (état de marche/panne, niveau de dégradation) à l'instant donné mais aussi l'interaction entre composants (dépendances économiques). Les indicateurs proposés permettent de classer l'importance d'un composant/groupe de composants par rapport à la performance du système (fiabilité, durée de vie résiduelle). Ce dernier fournit des informations judicieuses pour la prise de décision en maintenance ;
- l'indicateur d'efficacité énergétique applicable aux différents niveaux d'abstraction (composant, fonction/système) pour la prise de décision en maintenance. Cet indicateur est particulièrement adapté dans le contexte de développement durable. Nous avons proposé également un nouveau concept de la durée de vie énergétique résiduelle (REEL-Remaining Energy-Efficient Lifetime) pour l'évaluation de la performance énergétique et la prise de décision en maintenance.

L'application de ces indicateurs proposés pour la prise de décision en maintenance a été initiée. Leurs performances et robustesse ont été étudiées à partir de données simulées ou/et expérimentales (plate-forme TELMA). Cependant, l'application d'indicateurs proposés dans la prise de décision dynamique en maintenance à grande échelle dans le contexte de l'industrie du futur reste encore un défi intéressant à investiguer. Ceci est prévu dans mon projet de recherche qui est présenté dans le chapitre 6.



## Chapitre 5

# Travaux sur l'élaboration de stratégies de maintenance prévisionnelle et de regroupement dynamique d'actions

Dans ce chapitre, mes travaux de recherche autour de la thématique "stratégies de maintenance prévisionnelle et de regroupement dynamique d'actions" sont synthétisés. Ils sont structurés en cinq contributions originales :

- Développement de stratégies de maintenance conditionnelle au niveau composant dans un contexte de surveillance imparfaite (**contribution n° 5**);
- Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement de pièces de rechange pour un système à structure complexe (**contribution n° 6**).
- Développement de modèles de regroupement dynamique d'actions de maintenance avec contraintes et opportunité de maintenance (**contribution n° 7**).
- Développement de modèles de regroupement dynamique d'actions de maintenance avec considération de la structure complexe (**contribution n° 8**).
- Développement d'une stratégie de regroupement dynamique d'actions de maintenance pour un système distribué (**contribution n° 9**).

Dans le reste de ce chapitre, dans chaque section est présentée la synthèse de chaque contribution originale.

## 5.1 Développement de stratégies de maintenance conditionnelle au niveau composant dans un contexte de surveillance imparfaite

### 5.1.1 Présentation générale

#### Contexte

L'ensemble des travaux menés dans cette thématique de recherche a donné lieu à un postdoc (Dr. Bin Liu) et des collaborations au sein du département ISET du CRAN.

Il a également donné lieu à des collaborations nationales et internationales avec :

- Pr. Antoine Grall, Dr. Tuan Huynh (LM2S, UTT)
- Pr. Christophe Bérenguer (Gipsa-Lab, INP-Grenoble)
- Dr. Phuong-Khanh Nguyen (ENIT)
- Pr. Min Xie, City University of Hong Kong

#### Quelques précisions sur la problématique et les enjeux

Dans le contexte des surveillances imparfaites, les stratégies de maintenance conditionnelle existantes ne sont plus adaptées [186, 235]. Face à ce défi, plusieurs travaux de recherche sur le développement de nouvelles approches/stratégies de maintenance applicables avec les inspections imparfaites ont été menés. On peut les classer en deux catégories.

- La première s'appuie sur le processus de décision de Markov (partially observable Markov decision process - POMDP) [8, 75, 157]. Cependant, les approches proposées sont majoritairement applicables aux observations discrètes. Il existe très peu de travaux sur des observations continues.
- La deuxième catégorie se fonde sur des techniques d'estimation de l'état réel d'un composant/système à partir de données erronées [66, 101, 232]. Néanmoins, le lien entre la dégradation du système de surveillance (capteur) et son erreur de mesure n'est pas réellement étudié.

En lien avec ce double besoin, plusieurs problématiques sont soulevées :

- Développement de stratégies de maintenance conditionnelle avec des observations continues imparfaites ;
- Modélisation de dégradation du système de surveillance et de son impact dans les données mesurées ;
- Élaboration de règles de maintenance adaptées.

## Originalité et production scientifiques

Face à ces problématiques, nous avons proposé différentes stratégies de maintenance conditionnelle applicables au niveau composant dans un contexte de surveillances imparfaites. Nous avons proposé également un modèle d'observation intégrant à la fois les processus de dégradation d'un composant maintenu et de son système de surveillance.

En termes de production scientifique, ces travaux de recherche se sont traduits par 4 revues internationales indexées JCR (R22, R21, R8 et R4) et 6 papiers de conférences (C41, C32, C30, C18, C14 et C8).

## Outillages scientifiques utilisés

En termes d'outillage, les outils scientifiques suivants sont utilisés :

- Pour la modélisation : processus stochastiques (processus gamma, Wiener) et processus de décision markovien partiellement observable (POMDP)
- Pour des algorithmes d'estimation de paramètre : filtre Kalman
- Pour les calculs : développement des méthodes analytiques et des méthodes numériques (simulation Monte-Carlo)

### 5.1.2 Synthèse des travaux majeurs développés

#### Développement d'une stratégie de maintenance conditionnelle avec information de surveillance imparfaite

Ce travail a fait l'objet d'une collaboration avec Dr. Phuong-Khanh Nguyen (ENIT), Pr. Antoine Grall, Dr. Tuan Huynh (LM2S, UTT) et Pr. Christophe Béranger (Gipsa-Lab, INP-Grenoble).

**Modèle de surveillance imparfaite :** Nous supposons dans ce travail que chaque action d'inspection à l'instant  $T_i$  ne retourne pas un état réel (niveau de dégradation) d'une entité (composant/système). Plus précisément, l'état observé,  $Y_{T_i}$ , est modélisé par :

$$Y_{T_i} = X_{T_i} + \epsilon_q, \quad (5.1)$$

avec,

- $X_{T_i}$  est l'état réel (niveau de dégradation réel) de l'entité à l'instant  $T_i$  ;
- $q$  représente le niveau relatif à la qualité d'une action d'inspection ;

- $\epsilon_q$  est l'erreur de mesure décrite par une distribution gaussienne  $\mathcal{N}(0, \sigma_q^2)$  avec la fonction de densité de probabilité :

$$G_{\sigma_q}(x) = \frac{1}{\sigma_q \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma_q}\right)^2}. \quad (5.2)$$

Selon ce modèle, l'erreur de mesure est caractérisée par l'écart-type  $\sigma_q$ . Plus  $\sigma_q$  est grand, plus l'erreur est importante et  $\sigma_q = 0$  signifie une inspection parfaite.

**Discrétisation des observations :** Pour pouvoir utiliser le modèle de décision avec observation partielle POMDP, les états continus doivent être discrétisés. Dans ce sens, nous avons proposé des modèles permettant de discrétiser les états continus ( $Y_{T_i}$  et  $X_{T_i}$ ) en états discrets ( $O_{T_i}$  et  $Z_{T_i}$ ). L'illustration de cette discrétisation est donnée dans la figure 5.1. La description détaillée des modèles de transformation est donnée dans R21.

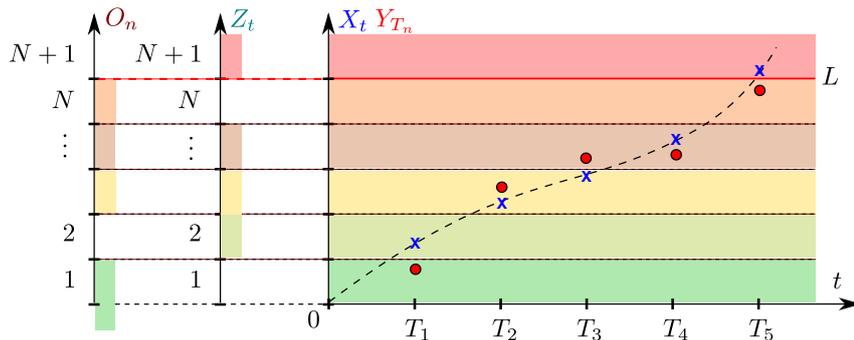


FIGURE 5.1 – Illustration du processus de dégradation et de discrétisation.

**Élaboration d'une stratégie de maintenance adaptée :** Pour la prise de décision sur le choix de la qualité d'une action d'inspection à réaliser et sur le choix d'action de maintenance préventive, nous avons développé une stratégie de maintenance adaptée sur la base de modèle d'aide à la décision POMDP. A chaque l'instant d'inspection régulier  $T_i = T_{i-1} + T$  ( $T$  est une variable de décision à optimiser), la fonction de croyance est calculée. La qualité d'inspection  $q$  est ensuite déterminée en minimisant le coût total de maintenance avec la valeur de la fonction de croyance calculée. Selon l'état observé du système donné par l'action d'inspection choisie, la fonction de croyance est mise à jour. Ce dernier est utilisé pour la prise de décision en maintenance préventive. L'illustration de la stratégie de maintenance proposée est donnée dans la figure 5.2.

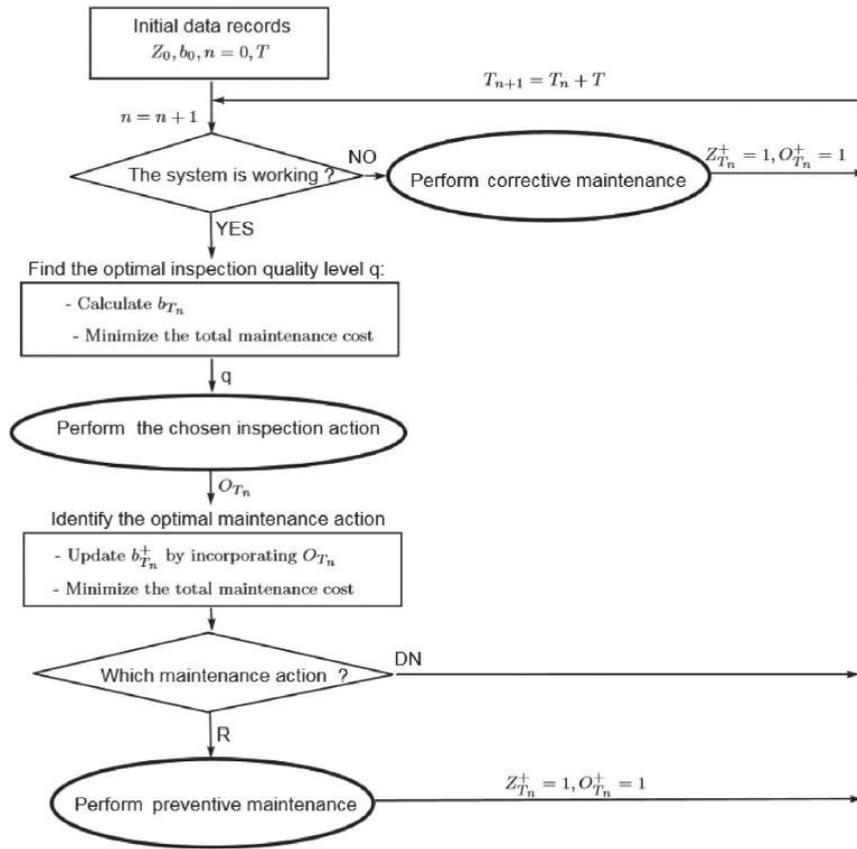


FIGURE 5.2 – Illustration de la stratégie de maintenance proposée.

La performance de la stratégie proposée est ensuite investiguée par des données numériques. Différentes études de sensibilité ont été également menées. Les résultats nous montrent la pertinence des règles de décisions proposées permettant de choisir de façon efficace à la fois la qualité d'inspection et l'action de maintenance préventive à réaliser. La description détaillée de la stratégie de maintenance proposée ainsi que les études de sensibilité sont présentées dans R21.

### Développement d'une stratégie de maintenance conditionnelle en présence de la dégradation du système de surveillance

Ce travail a fait l'objet du postdoc de Dr. Bin Liu et d'une collaboration avec Pr. Min Xie, City University of Hong Kong.

**Modèle d'observation avec dégradation du système de surveillance :** Dans ce travail, nous supposons que le capteur de surveillance est soumis à une dégradation graduelle. Ceci conduit à une erreur dans la mesure réalisée par le capteur. Plus précisément,

nous avons proposé un modèle de mesure comme suit :

$$Y_t = X_t + S_t + \epsilon, \quad (5.3)$$

avec,

- $X_t$  et  $S_t$  sont les niveaux de dégradation de l'entité (composant/système) et de son capteur à l'instant  $t$  ;
- $\epsilon$  est le bruit gaussien  $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$

L'observation à des instants discrets est illustrée dans la figure 5.3.

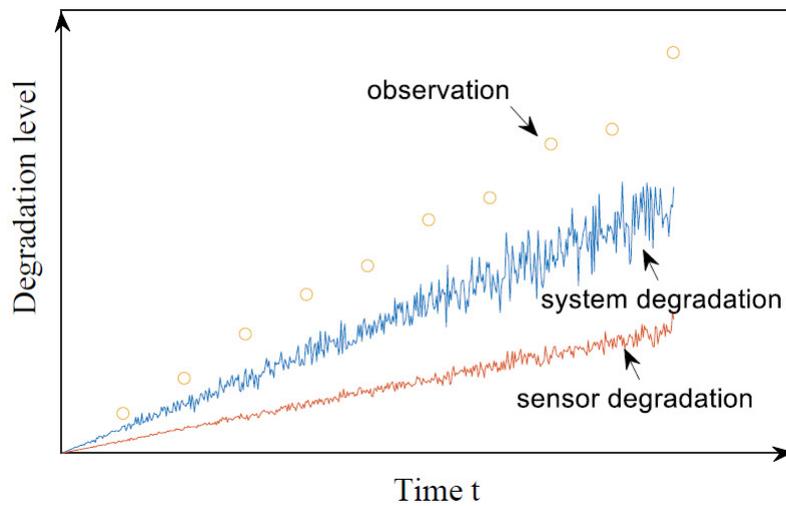


FIGURE 5.3 – Illustration du modèle d'observation avec dégradation du système de surveillance

Pour l'estimation de l'état réel à partir d'observations bruitées, une méthode d'estimation basée sur le filtre Kalman a été développée. Il est important de noter que dans ce travail le processus de dégradation de l'entité,  $X(t)$ , est considéré comme connu. Le processus de dégradation du capteur est inconnu. La méthode proposée permet également d'estimer la fiabilité prévisionnelle de l'entité. La description détaillée de la méthode développée est présentée dans R22.

**Stratégie de maintenance adaptée :** Pour la décision en maintenance, nous avons développé une stratégie de maintenance sur la base de deux variables décisionnelles : durée d'inter-inspection  $T$  et seuil de préventif  $R$ . Plus précisément, à chaque l'instant d'inspection régulier  $T_i = T_{i-1} + T$ , l'état réel de l'entité est estimé à partir de l'observation relevée  $Y_{T_i}$ . La fiabilité prévisionnelle est ensuite calculée,  $R_{T_i}$ . Cette dernière est utilisée pour la prise de décision en maintenance préventive.

- Si l'entité est en état de marche et  $R_{T_i} > R$ , aucune action de maintenance est nécessaire ;
- Si l'entité est en état de marche et  $R_{T_i} \leq R$ , l'entité est remplacée par une entité neuve ;
- Si l'entité est en état de panne, c.-à-d.,  $X_{T_i} \geq L$  ( $L$  est le seuil de défaillance du composant), elle est correctivement remplacée.

Pour la détermination des valeurs optimales de deux variables décisionnelles ( $T$  et  $R$ ), un modèle de coût a été développé. Pour la validation de la stratégie de maintenance et les modèles développés, différentes études numériques ont été investiguées. La description détaillée est présentée dans R22.

### **Développement d'une stratégie de maintenance conditionnelle avec des actions de maintenance imparfaites**

Dans cette étude, on suppose que l'information donnée par le système de surveillance est parfaite mais deux types d'actions de maintenance préventive sont possibles : actions parfaite et action imparfaite. Deux modèles de maintenance imparfaite sont présentés dans la section 3.1.

Nous nous intéressons dans cette étude à un modèle en support pour la prise de décision en maintenance. Dans ce sens, nous proposons une stratégie de maintenance en se basant sur trois variables de décision. Pour la sélection d'une action de maintenance, la décision à l'instant  $T_i$  est basée non seulement sur l'état courant (niveau de dégradation) du composant ( $X_{T_i}$ ) mais aussi sur le nombre d'actions de maintenance imparfaite déjà réalisées depuis la remise en service du composant. Plus précisément :

- Si le composant est en état de panne, c.-à-d.,  $X_{T_i} \geq L$  ( $L$  est le seuil de défaillance du composant), il est correctivement remplacé par un composant neuf.
- Si  $X_{T_i} < M$  ( $M \leq L$ ), le composant est en état de marche et aucune action de maintenance est nécessaire.  $M$  est le seuil de maintenance à optimiser.
- Si  $L > X_{T_i} \geq M$ , le composant est en état de marche mais une action de maintenance préventive (parfaite ou imparfaite) est demandée. Pour sélectionner l'action de maintenance, on se base sur le nombre d'actions de maintenance imparfaite déjà réalisé avant  $T_i$ . S'il est inférieur à un seuil  $K$  une action de maintenance imparfaite est sélectionnée sinon, une action de maintenance parfaite est demandée. Il est à noter que  $k$  est une variable décisionnelle à optimiser.

Pour la détermination de la date d'inspection  $T_i$ , le concept de la durée de vie résiduelle (RUL-Residual Useful Life) est utilisée [41, 73, 233]. Plus précisément,  $T_i$  peut être calculé

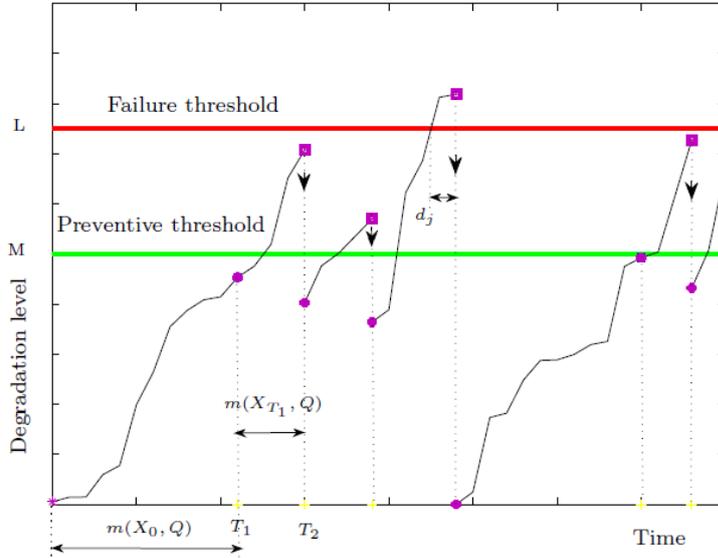


FIGURE 5.4 – Illustration de la stratégie de maintenance proposée.

par :

$$T_i = T_{i-1} + m(X_{T_{i-1}}, Q), \quad (5.4)$$

avec,

$$m(X_{T_{i-1}}, Q) = \{\Delta T : \mathbb{P}(X_{T_{i-1}+\Delta T} \geq L | X_{i-1}) = Q\}.$$

$Q$  ( $0 < Q \leq 1$ ) représente la probabilité que le composant tombe en panne avant la prochaine date d'inspection.  $Q$  est la troisième variable de décision à optimiser.

L'illustration de la stratégie de maintenance proposée est donnée dans la figure 5.4.

Pour déterminer les valeurs optimales de trois variables de décision ( $Q^*, M^*, K^*$ ), le critère de coût est utilisé.

Il est important de souligner que la stratégie de maintenance proposée est flexible car elle couvre différentes stratégies de maintenance existantes. Plus précisément :

- si  $K^* = 0$ , aucune action de maintenance imparfaite est autorisée (selon le critère économique), la stratégie proposée devient une stratégie de maintenance parfaite [60, 85];
- si  $K^* = \infty$ , aucune action de maintenance parfaite est nécessaire. La stratégie proposée devient une stratégie de maintenance imparfaite classique [162, 228];
- si  $0 < K^* < \infty$ , à la fois les actions imparfaites et parfaites sont considérées.

La flexibilité de la stratégie proposée est illustrée dans la figure 5.5.

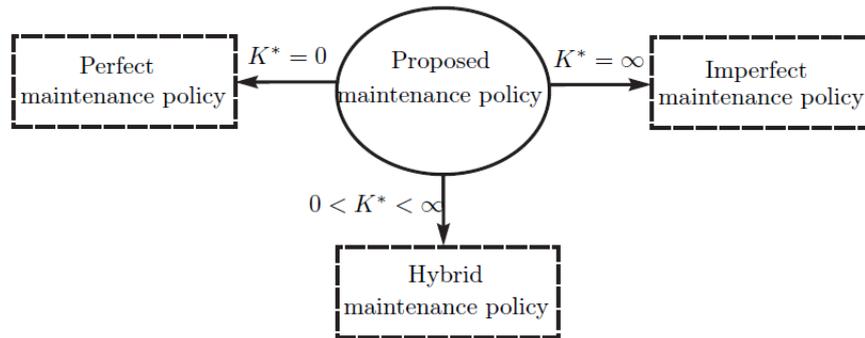


FIGURE 5.5 – Proposed maintenance policy and its related policies.

La performance de la stratégie proposée est analysée à partir des données simulées. Différentes études de sensibilité ont été menées. La description détaillée de cette stratégie de maintenance est présentée dans R8 et C18.

## 5.2 Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle et d’approvisionnement de pièces de rechange pour un système à structure complexe

### 5.2.1 Présentation générale

#### Contexte

Ce travail a fait l’objet de la thèse de Kim-Anh Nguyen soutenue en octobre 2015 que j’ai initiée à l’UTT et co-dirigée avec Pr. Antoine Grall (UTT). L’objectif de cette thèse est de développer des stratégies de maintenance prévisionnelle et d’approvisionnement de pièces de rechange pour un système multi-composant à structure complexe.

Il a donné également lieu à un travail de stage Master 2 (Tuan-Anh Bui).

#### Quelques précisions sur la problématique et les enjeux

Nous nous intéressons dans ce travail à l’optimisation de la maintenance et de l’approvisionnement de pièces de rechange pour un système multi-composant dont sa structure complexe est un élément clé pour la prise de décision en maintenance et en approvisionnement de pièces de rechange. De plus, l’approvisionnement de pièces de rechange et la maintenance sont deux opérations connexes qui doivent être conjointement considérées pour atteindre l’efficacité du coût et du soutien logistique [218]. Cependant, ces deux

opérations sont souvent étudiées séparément. Plus précisément, les pièces de rechange sont gérées par l'opération de gestion des stocks qui s'appuie sur les demandes de pièces de rechange passées indépendamment de la stratégie de maintenance [69, 77, 130]. Pour l'opération de maintenance, il est généralement supposé que les pièces de rechange sont toujours disponibles en cas de besoin [216], donc l'attention n'est basée que sur l'historique de maintenance [152]. Il existe donc un réel intérêt à des modèles conjoints dans lesquels le modèle de maintenance et le modèle d'approvisionnement de pièces de rechange sont conjointement étudiés, évalués et optimisés. En lien avec ce double besoin, plusieurs problématiques sont soulevées :

- Modélisation de la structure complexe et son impact dans le processus d'optimisation de la maintenance et/ou d'approvisionnement de pièces de rechange ;
- Élaboration de règles de décisions adaptées en maintenance et en approvisionnement de pièces d'échange ;
- Proposition de modèles conjoints de la maintenance et de l'approvisionnement de pièces de rechange ;
- Développement de méthodes pour calcul des critères d'optimisation ;
- Détermination des valeurs optimales de variables décisionnelles.

### **Originalité et production scientifiques**

Face à ces problématiques, nous avons proposé des nouvelles stratégies de maintenance conditionnelle permettant de prendre en considération les éléments clés suivants :

- le processus de dégradation intégrant les informations de surveillance de l'ensemble des composants du système
- des impacts de la structure complexe d'un système à composant multiple
- des dépendances économiques (positives et négatives) entre composants

Deux stratégies de maintenance adaptées ont été proposées dans lesquelles différentes règles de décision ont été élaborées pour pouvoir sélectionner de façon efficace un composant ou un groupe de composants à maintenir préventivement. Afin de réduire le nombre de variables de décisions, nous avons proposé des indicateurs de décision basés conjointement sur (1)-la fiabilité prévisionnelle prédite avec des données de surveillance et (2)-des facteurs d'importance fiabilistes permettant de fournir l'information relative à l'importance de chaque composant ou un groupe de composants par rapport à la structure complexe du système. Dans ce sens, seulement deux variables de décision sont nécessaires pour un système à structure complexe avec n'importe quel nombre de composants. Ce dernier permet de réduire le temps de calcul dans l'évaluation de la performance des stratégies

proposées (ex. coût de maintenance) et l'identification du planning de maintenance optimal. Celles-ci fourniront une crédibilité applicative des stratégies proposées à l'échelle système.

De plus, sur la base d'une des deux stratégies de maintenance proposées, nous l'étendons à une stratégie conjointe de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange. Une seule variable de décision de plus pour la gestion des pièces de rechange est ajoutée pour cette stratégie conjointe.

Ces travaux de recherche se sont traduits par trois revues internationales (R15, R12 et R6) et trois papiers de conférences (C20, C17 et C15).

### **Outillages scientifiques utilisés**

Pour les outillages en support, les outils scientifiques suivants sont utilisés :

- Pour la modélisation : processus stochastiques gamma et la loi de probabilité Weibull
- Pour les calculs du critère de coût : développement des méthodes analytiques et des méthodes numériques (simulation Monte-Carlo)

## **5.2.2 Synthèse des travaux majeurs développés**

### **Modélisation de la structure complexe et son impact dans le modèle de coût**

Considérons un système à  $N$  composants qui sont inter-connectés selon une structure complexe. Les composants sont stochastiquement indépendants cependant ils sont économiquement dépendants. Ce dernier signifie que le coût total d'une maintenance groupée de quelques composants est différent du coût total de maintenance séparée pour chacun de ces composants. Selon la structure complexe du système, on distingue différents types de composants :

- Un composant est appelé "critique" si sa panne ou son arrêt, tandis que les autres composants sont dans l'état de fonctionnement, conduit le système à une panne ou un arrêt ;
- un composant est dit "composant non-critique" si le système continue à fonctionner lorsqu'il tombe en panne ou s'arrête ;
- un composant est dit "composant critique temporaire" si l'arrêt d'un ou plusieurs composants le conduit à un composant critique ;
- Un groupe est dit «critique» si le système tombe en panne lorsque tous les composants du groupe tombent en panne.

Pour la modélisation du comportement fiabiliste des composants, on distingue ici deux groupes de composants, notés  $\Omega_D$  et  $\Omega_A$ .  $\Omega_D$  indique l'ensemble des composants avec lesquels, l'opération d'inspection peut donner leur niveau de dégradation. Pour les composants dans le groupe  $\Omega_A$ , leurs niveaux de dégradation ne peuvent pas être mesurables et l'opération d'inspection donne seulement leur état binaire (marche ou panne). Dans ce sens, pour la modélisation du comportement fiabiliste, on utilise :

- le processus gamma pour la modélisation de dégradation des composants dans l'ensemble  $\Omega_D$  ;
- la loi de Weibull pour la modélisation de la durée de vie des composants dans l'ensemble  $\Omega_A$ .

Pour les opérations de maintenance, les hypothèses suivantes sont considérées :

- Une action de maintenance (préventive ou corrective) restaure complètement le composant maintenu, appelé également action de remplacement ;
- La durée de maintenance (corrective ou préventive) est négligeable.

### Structure des coûts et modélisation de dépendances économiques

Effectuant un remplacement préventif sur le composant  $i$  à l'instant  $t$ , un coût de remplacement préventif, noté  $C_p^i$ , est encouru :

$$C_p^i = c_p^i + c_{ms} + c_{psd} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}}, \quad (5.5)$$

où :

- $c_p^i$  est le coût spécifique du remplacement préventif du composant  $i$  (compris le coût de pièce de rechange) ;
- $c_{ms}$  est le coût de mise en œuvre qui doit être payé pour les tâches de préparation de maintenance lorsqu'une action de maintenance est effectuée. Il faut noter que ce coût peut être partagé lorsque plusieurs composants sont maintenus ensemble ;
- $\mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}}$  est la fonction indicatrice, signifiant que si le système est arrêté à cause de la maintenance préventive du composant  $i$  à l'instant  $t$ . Elle est telle que :

$$\mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} = \begin{cases} 1 & \text{si le composant } i \text{ est critique ou critique temporaire ;} \\ 0 & \text{si le composant } i \text{ est non-critique.} \end{cases}$$

De la même manière, le coût payé pour la maintenance corrective du composant défaillant  $i$  à l'instant  $t$ , étant donné qu'il a été en panne à l'instant  $\tau^i$  (où  $0 < \tau^i \leq t$ ), est comme suit :

$$C_c^i = c_c^i + c_{ms} + c_e^i \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique}\}} + [c_{usd} + c_d(t - \tau^S)] \mathcal{I}_{\{\tau^i = \tau^S\}}, \quad (5.6)$$

où :

- $c_c^i$  est le coût spécifique de remplacement correctif (y compris le coût de pièce de rechange). Une panne peut avoir des conséquences désastreuses, non seulement sur un coût complémentaire à cause des interventions non-planifiées par exemple, mais aussi sur l'impact environnemental et/ou humain. C'est pourquoi il est généralement supposé que  $c_c^i \geq c_p^i$  ;
- $\tau^S$  est la date de panne du système ;
- $\mathcal{I}_{\{i \text{ est critique}\}}$  et  $\mathcal{I}_{\{\tau^i = \tau^S\}}$  sont les fonctions indicatrices et définies comme suit :

$$\mathcal{I}_{\{i \text{ est critique}\}} = \begin{cases} 1 & \text{si le composant critique } i \text{ doit être correctivement immédiatement} \\ & \text{remplacé dès qu'il tombe en panne ;} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

et

$$\mathcal{I}_{\{\tau^i = \tau^S\}} = \begin{cases} 1 & \text{si } \tau^i = \tau^S, \text{ ceci signifie que la panne du système est due à celle} \\ & \text{du composant } i ; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Grâce aux dépendances économiques entre composants, le coût de mise en œuvre de maintenance  $c_{ms}$  peut-être partagé lorsque quelques actions de maintenance (corrective et/ou préventive) sont groupées. Dans ce cas, le coût de maintenance préventive du groupe  $G_l$  de  $|G_l|$  ( $1 \leq |G_l| \leq n$ ) composants à l'instant  $t$  engendre un coût  $C_p^{(G_l)}$  comme :

$$C_p^{G_l} = \sum_{i \in G_l} C_p^i - \underbrace{c_{ms} (|G_l| - 1)}_{\text{profit économique : PED}} - \underbrace{c_{psd} \left( \sum_{i \in G_l} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} - \mathcal{I}_{\{G_l \text{ est un groupe critique}\}} \right)}_{\text{coût d'arrêt planifié économisé : PED ou NED}}, \quad (5.7)$$

où :

- la deuxième partie sur le côté droit de l'équation (5.7) représente les coûts de mise en œuvre économisés dû à la dépendance économique positive (PED) entre composants ;
- la troisième partie pourrait être positive ou négative. En fait, elle est positive (représentant la dépendance économique positive) si le groupe  $G_l$  contient plus d'un composant critique et/ou composant critique temporaire. Si le groupe  $G_l$  est un groupe critique mais ses composants sont non-critiques alors cette troisième partie est négative et représente la dépendance économique négative (NED). Il est important de noter ici que la troisième partie n'existe pas dans les systèmes multi-composant à structure séries car tous les composants d'un système à structure séries sont critiques.

## Construction de stratégies de maintenance prévisionnelle adaptées

Afin de pouvoir sélectionner efficacement un composant/groupe de composants à maintenir préventivement, deux stratégies de maintenance prévisionnelle ont été développées :

- Stratégie de maintenance prévisionnelle par l'utilisation de facteur d'importance structurel (stratégie MP1) ;
- Stratégie de maintenance prévisionnelle multi-niveaux (stratégie MP2).

Dans ces deux stratégies proposées, on suppose que les ressources nécessaires de maintenance (tels que des pièces de rechange de tous les composants, des outils de maintenance, techniciens, etc.) pour exécuter les actions de maintenance sont toujours disponibles aux dates planifiées.

Une extension de la première stratégie, nommée la stratégie conjointe de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange (stratégie MP3), est ensuite développée en intégrant la gestion des pièces de rechange.

### Stratégie MP1 : stratégie de maintenance prévisionnelle par l'utilisation de facteur d'importance structurel

L'idée principale des stratégies de maintenance conditionnelle proposés est de grouper quelques actions de maintenance corrective et préventive. Les stratégies proposées sont structurées par deux types de règles de décision.

1. Les règles de maintenance corrective groupée se basent principalement sur l'analyse de criticité de chaque composant par rapport au dysfonctionnement du système global. Le but est d'éviter des commandes urgentes de composants non-critiques ou critiques temporaires défaillants qui ont un impact peu important sur le fonctionnement du système et de pouvoir remplacer simultanément quelques composants défaillants afin d'économiser des coûts de maintenance (ex. coût de mise en œuvre) ;
2. Les règles de maintenance préventive s'appuient sur des seuils préventifs construits conjointement à partir du facteur d'importance structurel et la fiabilité prévisionnelle des composants. Dans ce sens, tous les composants survivants de l'ensemble  $S_D \subset \Omega$  sont régulièrement inspectés aux dates  $T_k$  ( $k \in \mathbb{N}$  et  $T_0 = 0$ ) avec un interval d'inter-inspection  $T$ . Celui-ci est le premier paramètre variable de décision de maintenance à optimiser dans cette stratégie. Grâce aux opérations d'inspection, la condition (niveau de dégradation) de chaque composant peut-être mesurée. La fiabilité prévisionnelle de chaque composant survivant est ensuite calculée  $R^i(T_{k+1}|T_k)$ . Pour la décision de maintenance préventive associée à chaque composant  $i$ , un seuil fixé de fiabilité, noté  $R_p^i$  avec  $0 \leq R_p^i \leq 1$ , est introduit. Les règles de décisions sont comme suit :

- si  $R^i(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^i$ , le composant  $i$  est préventivement remplacé ;
- si  $R^i(T_{k+1}|T_k) > R_p^i$ , aucune action de maintenance n'est effectuée sur le composant  $i$ .

Il est important de noter que chaque composant  $i$  a un rôle différent par rapport au dysfonctionnement du système global. Les seuils de maintenance préventive  $R_p^i$  peuvent être différents. Afin de réduire le nombre de variables de décision, nous proposons d'utiliser le facteur d'importance structurel, appelé également facteur d'importance de Birbaum, pour la construction des seuils  $R_p^i$ . En effet, le seuil du remplacement préventif  $R_p^i$  est formulé par :

$$R_p^i = \min_{i=1,\dots,n} (\Phi_p(I_B^i), 1), \quad (5.8)$$

avec

- $I_B^i$  est le facteur d'importance structurel associé au composant  $i$ .  $I_B^i$  ne dépend que de la configuration (ou structure) du système et est inchangé aux dates d'inspection (parce que tous les composants défectueux précédents sont remplacés à ces dates). Une description détaillée de ce facteur est présentée dans [146] ;
- $\Phi_p(I_B^i)$  est une fonction du  $I_B^i$ .

La fonction  $\Phi_p(I_B^i)$  peut être linéaire ou non-linéaire. Dans ce travail, nous considérons une fonction linéaire comme suit :

$$\Phi_p(I_B^i) = \omega_p I_B^i \text{ avec } 0 \leq \omega_p \leq \frac{1}{\min_{i=1,\dots,n} (I_B^i)}. \quad (5.9)$$

Le coefficient  $\omega_p$  est le même pour tous les composants du système. Dans ce sens, le seuil de maintenance préventive  $R_p^i$  pour chaque composant  $i$  peut-être déterminé à partir du coefficient commun  $\omega_p$ . De cette façon,  $\omega_p$  est le deuxième paramètre variable de décision de la stratégie de maintenance prévisionnelle proposée et nécessaire à optimiser. Pour déterminer la valeur optimale de  $\omega_p$  (ou  $R_p^i$ ), un modèle de coût est développé dans ce travail.

La validation de la stratégie de maintenance proposée est ensuite étudiée numériquement à travers un système de 12 composants inter-connectés selon une structure complexe. Les résultats numériques montrent l'avantage et la robustesse de la stratégie de maintenance proposée par rapport à d'autres stratégies de maintenance existantes. Les descriptions détaillées sont présentées dans R14 et le rapport de thèse [146].

### Stratégie MP2 : stratégie de maintenance prévisionnelle multi-niveaux

Dans cette stratégie de maintenance, les règles de maintenance corrective restent inchangées par rapport à la stratégie précédente. Pour la maintenance préventive, contrairement à la stratégie de maintenance MP1, où chaque composant est sélectionné individuellement, l'idée principale de cette seconde stratégie est de pouvoir sélectionner en même temps un groupe de composants pour la maintenance préventive en cas de besoin. Les règles de décision proposées devront prendre en considération à la fois la structure complexe, la dépendance économique entre composants et l'état courant des composants. Dans ce sens, on développe un indicateur de décision basé sur le facteur d'amélioration de fiabilité associé à un groupe de composants et son coût de maintenance. De cette façon, cet indicateur associé au groupe  $G_l$  contenant  $|G_l|$  ( $1 \leq |G_l| \leq n$ ) composants à l'instant  $s$  ( $s < t$ ) est défini comme suit :

$$C_{G_l}^{GIF}(s) = \frac{R^{S,G_l}(t|s) - R^S(t|s)}{C_p^{(G_l)}}, \quad (5.10)$$

où :

- $R^S(t|s)$  est la fiabilité prévisionnelle du système sachant l'état courant des composants sans tenir compte d'aucune action de maintenance ;
- $R^{S,G_l}(t|s)$  indique que la fiabilité prévisionnelle du système est calculée à l'instant  $t$  ( $t > s$ ) sachant l'état courant des composants et le remplacement conjoint des composants groupe  $G_l$  à l'instant  $s$  ;
- $C_p^{(G_l)}$  est le coût total de maintenance préventive associé au groupe  $G_l$ . Ce coût a été déterminé dans l'équation (5.7).

Par cette définition, l'indicateur  $C_{G_l}^{GIF}(s)$  prend conjointement en compte les informations suivantes :

- l'état courant ou la fiabilité prévisionnelle conditionnelle de tous les composants du système,
- les coûts lié à la maintenance préventive des composants maintenus (les composants du groupe  $G_l$ ),
- les dépendances économiques positive/négative entre composants dans le système,
- la structure complexe du système.

Cet indicateur  $C_{G_l}^{GIF}(s)$  est utilisé pour sélectionner un groupe optimal de composants à remplacer préventivement. Les règles de décision de maintenance sont synthétisées comme suit. Le système est régulièrement inspecté sur les composants survivants de l'ensemble  $S_D$  à l'instant  $T_k = kT$ . Comme la stratégie de maintenance précédente,  $T$  est la première variable de décision de cette stratégie. En se basant sur les informations données

par inspection, la fiabilité prévisionnelle du système  $R^S(T_{k+1}|T_k)$  est d'abord prédite en considérant que les composants défaillants sont remplacés à l'instant  $T_k$ .

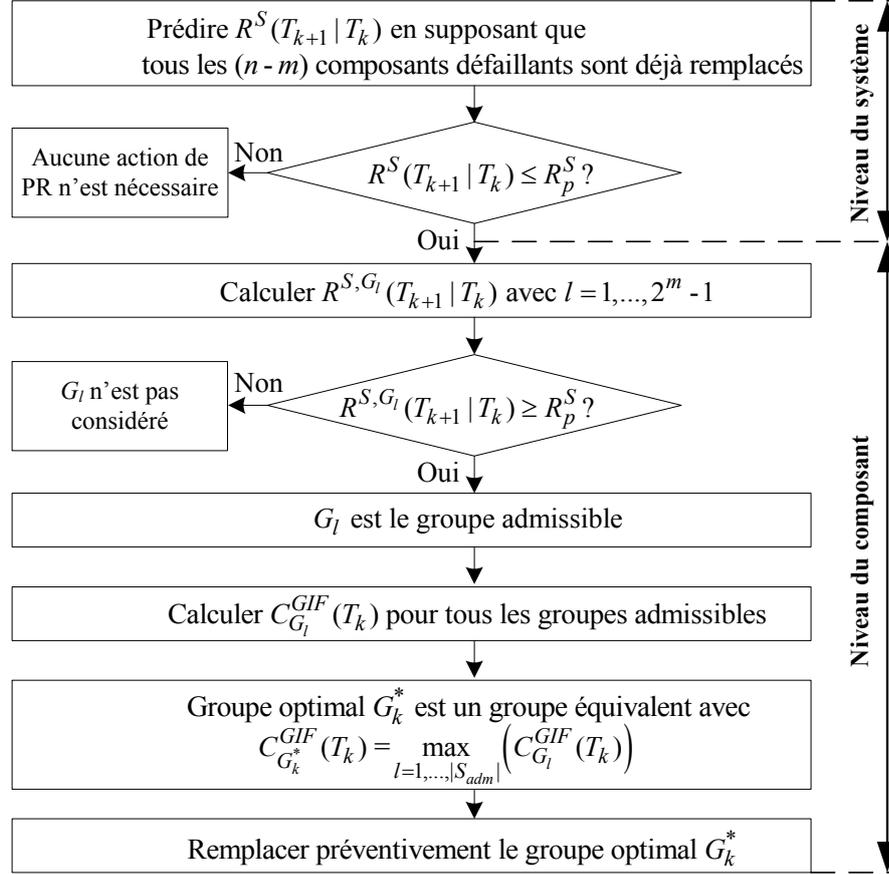


FIGURE 5.6 – Procédure de la prise de décision de maintenance préventive multi-niveaux.

1. *Au niveau du système* : la décision de déclenchement d'une ou plusieurs actions de maintenance préventive est basée sur un seuil fixé, noté  $R_p^S$  ( $0 \leq R_p^S \leq 1$ ).  $R_p^S$  est la deuxième variable de décision de cette stratégie.
  - si  $R^S(T_{k+1}|T_k) > R_p^S$ , aucune action de maintenance préventive n'est exigée ;
  - si  $R^S(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^S$ , la maintenance préventive sur un ou plusieurs composants est demandée. On passe maintenant au niveau composant pour la sélection d'un composant/groupe de composants à maintenir préventivement.
2. *Au niveau du composant* : les règles de décision de maintenance préventive construites sont basées sur l'indicateur décisionnel  $C_{G_l}^{GIF}(s)$ . Plus précisément, on suppose qu'à l'instant  $T_k$ ,  $m$  composants sont survivants ( $0 \leq m \leq n$ ), le nombre possible de groupes est alors  $2^m - 1$ . Un groupe est dit «admissible» si le remplacement de tous les composants du groupe peut améliorer la fiabilité prévisionnelle du système au

seuil  $R_p^S$ . Basé sur l'ensemble de tous les groupes admissibles, noté  $S_{adm}$ , un groupe optimal est déterminé comme le groupe ayant la plus grande valeur du  $C_{T_k}^{GIF}$ . Sans perte de généralité, il est supposé que  $G_k^*$  est le groupe optimal retenu à la date  $T_k$ . Le groupe  $G_k^*$  est déterminé par :

$$C_{G_k^*}^{GIF}(T_k) = \max_{l=1, \dots, 2^m-1} \left\{ C_{G_l}^{GIF}(T_k) \mid R^{S, G_l}(T_{k+1} | T_k) > R_p^S \right\}, \quad (5.11)$$

où  $R^{S, G_l}(T_{k+1} | T_k)$  représente la fiabilité prévisionnelle du système après la maintenance préventive du groupe  $G_l$ . Le processus de décision et la procédure de simulation pour l'évaluation du coût global de la stratégie proposée sont illustrés dans la figure 5.6 .

Comme précisé au dessus, les deux variables de décision de maintenance  $T$  (l'intervalle d'inter-inspection ou le cycle d'inspection) et  $R_p^S$  (le seuil de maintenance préventive du système) sont à optimiser. Ce dernier nous a conduit à développer un modèle de coût. Une méthode de simulation basée sur la technique de simulation Monte-Carlo est également proposée.

Une étude de performance de cette stratégie de maintenance est également menée. Différentes analyses de sensibilité et une étude de comparaisons avec des stratégies existant ont été effectuées. Les résultats numériques montrent bien la robustesse de la stratégie proposée. La discussion détaillée sur ce travail est présentée dans R8 et le rapport de thèse [146].

### **Stratégie MP3 : stratégie conjointe de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange**

Pour s'affranchir de l'hypothèse de disponibilité permanente des pièces de rechange pour la maintenance, un travail sur l'extension de la stratégie MP1 a été mené. Des règles de décision adaptées pour la gestion des pièces de rechange ont été construites selon les besoins potentiels ou/et immédiats des opérations de maintenance corrective et préventive tout en minimisant le coût de gestion de pièces de rechange. Il est important de noter qu'une action de maintenance ne peut être effectuée que si la pièce de rechange requise est disponible.

L'idée principale est d'utiliser l'indicateur de décision développée dans la stratégie MP1 pour à la fois la gestion des pièces de rechange et la décision de maintenance préventive des composants. Dans ce sens, dans un premier temps on est amené à modéliser et formuler les coûts associés à l'approvisionnement de pièces de rechange. Outre des dépendances économiques liées aux opérations de maintenance, des dépendances économiques liées à l'approvisionnement des composants sont également étudiées. Dans un second temps,

des règles de décision à la fois pour la gestion de pièces de rechange et la maintenance préventive sont proposées.

Dans cette stratégie, trois variables de décisions (une pour la fréquence d'inspection, une pour la commande des pièces de rechange et la troisième pour la sélection de la maintenance préventive) sont à optimiser selon un critère d'optimisation (ex. coût).

Une étude de performance de cette stratégie de maintenance est ensuite également étudiée. Différentes analyses de sensibilité et une étude de comparaison avec des stratégies existantes ont été effectuées. Les résultats numériques montrent bien la robustesse de la stratégie conjointe proposée. La discussion détaillée sur ce travail est présentée dans R5 et le rapport de thèse [146].

## 5.3 Développement de modèles de regroupement dynamique d'actions de maintenance avec contraintes et opportunité de maintenance

### 5.3.1 Présentation générale

#### Contexte

L'ensemble des travaux menés dans cette thématique de recherche ont donné lieu à des collaborations internes au CRAN. Il a fait également l'objet d'un stage Master 2 (Quoc-Anh Tran) et de ma participation au projet européen MoDe et au projet avec Renault automobile (voir Section 1.5.4).

#### Quelques précisions sur la problématique et les enjeux

Le regroupement dynamique d'actions de maintenance semble efficace pour l'optimisation de la maintenance des systèmes à composants multiples dans un contexte dynamique (ex. pannes et détérioration des composants, pièces de rechange, etc.) [23, 151, 226]. Cependant les modèles existants ne peuvent être applicables qu'à une classe limitée de systèmes (durée de maintenance négligée, mono mission, nombre illimité de réparateurs). D'un point de vue pratique, ces hypothèses ne sont pas tout-à-fait justifiées, ex. contraintes de maintenance, durée de maintenance [37, 125, 153]; missions multiples avec contraintes de disponibilité [2, 99, 123, 125, 183]. Dans ce sens, il est intéressant d'étendre des modèles existants pour permettre de relâcher ces hypothèses restreintes. De plus, les modèles étendus doivent permettre de mettre à jour un planning de maintenance en présence des opportunités de maintenance qui peuvent apparaître de façon aléatoire ou déterministe

au fil du temps [43, 44, 119, 167]. En lien avec ce double besoin, plusieurs problématiques sont soulevées :

- Modélisation et formulation de différents facteurs d'influence (durée de maintenance, dépendances économique et structurelle, contraintes) dans le processus d'optimisation de maintenance ;
- Analyse des impacts pour des contraintes spécifiques de maintenance ;
- Développement de stratégie de regroupement d'actions de maintenance pour prendre en considération la durée de maintenance et des contraintes étudiées ;
- Modélisation et formulation des opportunités de maintenance ;
- Élaboration des règles de maintenance adaptées permettant de mettre à jour un planning de maintenance en présence d'une opportunité de maintenance ;
- Validation des modèles proposés.

### **Originalité et production scientifiques**

Face à ces problématiques, nous avons proposé dans un premier temps des stratégies (modèles) de regroupement dynamique d'actions de maintenance pour un système à composants multiples avec structure en série. Les stratégies développées permettent de prendre en considération la durée de maintenance mais aussi les contraintes associées à la fois au système cible (missions multiples avec contrainte de disponibilité, dépendance structurelle entre composants) et au système de soutien (nombre limité de réparateurs, opportunité de maintenance). Dans un second temps, nous avons proposé des règles de décision adaptées permettant de mettre à jour de façon efficace un planning de maintenance dans un contexte dynamique (ex. présence d'une opportunité de maintenance, changement du niveau du nombre de réparateurs, changement du niveau de disponibilité). Les modèles de maintenance développés ont été validés à partir de données simulées ou expérimentales. Un des modèles de maintenance développé a été déployé dans le processus d'optimisation de la maintenance de poids lourds chez Volvo automobile dans le cadre du projet européen MoDe (voir Section 1.5.4).

En termes de production scientifique, ces travaux de recherche se sont traduits par 3 revues internationales indexées JCR (R13, R10 et R5) et 2 papiers de conférences (C11 et C9).

### **Outillages scientifiques utilisés**

En termes d'outillage en support, différents outils scientifiques sont utilisés :

- Pour la modélisation de défaillance des composants : loi de probabilité Weibull ;

- Pour des algorithmes d'optimisation : programme dynamique, algorithmes génétiques, MULTIFIT ;
- Pour le calcul de la fonction objectif : développement des méthodes analytiques.

### 5.3.2 Synthèse des travaux majeurs développés

#### Modélisation de contraintes et opportunités de maintenance

**Contraintes de maintenance :** Deux types de contraintes sont considérés dans ce travail.

1. *Missions multiples avec contrainte de disponibilité.* On suppose que le système doit fonctionner avec une séquence de  $U$  missions. Chaque mission  $i$  ( $i = 1, \dots, U$ ) est caractérisée par trois paramètres  $t_b^i$ ,  $t_e^i$  et  $D_0^i$  :
  - $t_b^i, t_e^i$  ( $t_b^i < t_e^i$ ) sont les dates de début et de fin de la mission  $i$  ;
  - $D_0^i$  ( $0 < D_0^i \leq t_e^i - t_b^i$ ) est la durée maximale autorisée pour l'exécution des actions préventives dans la mission  $i$ .
2. *Nombre limité de réparateurs.* On suppose que seulement  $m$  réparateurs sont disponibles pour exécuter les actions de maintenance.

Il est important de souligner que le nombre de réparateurs et le niveau de disponibilité (durée maximale autorisée pour la maintenance) d'une mission peuvent changer au fil du temps. Ces types de situations, appelés "contextes dynamiques", peuvent avoir un impact sur le plan de maintenance optimal et doivent être pris en compte dans le processus d'optimisation de maintenance.

**Opportunités de maintenance :** Une opportunité de maintenance  $v$  ( $v = 1, 2, \dots$ ) est caractérisée par quatre paramètres  $t$ ,  $T_{opp}^v$ ,  $D_{opp}^v$  et  $Q_{opp}^v$  :

- $t$  est l'instant auquel l'information de l'opportunité de maintenance  $v$  est disponible ;
- $T_{opp}^v$  est la date de début de l'opportunité  $v$  ;
- $D_{opp}^v$  est la durée de l'opportunité  $v$  ;
- $Q_{opp}^v$  est le gain associé à l'opportunité  $v$ . Par exemple, le coût d'indisponibilité ne doit pas être payé lorsqu'une action de maintenance préventive est planifiée pendant une période de non utilisation du système.

#### Développement d'une approche de regroupement dynamique d'action maintenance

L'approche proposée est divisée en quatre phases (voir figure 5.7).

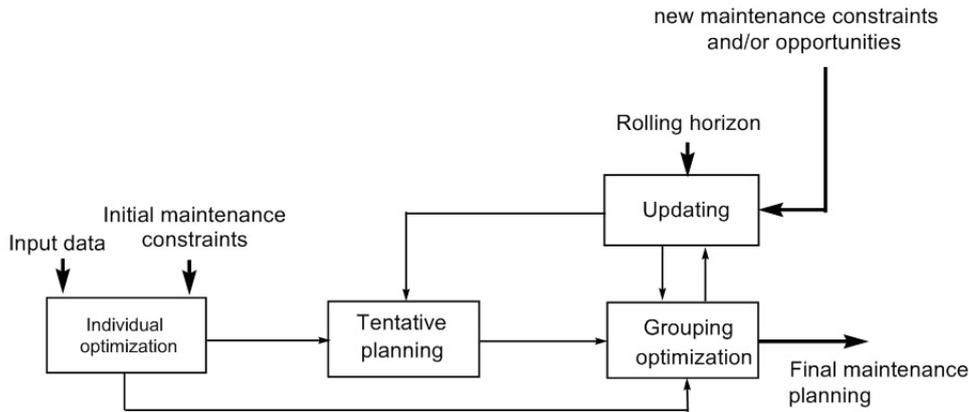


FIGURE 5.7 – Approche proposée pour le regroupement d'actions de maintenance

### Phase 1 : Optimisation au niveau composant

Cette phase consiste à construire le plan optimal de maintenance pour chaque composant individuel en négligeant les dépendances entre eux. La fréquence optimale de maintenance de chaque composant est obtenue en minimisant le coût moyen asymptotique de maintenance. Cette fréquence optimale de maintenance est aussi nécessaire pour construire un planning provisoire de maintenance au niveau système et pour évaluer le coût additionnel dans le cas où l'on décale la date d'exécution de l'opération de maintenance.

### Phase 2 : Construction du planning provisoire

L'objectif est de construire un planning provisoire de maintenance au niveau système sur la base des fréquences nominales de maintenance obtenues dans la phase 1. L'illustration de cette phase est donnée dans la figure 5.8.

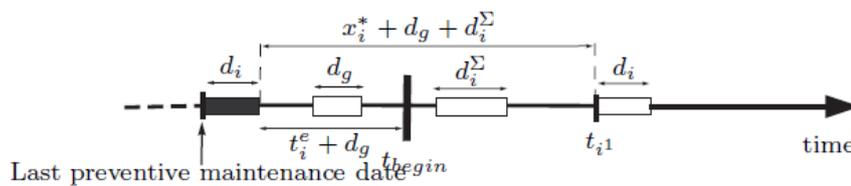


FIGURE 5.8 – Illustration sur la construction du planning provisoire de maintenance

### Phase 3 : Optimisation au niveau système

L'objectif est de trouver, au niveau du système, une planification de maintenance optimale qui minimise le coût total de maintenance et réponde aux contraintes de maintenance (durée de maintenance limitée et nombre limité de réparateurs). L'idée principale est ici de trouver une structure de regroupement (ou une partition de toutes les activités/actions de maintenance dans l'horizon considéré) dans laquelle, à chaque date de maintenance, quelques actions de maintenance sont conjointement exécutées, appelées actions groupées. Dans ce sens, chaque groupe est caractérisé par ses actions de maintenance à réaliser, sa date d'exécution et sa durée de maintenance. Cette phase est divisée en deux étapes.

**Étape 1 : Formulation mathématique pour le calcul du coût.** On suppose que quelques actions de maintenance sont groupées (groupe  $G^k$ ). Il est important d'évaluer le profit économique pour cette maintenance conjointe. En effet, le profit économique associé au groupe  $G^k$  est calculé par :

$$PE(G^k, t_{G^k}, m) = U(G^k) + V(G^k, m) - H_1(G^k, t_{G^k}), \quad (5.12)$$

avec,

- $U(G^k)$  est le profit économique associé à la réduction de coût de mise en œuvre ;
- $V(G^k, m)$  est le profit économique associé à la réduction de la durée de maintenance pour une maintenance groupée :

$$V(G^k, m) = \left( \sum_{ij \in G^k} d_i - d_{G^k}(m) \right) C^d, \quad (5.13)$$

avec  $d_{G^k}(m)$  est la durée totale de maintenance du groupe  $G^k$ .  $d_{G^k}(m)$  dépend non seulement du nombre de composants du groupe, de la dépendance (structurelle) entre ces composants, du nombre de réparateurs disponibles  $m$  et aussi de l'ordonnement des actions qui doit être optimisé pour obtenir une durée minimale de maintenance. Face à ce constat, nous avons développé un algorithme d'optimisation sur la base de l'algorithme MULTIFIT [56] pour la recherche de la durée minimale de maintenance ;

- $H_1(G^k, t_{G^k})$  est le coût de pénalité lié aux changements des dates d'exécution de maintenance par rapport aux dates provisoires.

À partir de tous les différents groupes possibles, une structure de regroupement, notée  $GS$ , peut être établie. En effet,  $G$  est une collection de  $s$  groupes mutuellement exclusifs  $G^1, \dots, G^s$  qui couvrent toutes les actions de maintenance préventive dans l'horizon considéré, c.-à-d.,

$$G^l \cap G^k = \emptyset, \forall l \neq k \text{ et } G^1 \cup G^2 \cup \dots \cup G^s = \{1, \dots, N\}. \quad (5.14)$$

Dans ce sens, le profit total associé à la structure de regroupement  $GS$  peut être calculé par :

$$PE_{GS} = \sum_{G^k \in GS} PE(G^k, t_{G^k}, m). \quad (5.15)$$

Par conséquent, la durée totale de maintenance pour une mission  $j$  ( $j = 1, \dots, U$ ) est évaluée comme suit :

$$D^j = \sum_{t_b^j \leq t_{G^k} < t_e^j} d_{G^k}(m). \quad (5.16)$$

En regard des contraintes données, le planning de regroupement optimal peut être déterminé comme suit :

$$PE^* = \arg \max_{GS} PE_{GS}, \quad (5.17)$$

et,

$$D^i \leq D_0^i \text{ pour } i = 1, \dots, U. \quad (5.18)$$

**Étape 2 : Détermination du planning optimal de maintenance** La recherche du planning optimal de maintenance est un problème NP-complet. Une méthode exacte est très coûteuse. Dans ce sens, nous avons utilisé un algorithme génétique.

#### Phase 4 : Mise à jour

Le planning optimal de maintenance donné par la phase précédente peut être utilisé en situation stable, mais il doit être mis à jour en présence d'un contexte dynamique (ex. une nouvelle contrainte de maintenance, la survenue d'une opportunité de maintenance ou la fin de l'horizon actuel). Plus précisément :

- **en présence d'une nouvelle contrainte** : Pour prendre en considération cette nouvelle contrainte, le processus de mise à jour doit commencer à partir de la phase 2 afin de redéfinir toutes les activités/actions de maintenance préventive dans un nouvel horizon de planification.
- **en présence d'une opportunité de maintenance** : Le processus de mise à jour est le suivant :
  1. Revenir à la phase 2 pour la définition d'un nouvel horizon de planification ;
  2. Ajouter une action de maintenance fictive  $opp$ , avec le temps d'exécution provisoire  $T_{opp}^v$  et la durée  $d_{opp} = 0$ . Si  $opp$  est dans un groupe admissible, le groupe doit alors être impérativement maintenu à  $T_{opp}^v$ . Un groupe  $G^p = \{\dots, opp, \dots, p\}$  avec  $1 \leq opp \leq p$ , est admissible si les conditions suivantes sont justifiées.
    - $T_{opp}^v$  est la date d'exécution de maintenance ;

- $\sum_{i \in G^p} d_i \leq D_{opp}^v$  ;
- $G^p$  est irréductible .

L'illustration du processus de mise à jour du planning de maintenance en présence d'une opportunité de maintenance est donnée dans la figure 5.9 .

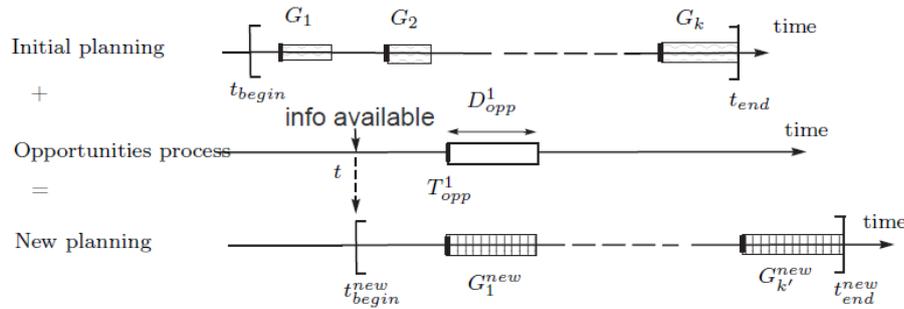


FIGURE 5.9 – Illustration du processus de mise à jour suite à la survenue d'une opportunité de maintenance.

- **à la fin de l'horizon de planification.** Le nouveau planning de maintenance dans un nouvel horizon peut être établi en revenant à phase 2 de l'approche proposée.

L'approche et les différents modèles proposés ont été testés et validés avec différents cas d'études. La description détaillée de ce travail est présentée dans R13, R10 et R5.

## 5.4 Développement de modèles de regroupement dynamique d'actions de maintenance avec considération de la structure complexe

### 5.4.1 Présentation générale

#### Contexte

Les travaux menés dans cette thématique font l'objet de la thèse de Hai-Canh que j'ai initiée avant mon intégration au CRAN en collaboration avec Pr. Anne Barros (UTT Troyes puis NTNU Norvège depuis 2014). La thèse a été soutenue à l'UTT en Mars 2015.

#### Quelques précisions sur la problématique et les enjeux

Dans ce travail, nous nous intéressons à développer des modèles de regroupement dynamique d'actions de maintenance pour un système à composants multiples avec structure complexe. Les modèles de regroupement développés doivent permettre également de

mettre à jour le planning de regroupement d'actions de maintenance dans un contexte dynamique (ex. modification de caractéristiques de composants, changement de la structure, changement de ressources de maintenance). Ces besoins soulèvent plusieurs problématiques importantes :

- Modélisation et formulation d'impacts d'une structure complexe dans le regroupement dynamique d'actions de maintenance ;
- Développement d'un modèle de regroupement dynamique d'actions en intégrant ces impacts ;
- Modélisation de contextes dynamiques et de leurs impacts dans le regroupement dynamique d'action de maintenance.

### **Originalité et production scientifiques**

Face à ces problématiques, les études menées dans le cadre de la thèse de Hai-Canh Vu nous ont amené aux contributions majeures suivantes :

- La proposition d'un modèle permettant de modéliser de façon efficace la structure complexe d'un système à composants multiples avec dépendances ;
- Le développement d'une stratégie de regroupement d'actions de maintenance permettant d'intégrer à la fois la structure complexe du système et les durées de maintenance (préventive et corrective) ;
- L'élaboration de procédure permettant de mettre à jour le planning de maintenance dans un contexte dynamique ;
- Le développement d'algorithmes d'optimisation sur la base de l'algorithme génétique pour la recherche du planning de maintenance optimal.

Les modèles et algorithmes proposés ont été testés et validés numériquement à partir de données simulées. Différentes études de sensibilité nous montrent que la structure complexe et la durée de maintenance sont deux facteurs importants à prendre en compte dans le regroupement dynamique d'action de maintenance. De plus, il est nécessaire de mettre à jour le planning de maintenance en présence d'un contexte dynamique.

Par rapport à la production scientifique, les travaux de recherche réalisés se sont traduits par 4 revues internationales indexées JCR (R18, R11, R9 et R7) et 6 papiers de conférences (C28, C26, C21, C16, C13 et C10).

### **Outillages scientifiques utilisés**

En termes d'outillage, les outils scientifiques suivants sont utilisés :

- Pour la modélisation : une combinaison de lois de probabilité Weibull et exponentielle.
- Pour les algorithmes d'optimisation : algorithmes génétiques.
- Pour le calcul de la fonction objectif : développement de méthodes analytiques et des méthodes numériques (simulation Monte-Carlo).

## 5.4.2 Synthèse des travaux majeurs développés

### Analyse d'impact de la structure complexe dans le regroupement dynamique d'action de maintenance

Pour un système avec structure série, un arrêt de n'importe quel composant conduit à un arrêt du système. Par contre, un système à structure complexe peut fonctionner lorsqu'un composant/groupe non-critique de composants tombe en panne. Pourtant, l'état de non-fonctionnement d'un composant/groupe non-critique de composants conduit à des changements sur la structure du système. Suite à ces changements, à un instant  $t$ , les composants du système avec structure complexe peuvent se trouver dans un des ensembles suivants :

- ensemble des composants critiques, noté  $A(t)$  ;
- ensemble des composants non-critiques, noté  $B(t)$  ;
- ensemble des composants qui sont en panne, noté  $H(t)$  ;
- ensemble des composants fonctionnels, mais à l'arrêt à  $t$  à cause de la défaillance d'autres composants du système, noté  $D(t)$  ;
- ensemble des composants en maintenance, noté  $G(t)$ .

En se basant sur ces cinq ensembles, une structure contenant  $n$  composants peut être présentée sous une nouvelle forme dynamique comme suit :

$$ST(t) = [A(t), B(t), H(t), D(t), G(t)]$$

et

$$A(t) \cup B(t) \cup H(t) \cup D(t) \cup G(t) = \{1, 2, \dots, n\}$$

Lorsque la structure du système est modifiée, ses ensembles sont remis à jour par une procédure spécifique.

Afin de mieux comprendre la nouvelle représentation de structure, nous considérons ici un système à 5 composants avec sa structure initiale ( $ST(0)$ ) présentée sur la Figure 5.10a. Nous avons :

$$ST(0) = [A(0), B(0), H(0), D(0), G(0)] = [\emptyset, (1, 2, 3, 4, 5), \emptyset, \emptyset, \emptyset]$$

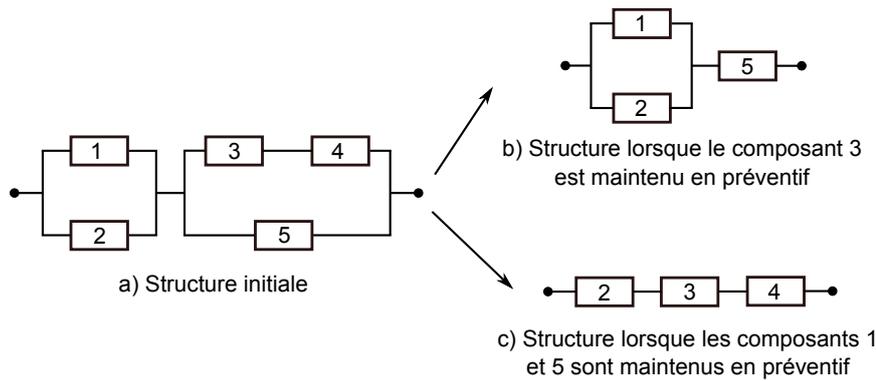


FIGURE 5.10 – Exemple de modifications de structure du système

Ensuite, lorsque le composant 3 est maintenu en préventif à l'instant  $t_3$ , la structure du système est modifiée (Figure 5.10b). Les ensembles de la structure sont remis à jour et présentés comme suit :

$$ST(t_3) = [A(t_3), B(t_3), H(t_3), D(t_3), G(t_3)] = [(5), (1, 2), \emptyset, (4), (3)]$$

Par rapport à l'approche de regroupement dynamique proposée dans la contribution précédente (contribution n° 7), une phase supplémentaire doit être ajoutée pour pouvoir intégrer l'impact de la structure complexe du système maintenu. L'approche étendue est donnée dans la figure 5.11.

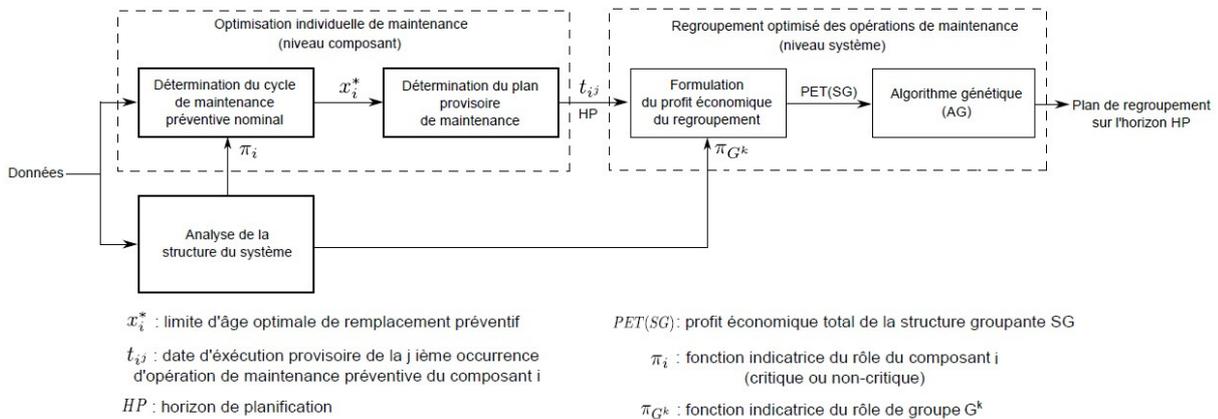


FIGURE 5.11 – Approche de regroupement d'actions de maintenance pour un système à structure complexe

Les changements de structure conduisent non seulement à des changements des ensembles  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $H(t)$ ,  $D(t)$  et  $G(t)$ , mais aussi à des changements du rôle des composants/groupes de composants. Par exemple, le composant 5 est un composant non-critique sur la Figure 5.10a ( $\pi_5 = 0$ ). Il devient un composant critique sur la Figure 5.10b ( $\pi_5 = 1$ ).

De même, le groupe  $G^1 = \{1, 5\}$  est un groupe non-critique sur la Figure 5.10a ( $\pi_{G^1} = 0$ ) et critique ( $\pi_{G^1} = 1$ ) sur la Figure 5.10b. En conséquence, les fonctions indicatrices  $\pi_i$  et  $\pi_{G^k}$  doivent être définies comme suit :

$$\pi_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } i \in A(t); \\ 0 & \text{si } i \in B(t). \end{cases} \quad (5.19)$$

et

$$\pi_{G^k}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \exists C_j \subset Cm(t), C_j \subset G^k \\ 0 & \text{si } \forall C_j \subset Cm(t), C_j \not\subset G^k \end{cases}$$

où  $Cm(t)$  est l'ensemble des coupes minimales de la structure du système à l'instant  $t$ .

L'analyse de la structure du système est faite à chaque changement afin de déterminer le rôle des composants ou des groupes de composants à l'instant  $t$ .

L'impact de la structure complexe intervient également dans la phase d'optimisation au niveau système. Plus précisément, avec la structure complexe, le profit économique associé au groupe  $G^k$  donné dans l'équation (5.12) devient comme suit :

$$PE(G^k, t_{G^k}, m) = U(G^k) + V(G^k, m) - H_1(G^k, t_{G^k}) - H_2(G^k, t_{G^k}) - H_3(G^k, t_{G^k}), \quad (5.20)$$

avec

—  $H_2(G^k, t_{G^k})$  est le coût de pénalité lié au changement du coût total d'arrêt planifié ;

$$H_2(G^k, t_{G^k}) = \pi_{G^k}(t_{G^k}) \cdot (C_{sys}^p + C_d^p \cdot D_{G^k}) - \sum_{ij \in G^k} [\pi_i(t_{G^k}) \cdot (C_{sys}^p + C_d^p \cdot \omega_i^p)]. \quad (5.21)$$

—  $H_3(G^k, t_{G^k})$  le coût de pénalité lié au changement du coût total d'arrêt planifié. La formulation mathématique de  $H_3(G^k, t_{G^k})$  est assez compliquée. La description détaillée est donnée dans [207].

## Modélisation de contextes dynamiques

Dans cette étude, plusieurs contextes dynamiques différents sont envisagés.

**Type 1 : “structure” :** Ce type de contexte dynamique s'appuie sur le changement de la structure du système au cours du temps. Ce changement peut porter sur le nombre de composants ou/et sur leurs interconnexions. Ce changement peut se trouver dans plusieurs situations : changement de la production[221], du niveau de redondance du système [211, 236] ou encore dans des systèmes à missions multiples [141]. Un exemple des changements de la structure du système par mission est présenté dans la figure 5.12.

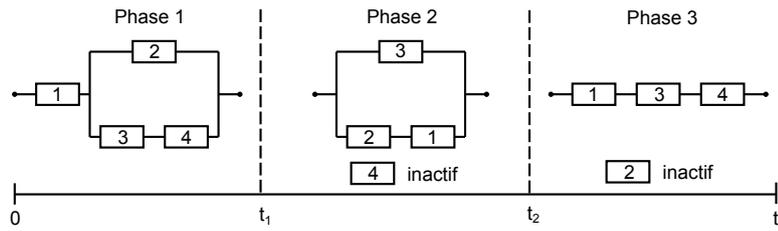


FIGURE 5.12 – Changements de la structure d'un système par mission

**Type 2 : “Composant”** Ce type de contexte dynamique se réfère aux changements au niveau des composants. Il peut être dû à :

- des changements de coûts de maintenance (préventive et/ou corrective) au cours du temps en raison des fluctuations des prix du marché [149] ;
- des changements sur la dynamique de détérioration de composants en raison de modifications de l'environnement opérationnel, par exemple suite à un changement climatique [192, 23] ;
- des modifications des caractéristiques des composants (qualité, performance) consécutifs à des progrès technologiques [149, 172].

**Type 3 : “Externe”** Les contextes dynamiques, qui ne peuvent être classés dans les deux types précédents, sont classés dans ce type (type 3). Les contextes dynamiques de type 3 correspondent à des changements venant de l'extérieur du système. Ce troisième type de contexte dynamique regroupe les changements suivants :

- Les changements du planning de production : Les périodes de production “intensives” peuvent devenir incompatibles avec des opérations de maintenance préventive [240] ;
- Les changements de disponibilité des ressources de maintenance. Par exemple, des retards dans l'approvisionnement des pièces de rechange vont entraîner des contraintes pour le plan de regroupement ;
- Les changements de la fiabilité/disponibilité du système pendant certaines périodes de temps pour satisfaire des contraintes de la production et de sécurité de fonctionnement [55] ;
- Les opportunités de maintenance sont des périodes d'arrêt du système qui peuvent être utilisées pour effectuer des opérations de maintenance à des coûts réduits [53, 224] ;
- Les changements d'objectif de la politique de maintenance pendant certaines périodes : maximisation de la fiabilité ou la disponibilité, minimisation du coût de maintenance, etc., les critères d'optimisation peuvent changer au cours du temps [35].

Grâce à la flexibilité de l'outil d'optimisation globale utilisé, tous ces types de contextes dynamiques peuvent être pris en compte dans le processus d'optimisation de la maintenance.

### Développement de procédures pour la mise à jour du plan de regroupement dans un contexte dynamique

On considère que le système est maintenu avec un plan de regroupement et sa structure de regroupement correspondante  $SG$  sur l'horizon  $[t_b, t_e]$ , et qu'un contexte dynamique de type 1 apparaît à un moment donné  $T_{dc} \in [t_b, t_e]$ . Du fait de l'apparition de ce contexte dynamique, la structure de regroupement  $SG$  ne peut plus être utilisée et doit être mise à jour. Cette procédure est illustrée Figure 5.13 et se décompose comme suit :

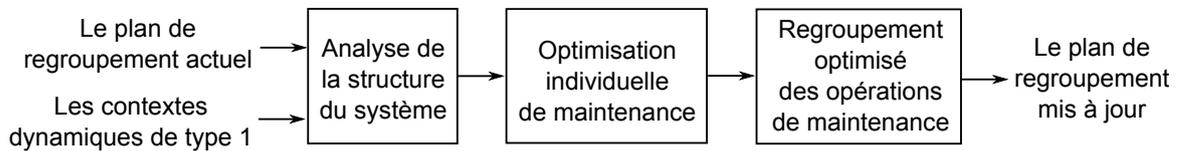


FIGURE 5.13 – Procédure de mise à jour pour les contextes dynamiques de type 1

**Phase d'analyse de la structure du système.** Sous l'influence des contextes dynamiques de type 1, la structure du système est modifiée. Afin de tenir compte de ce changement, nous devons revenir à la phase 1. À l'issue de cette phase, les coupes minimales, les chemins de succès et le rôle des composants  $(\pi_i)$  sont re-déterminés.

**Phase d'optimisation individuelle de maintenance.** Cette deuxième phase comprend 3 étapes :

- Nous devons d'abord : (i) déterminer le cycle optimal nominal de maintenance préventive des nouveaux composants s'il y a lieu ; (ii) déterminer le cycle optimal nominal de maintenance préventive des composants dont le rôle a été modifié.
- En considérant la nouvelle date de début de l'horizon de planification  $t'_b = T_{dc}$ , nous devons recalculer l'âge des composants à l'instant  $t'_b$  noté par  $age_i(t'_e)$ .
- Enfin, nous devons déterminer le plan provisoire de maintenance sur l'horizon de planification  $HP' = (t'_b, t'_e)$

**Phase de regroupement optimisé des opérations de maintenance.** Dans cette phase, l'algorithme génétique est utilisé pour trouver la nouvelle structure de regroupement sur le nouvel horizon de planification  $[t'_b, t'_e]$ . Après cette phase, un nouveau plan de regroupement intégrant le contexte dynamique à l'instant  $T_{dc}$  est obtenu.

Dans les contextes dynamiques de type 2 et 3, la structure du système étant inchangée, nous n'avons pas besoin de ré-analyser la structure du système. Les modifications étant apportées au niveau des composants, nous devons revenir à la phase d'optimisation individuelle de maintenance pour prendre en compte ces changements et poursuivre la procédure de mise à jour. Les procédures pour la prise en compte des contextes de types 2 et 3 sont illustrées dans les figures 5.14 et 5.15. .

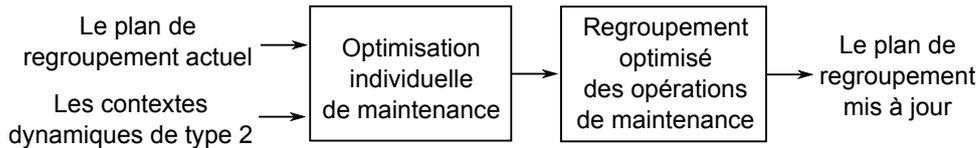


FIGURE 5.14 – Procédure de mise à jour pour les contextes dynamiques de type 2

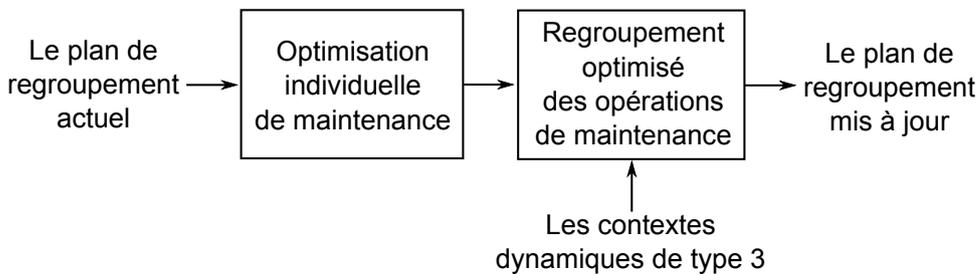


FIGURE 5.15 – Procédure de mise à jour pour les contextes dynamiques de type 3

## 5.5 Développement d'une stratégie de regroupement dynamique d'actions de maintenance pour un système distribué

### 5.5.1 Présentation générale

#### Contexte

Ce travail a donné lieu à la thèse de Ho-Si-Hung Nguyen soutenue en Septembre 2019 que j'ai co-dirigé avec Pr. Benoit Iung. L'objectif de cette thèse est de développer une stratégie de regroupement d'actions de maintenance pour un système distribué.

#### Quelques précisions sur la problématique et les enjeux

Les modèles de regroupement d'actions de maintenance existant ont été majoritairement proposés pour les systèmes centralisés où les composants d'un système sont très

proches. Ils ne peuvent pas directement être appliqués aux systèmes distribués (GDPS-Geographically Distributed Production System) qui sont vus comme des "systèmes de systèmes". En effet, chaque GDPS est composé de plusieurs sites de production éloignés l'un de l'autre et chaque site est vu comme un système centralisé composé de plusieurs composants [132, 163]. Dans ce contexte, l'optimisation de la maintenance pour ce type de système doit pouvoir fournir à la fois un planning optimal de maintenance et un planning optimal de routage de ressources de maintenance. Cependant, sur les travaux de recherche existants, ces deux problèmes sont étudiés séparément. Cela ne permet pas de fournir une optimalité globale. Plus précisément, des algorithmes d'optimisation ont été proposés pour la recherche du routage optimal selon un critère de distance ou de coût [6, 29, 51, 79]. Cependant, dans ces travaux, le planning optimal de maintenance est étudié à part et vu comme une contrainte d'entrée. Plus récemment, quelques modèles conjoints de planification de maintenance et routage de ressources ont été proposés dans [94, 126]. Néanmoins, aucune dépendance entre composants/site est considérée. Dans ce contexte, nous nous intéressons dans cette thèse à développer une stratégie de regroupement d'actions de maintenance pour un système distribué. Le modèle développé doit permettre de prendre en considération des dépendances liées non seulement au niveau composant mais aussi au niveau site/système pour fournir un planning optimal conjoint de maintenance et de routage des ressources. Cependant, ce défi soulève plusieurs problématiques à résoudre :

- Modélisation et formulation de dépendances liées aux systèmes distribués : dépendances économiques et dépendances géographiques dispersées entre composants et sites ;
- Analyse de l'impact de ces dépendances dans la planification de maintenance et de routage de ressources de maintenance ;
- Construction d'une stratégie conjointe de maintenance et routage des ressources sur la base de l'approche par horizon (regroupement dynamique d'actions de maintenance) permettant de prendre en compte les dépendances identifiées ;
- Proposition d'algorithmes d'optimisation conjointe pour la planification de maintenance et routage de ressources.

### **Originalité et production scientifiques**

Face à ces problématiques, les études menées dans le cadre de la thèse de Ho-Si-Hung Nguyen représentent un travail relativement abouti qui nous a amené aux contributions majeures suivantes :

- la proposition, pour un GDPS, de modèles conjoints de planification de la maintenance et du routage des ressources intégrant de multiples dépendances entre les

composants à maintenir,

- le développement d'algorithmes d'optimisation pour trouver un planning optimal sur la base de cette modélisation conjointe,
- l'extension des modèles et algorithmes pour y intégrer la considération dynamique des systèmes considérés,
- la validation des modèles et algorithmes proposés au cas de plusieurs configurations de GDPS avec études de sensibilité.

En termes de production scientifique, ces travaux de recherche se sont traduits par une revue internationale indexée (R20) et 2 papiers de conférences (C39 et C34) ainsi qu'une soumission en revue en cours de finalisation.

### Outillages scientifiques utilisés

Par rapport à cette contribution, nous utilisons les outils scientifiques suivants :

- Pour la modélisation : une combinaison de lois de probabilité Weibull et exponentielle
- Pour des algorithmes d'optimisation : développement des algorithmes d'optimisation à la base d'algorithmes génétiques et de la méthode de séparation et évaluation (branch and bound)
- Pour les calculs : développement de méthodes analytiques et des méthodes numériques (simulation Monte-Carlo)

### 5.5.2 Synthèse des travaux majeurs développés

#### Proposition d'un modèle conjoint de maintenance et routage de ressources

Dans un système distribué à multiple sites de production (GDPS), les distances entre sites de production et entre le centre de ressources de maintenance et les sites de production sont souvent non négligeables. Ceci est appelé aussi la dépendance géographique dispersée. Dans ce cas, l'optimisation de la maintenance d'un système distribué concerne non seulement la planification des actions de maintenance mais aussi le routage de ressources de maintenance. Une illustration d'un système GDPS est donnée dans la figure 5.16.

Dans ce contexte, le profit d'une maintenance regroupée (regroupement de quelques actions de maintenance) concerne non seulement le coût de mise en oeuvre (setup cost), le coût d'indisponibilité du système mais aussi le coût de transport (dépendance géographique dispersée). Par conséquent, le profit économique associé à la maintenance groupée

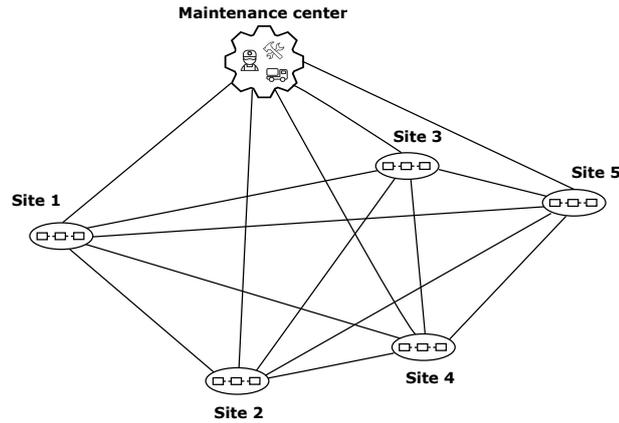


FIGURE 5.16 – Illustration d'un système distribué (GDPS) à 5 sites.

d'un groupe de quelques composants (groupe  $G^k$ ) donnée dans l'équation (5.20) devient comme suit :

$$\begin{aligned}
 PE(G^k, t_{G^k}, m, I_{G^k}) = & U(G^k) + V(G^k, m) - H_1(G^k, t_{G^k}, I_{G^k}) - H_2(G^k, t_{G^k}, I_{G^k}) \\
 & - H_3(G^k, t_{G^k}, I_{G^k}) + T(G^k, I_{G^k}), \quad (5.22)
 \end{aligned}$$

avec,

- $I_{G^k}$  est le routage pour le groupe  $G^k$ .
- $T(G^k, I_{G^k})$  est le profit économique lié à la réduction de distance de transport selon le routage  $I_{G^k}$ .

Pour un planning de regroupement ( $GS = \{(G^1, t_{G^1}), (G^2, t_{G^2}), \dots\}$ ) et un planning de routage ( $I = \{I_{G^1}, I_{G^2}, \dots\}$ ) dans un horizon identifié, le profit économique total est calculé comme suit :

$$PE_{GS} = \sum_{G^k \in GS} PE(G^k, t_{G^k}, m, I_{G^k}). \quad (5.23)$$

La description détaillée de ce modèle est donnée dans R20 et C34.

### Développement d'un algorithme d'optimisation

Il est important de souligner que les deux planning sont à optimiser conjointement à partir du modèle donné dans l'équation (5.23) avec un nombre de réparateurs donné  $m$ . C.-à-d. que ces deux plannings optimaux de maintenance et de routage de ressources peuvent être déterminés comme suit :

$$(GS^*, I^*) = \arg \max_{GS, I} \sum_{G^k \in GS} PE(G^k, t_{G^k}, m, I_{G^k}). \quad (5.24)$$

Pour la recherche conjointe de deux planning optimaux (maintenance et routage de ressources), nous avons développé un algorithme d'optimisation sur la base de l'algorithme génétique LSGA (Local Search Genetic Algorithm) et la méthode de séparation et évaluation (Branch and Bound). La combinaison de ces deux outils est bien adaptée pour ce problème d'optimisation car elle permet de réduire considérablement l'espace de recherche de solutions potentielles afin de pouvoir fournir une solution optimale avec un temps de calcul raisonnable. L'illustration de l'approche proposée est donnée dans la figure 5.17. Sa description détaillée est présentée dans R20 et C39.

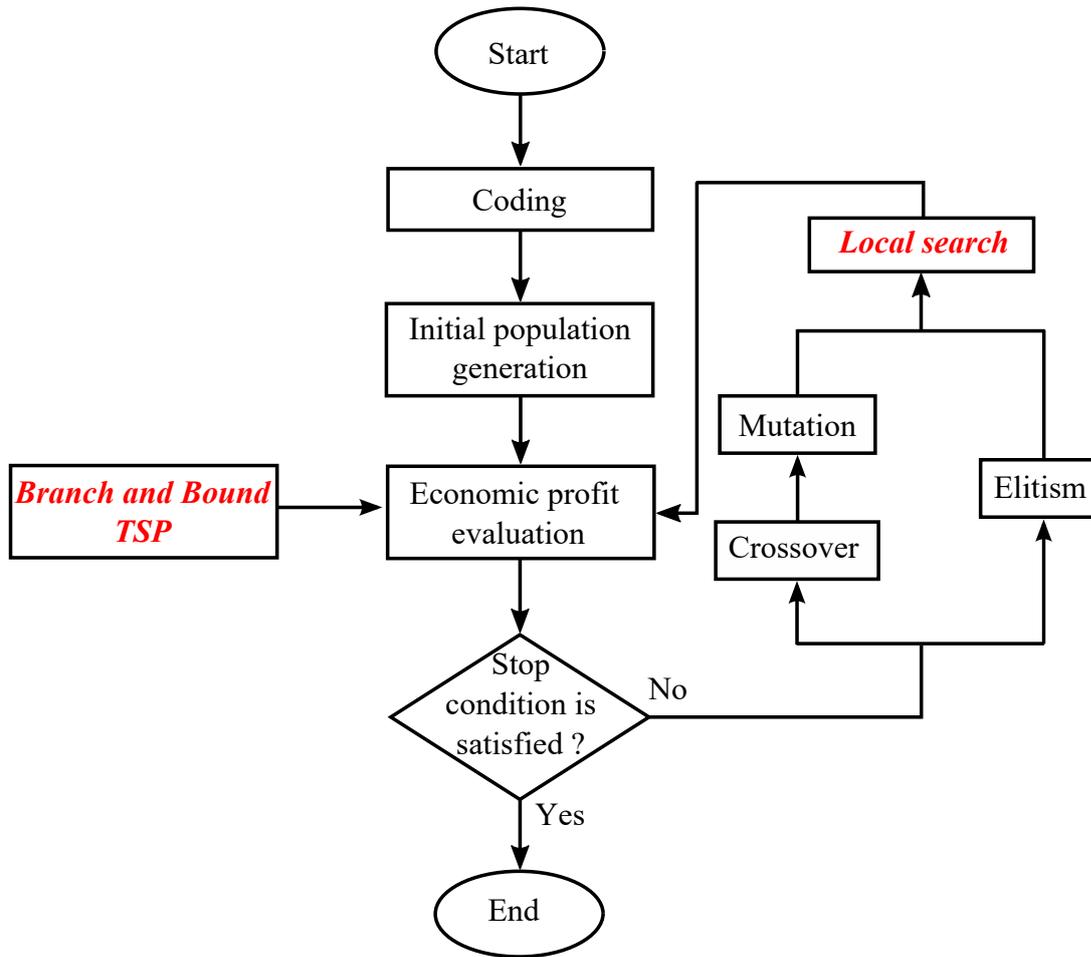


FIGURE 5.17 – Illustration de l'algorithme d'optimisation proposé.

## 5.6 Conclusion

Dans ce troisième axe de recherche, nous avons proposé différentes stratégies de maintenance pour une système à composants multiples avec dépendances. Plus précisément, au niveau composant, les stratégies proposées permettent de prendre en considération non

seulement la qualité des actions de maintenance préventive (parfaite, imparfaite) et aussi la qualité de surveillance (observation imparfaite, dégradation de capteur). Au niveau système, les stratégies développées permettent de prendre en considération des dépendances multiples entre composants (dépendances économiques/stochastiques, structure complexe, structure dispersée) tout en respectant des exigences liés à la fois au système maintenu (niveau de disponibilité, missions) et au système de soutien (nombre limité de réparateurs, opportunités de maintenance). De plus, les stratégies de regroupement d'actions de maintenance développées permettent de mettre à jour de façon efficace le planning de maintenance en présence d'un contexte dynamique.

La performance et la robustesse des modèles/approches proposés sont testées et validées à partir de différentes données simulées ou expérimentales. Cependant, l'application de ces modèles/approches à grande échelle dans le contexte de l'industrie du futur reste un défi majeur à investiguer. Ceci est prévu dans mon projet de recherche dont la présentation détaillée est donnée dans le chapitre 6.



## Troisième partie

# Projet de recherche et d'enseignement



# Chapitre 6

## Présentation du projet de recherche et d'enseignement

Mon projet de recherche s'inscrit dans la continuité de mes activités de recherche précédentes mais avec une évolution importante au regard de l'objet de recherche adressé (systèmes de production cyberphysiques-CPPS) dans le contexte de l'industrie du futur. En ce sens, la section 6.1 de ce chapitre présente le contexte de mon projet de recherche qui se rattache à la thématique de l'optimisation de maintenance des systèmes de production dans l'industrie du futur. Mon projet est structuré en deux axes de recherche qui sont détaillés dans les sections 6.2 et 6.3 respectivement. Pour crédibiliser la faisabilité de ce projet, les différents moyens et ressources envisagés pour chaque action de recherche sont également précisés dans la description des axes de recherche. Ceci conduit, en section 6.4, à une synthèse de l'ensemble des moyens et ressources prévisionnels sur une période de 6 ans. Ce projet est ensuite, dans la section 6.5, positionné précisément en lien avec les communautés scientifiques de référence. Ce positionnement est conforté dans la section 6.6 par des collaborations et le rayonnement associé à ce projet. Finalement, en dual à ce projet, un projet d'enseignement est proposé en section 6.7.

### 6.1 Contexte

L'industrie fait actuellement face à un défi majeur relatif à la fabrication personnalisée de production/service dans un temps de cycle court et moins coûteux. Dans cette optique, le concept de la quatrième révolution industrielle (ou l'industrie du futur) a été proposé et est devenue une réalité à travers de nombreuses initiatives et "white paper". Cette philosophie a été initialement proposée en Allemagne [100]. En effet, ce nouveau paradigme prône pour l'industrie une transformation digitale englobant les technologies

		Today's Factory		Industry 4.0 Factory	
	Data source	Key attributes	Key technologies	Key attributes	Key technologies
Component	Sensor	Precision	Smart Sensors and Fault Detection	Self-Aware Self-Predict	Degradation Monitoring & Remaining Useful Life Prediction
Machine	Controller	Producibility & Performance (Quality and throughput)	Condition-based Monitoring & Diagnostics	Self-Aware Self-Predict Self-Compare	Up Time with Predictive Health Monitoring
Production System	Networked manufacturing system	Productivity & OEE	Lean Operations: Work and Waste Reduction	Self-Configure Self-Maintain Self-Organize	Worry-free Productivity

FIGURE 6.1 – Comparaison de l'usine d'aujourd'hui et l'usine du futur [114]

de l'information, les matériels et les logiciels. Ce dernier permet, par rapport à la mise à disposition de données massives, de pouvoir mieux piloter, mieux produire et mieux maintenir les installations avec un coût de production et maintenance réduit. Cette digitalisation repose sur des nouvelles technologies qui sont aussi bien présentes au niveau terrain (ex. des capteurs intelligents) que niveau système (ex. aide à la décision de pilotage à la base d'outils de l'intelligence artificielle).

Une comparaison entre l'industrie aujourd'hui et l'industrie du futur est donnée dans la figure 6.1. Selon Lee et al. [114], les composants/machines dans l'industrie du futur peuvent prédire l'évolution de leur état de santé pour être capable de mieux anticiper leur défaillance. Au niveau système, ces technologies rendent capable, en se basant sur les informations disponibles et les résultats de prédiction aux niveaux composants/machines, d'auto-planifier (self-maintain) des actions de maintenance adaptées afin de réduire le temps de réactivité ce qui permet de réduire la durée d'indisponibilité du système. En plus, le système possède également une grande flexibilité et adaptabilité pour pouvoir évoluer d'une configuration à une autre (self-configure) et de s'organiser dynamiquement (self-organize) de manière à ce que l'ensemble du système de production converge vers les performances optimales attendues (worry-free production) tout en respectant l'ensemble des exigences liées au développement durable [140, 195].

Face à toutes les capacités de self-X précédentes, il est nécessaire de repenser l'organisation, l'architecture de ce système de production du futur. Dans cette optique, le concept de système cyberphysique (CPS) a émergé [113]. En effet, un CPS est fondamentalement

un objet intelligent porteur à la fois de la vision physique de l'objet et de sa vision cyber, c.a.d., des traitement de données. Ce concept CPS est décliné dans le monde de production sous l'acronyme CPPS (système de production cyberphysique) étant un ensemble de composants CPS qui co-habitent pour assurer des fonctions/services spécifiques [115, 140].

### 6.1.1 Vers un système de production cyberphysique (CPPS)

En effet, selon [140], un système de production cyberphysique se compose des composants et de sous-systèmes *autonomes* et *coopératifs* qui s'interconnectent en fonction du contexte, au sein et au travers de tous les niveaux de production, de la machine jusqu'aux réseaux logistiques<sup>26</sup>. Dans ce contexte, un système CPPS est structuré par des machines/sous-systèmes dont chaque machine/ sous-système est composé de plusieurs composants intelligents en forte interaction (principe de récursivité). Les caractéristiques représentatives majeures de chaque entité (composant ou machine/sous-système) sont son autonomie et sa collaboration avec d'autres entités (principe de connectivité). Ce concept fait appel à une architecture récursive illustrée dans la figure 6.2. Une entité peut être à différents niveaux d'abstraction. Au niveau composant, un CPS peut être associé à chacun des composants. Au niveau fonctionnel ou machine/sous-système, un CPS peut être la résultante d'une agrégation de plusieurs composants CPS de niveau composant.

Une entité CPS ou CPPS (composant, sous-composant ou système) se caractérise par l'intégration de processus de traitement physique et de processus de traitement de l'information (calcul, stockage, communication) [113, 115]. Dans ce sens d'un point de vue fonctionnel, on peut distinguer trois fonctions principales à remplir pour chaque entité de type CPS/ CPPS : une fonction en support à la transformation physique ; une fonction en support à la transformation de l'information et une fonction en support à la communication de l'information.

Par rapport à cette vision, au niveau composant d'un système, on peut distinguer deux types de CPS de natures différentes selon le type de traitements physiques associés : (1)-les composants CPS d'actionnement dont leurs traitements physiques servent à modifier des flux physiques (traitement de type action) (2)-les composants CPS de mesure dont les traitements physiques sont conçus pour réaliser des mesures sur des flux physiques (traitement de type captation). Dans ce sens, un capteur intelligent est vu comme un composant CPS de mesure ayant la capacité de recueillir des mesures de flux sur un autre composant et/ou sur l'état (ex. niveau de dégradation) de lui-même que ce soit avec ou sans collaboration avec d'autres capteurs.

---

26. Cyber-Physical production Systems consist of autonomous and cooperative elements and sub-systems that are getting into connection with each other in situation dependent ways, on and across all levels of production, from processes through machines up to production and logistics networks [140].

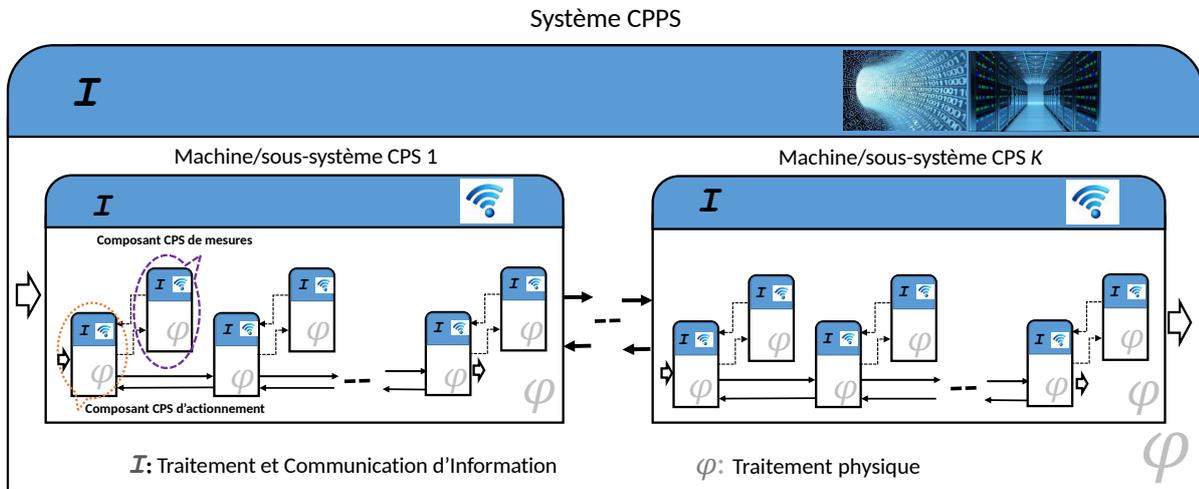


FIGURE 6.2 – Architecture récursive d'un système CPPS

Il est important de souligner que chaque composant CPS (composant d'actionnement ou composant de mesure) est soumis à dépendances multiples. On peut distinguer deux types de dépendances selon le niveau d'abstraction : (1)-dépendances au niveau du composant lui-même, (2)-dépendances entre composants.

Il est important de noter que par rapport à la maintenance de ces CPS, ces types de dépendances peuvent avoir des impacts importants à la fois pour le processus de pronostic, de l'optimisation de maintenance et de production [156].

### 6.1.2 Maintenance des CPS/ CPPS : vers une maintenance prescriptive

Selon le concept d'industrie du futur, les actions de maintenance doivent être planifiées de façon dynamique, avec un délai court, tout en respectant les contraintes organisationnelles du soutien, et tout ceci avec un minimum d'intervention humaine [116]. L'exécution de la maintenance doit être également réalisée au bon moment et contrainte par des plans de production dynamiques et flexibles dans un horizon court (agilité de la production). Compte tenu des données mises à disposition par les CPS, la maintenance doit être capable de les utiliser de façon pertinente à la fois dans le processus de prise de décision mais aussi celui d'optimisation. C'est un défi majeur pour la maintenance qui a donné naissance à des concepts comme le concept de maintenance prescriptive ou maintenance analytics [67, 102, 103, 116, 193, 215]. L'évolution de la maintenance inhérente à ces concepts vue

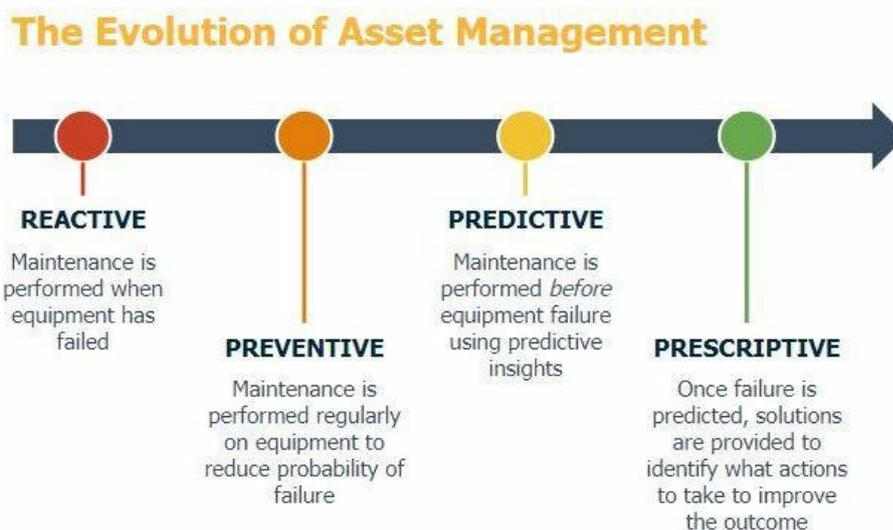


FIGURE 6.3 – Evolution de la maintenance selon un point de vue industriel <sup>27</sup>

par le monde industriel est donnée dans la figure 6.3.

En effet, le terme "maintenance prescriptive" est dérivé du principe de l'analyse prescriptive <sup>28</sup>. Selon le "white paper" de Pegasystems <sup>29</sup>, la maintenance prescriptive <sup>30</sup> est une étape supplémentaire après la maintenance prévisionnelle (maintenance prédictive). Elle permet de fournir non seulement les résultats possibles dans une situation donnée (maintenance prédictive), mais aussi la meilleure voie (plan d'exploitation et actions de maintenance appropriées) à suivre en fonction de l'analyse de ces résultats. Selon IBM <sup>31</sup>, la différence majeure entre la maintenance prescriptive et la maintenance prédictive est le processus d'automatisation de décision en maintenance. Ce concept de maintenance prescriptive met l'accent sur l'utilisation de l'IA (intelligence artificielle) à la fois pour les processus de pronostic de défaillance et de décision en maintenance. Ce dernier permet aux équipements d'auto-apprendre par eux-même afin de planifier les actions de mainte-

27. Source : <https://www.emaint.com/>

28. Prescriptive analytics refers to analytics that seek to provide optimal recommendations during a decision making process. Unlike observational analytics or predictive analytics, prescriptive analytics determines ways in which business processes should evolve or be modified

29. <https://www.pega.com>

30. Prescriptive maintenance goes beyond the realm of productive, preventive, and predictive maintenance. Descriptive focuses on what happened in the past. Predictive analytics discovers potential options for the future. Prescriptive maintenance leverages all these approaches and capabilities. The realm of what should happen and the execution of optimized maintenance strategies is precisely the realm of prescriptive maintenance. With prescriptive maintenance, devices, in collaboration with operators, are proactive participants in their own maintenance [105].

31. <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/maintenance-evolution-prescriptive/>

nance optimales et efficaces de façon autonome. Il est important de souligner également que, dans ce concept de maintenance prescriptive, les équipements (composants CPS), en collaboration avec les opérateurs, participent de manière proactive à leur propre maintenance. Par rapport à la vision PHM (Prognostics and Health Management) ou CBM+ (advanced Condition-based maintenance), la maintenance prescriptive est une étape complémentaire de la boucle du processus PHM <sup>32</sup>.

Par rapport au concept de maintenance prescriptive, on peut distinguer deux modules principaux :

- le module d'auto-pronostic (self-prognosis) qui permet de prédire l'évolution de l'état de santé des entités CPS afin d'estimer leurs dates de défaillance selon un planning de production flexible et dynamique ;
- le module support à la décision en maintenance (self-maintain) qui permet de fournir un planning de maintenance de façon autonome en utilisant des développements/algorithmes très avancés dans l'apprentissage et dans l'optimisation.

Un cadre de maintenance prescriptive est donné dans la figure 6.4.

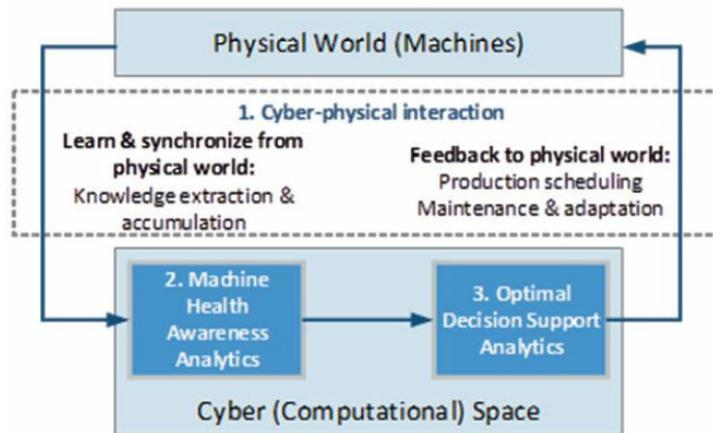


FIGURE 6.4 – Un cadre de maintenance prescriptive pour entités CPS [117].

Ce nouveau concept de maintenance prescriptive représente donc réellement une nouvelle vision dans l'optimisation de la maintenance (aller vers des nouveaux modèles éprouvés). Cependant cette vision soulève de nombreux défis à résoudre.

1. Le premier défi est relatif au module d'auto-pronostic (self-prognosis) potentiellement installé directement dans le composant. Au moins deux difficultés majeures associées à ce défi sont à résoudre. La première est liée à la capacité de traitement limitée au niveau composant. Les approches de pronostic actuelles majoritairement

32. PHM society : <https://www.phmsociety.org/>

proposées au niveau machine/système ne peuvent plus être applicables au niveau composant en particulier dans le contexte d'information massive. La deuxième difficulté est la prise en compte dans le processus de pronostic des impacts de dépendances entre composants notamment entre composants d'actionnement et composants de mesure (capteurs intelligents). Par exemple, l'état dégradé d'un composant CPS d'actionnement peut affecter l'état de son CPS de captation. Inversement, un CPS de captation dégradé peut engendrer des mesures erronées sur l'état réel du CPS d'actionnement avec lequel il est associé. Il est important de souligner que dans les approches de pronostic actuelles, seulement les impacts d'interactions entre composants d'actionnement sont pris en compte.

2. Le deuxième défi est lié au module support à la planification de maintenance de manière autonome (self-maintain). Ce dernier amène une véritable différence par rapport aux approches actuelles basées majoritairement sur des règles statiques de décision qui sont bien définies mais adaptées à des situations spécifiques (utilisation de modèles mathématiques). Cette différence va surtout se concrétiser par l'utilisation de modèles/technologies avancés en modélisation de maintenance (modèles de maintenance prédictive, approches de regroupement dynamique des actions, modèles de dépendances multiples entre composants, etc.), et les techniques avancées pour l'apprentissage par renforcement (technologies Big Data, Deep Learning, etc.).

Chaque défi scientifique donne lieu à un axe de recherche original :

**Axe 1 :** *Modèles de pronostic de défaillance avec dépendances multiples*

**Axe 2 :** *Vers un système autonome de planification de maintenance*

L'axe 1 possède un lien fort avec mes travaux de recherche réalisés et peut être mené prioritairement à court et moyen terme. Trois actions concrètes sont prévues et détaillées dans la section 6.2. L'axe 2 est une piste de recherche innovante et nécessite des investigations rigoureuses pour pouvoir fixer les actions de recherche plus précisément. Néanmoins, deux pistes de recherche relatives aux modèles d'aides à la décision autonome en maintenance sont prévues. La description détaillée de ces pistes est donnée dans la section 6.3.

La figure 6.5 illustre l'approche proposée pour un CPS ou CPPS en lien avec les deux axes de recherche envisagés. Dans l'approche proposée, la fonction d'auto-diagnostic (self-diagnosis) peut être ajoutée pour permettre d'identifier les causes potentielle à suivre pour la prédiction de défaillance. Il est important de souligner que cette fonction est en dehors de notre périmètre laboratoire. Cela pourrait donner naissance à des collaborations potentielles avec des chercheurs/experts dans le domaine de diagnostic pour pouvoir avoir une vision complète de l'approche proposée.

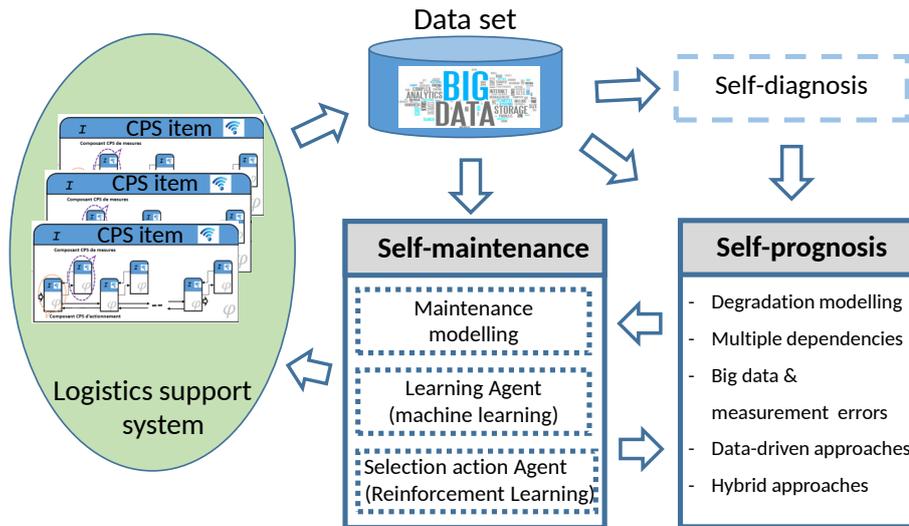


FIGURE 6.5 – Un cadre de l'approche de maintenance prescriptive pour un CPS ou CPPS

## 6.2 Modèles de pronostic de défaillance avec dépendances multiples

Plusieurs approches de pronostic ont été proposées pour prédire la date de panne ou la durée de vie résiduelle (RUL) d'un composant/système [26, 112, 120, 230]. La figure 6.6 donne une classification en trois typologies de méthodes de pronostic existantes.

- Pronostic basé sur l'expérience : ce type d'approche est fondé sur des modèles fiables ou des modèles stochastiques de la dégradation qui sont construits sur le retour d'expérience (REX) ou l'avis d'experts [161, 206]. Ce type d'approche est assez simple à mettre en oeuvre mais non applicable dans un contexte dynamique. Il est principalement utilisé lorsqu'il est trop difficile d'élaborer un modèle physique et qu'aucun dispositif de suivi de l'état de dégradation n'est opérationnel.
- Pronostic guidé par des données : ce type d'approche s'appuie sur l'utilisation de données mesurées sur le composant/système ou d'indicateurs calculés à partir de celles-ci grâce à des techniques avancées d'analyse et traitement de données notamment "predictive analytics"<sup>33</sup>. Ces données peuvent représenter l'état actuel issu du système de surveillance et/ou l'état passé issu d'historiques de mesures obtenus lors d'utilisations passées d'équipements similaires [78, 188]. Les outils principaux pour

33. Predictive analytics include a variety of statistical techniques from predictive modelling, machine learning, and data mining that analyze current and historical facts to make predictions about future or otherwise unknown events [154]

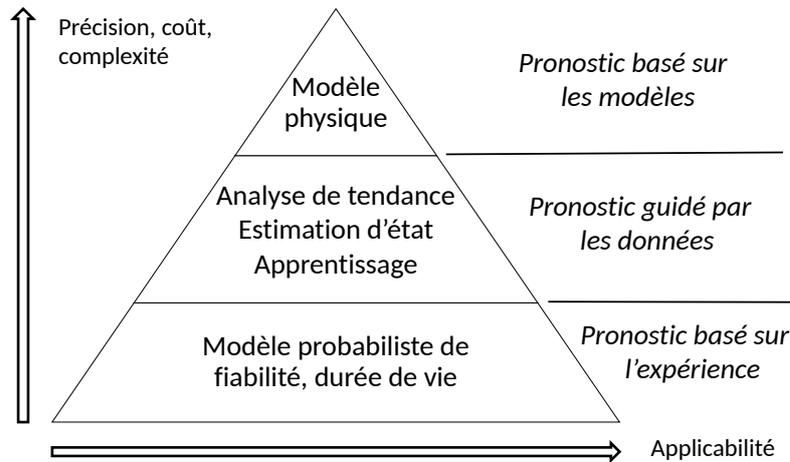


FIGURE 6.6 – Approches de pronostic [112]

ce type d'approches sont principalement des méthodes statistiques (regressions, processus statistiques, réseaux bayésiens, etc.) et méthodes d'apprentissage (réseaux de neurones et neuro-flou).

- Pronostic basé sur les modèles : ce type d'approche est basé sur la compréhension des principes et des mécanismes physiques de dégradation se produisant sur un système. Cette connaissance permet de construire des modèles de comportement du système intégrant l'évolution dynamique de la dégradation [134, 230]. Pour ces approches, la précision de prédiction dépend de la précision des modèles construits.

Ces types d'approches se caractérisent donc sur des discriminants assez forts comme la présence ou non de données, la complexité de l'élément étudié et donc la difficulté de modéliser son comportement, la mise à disposition d'un REX, ... Compte tenu de cette caractérisation, il n'est pas simple d'adopter un «traitement universel» pour l'estimation de la fiabilité/RUL. En ce sens, il est souvent proposé de construire des approches hybrides sur la base de la combinaison de ces approches de référence. Il est montré dans la littérature [121] qu'une approche hybride basée sur la considération conjointe du modèle des données et du modèle physique semble plus pertinente. La connaissance a priori sur un composant permet dans un premier temps de construire des modèles physiques relatifs au processus de dégradation. En se basant sur les modèles physiques, des approches guidées par les données permettront (i)-d'estimer l'état réel à partir des données disponibles et (ii)-de prédire l'évolution potentielle du processus de dégradation dans un contexte opératoire donné. Ce dernier permet de prédire la date de défaillance du système selon une mission spécifique dans le futur.

Les approches de pronostic existantes sont majoritairement proposées au niveau composant isolé ou pour des systèmes à composant unique [230]. Seulement quelques travaux

sur l'extension de ces approches au niveau système à composants multiples ont été étudiés mais des dépendances entre composants ne sont pas, ou partiellement, prises en compte [136, 230]. Par exemple, l'interaction d'états entre composants a été récemment étudiée et intégrée dans le processus de dégradation [10, 21]. Cependant, seulement des modèles restreints (interaction linéaire ou avec une fonction spécifique) ont été proposés dans ces travaux. Ces modèles de dégradation nécessitent donc une extension importante pour pouvoir prendre en considération des dépendances multiples entre composants. L'extension de modèles de pronostic existant devient encore plus difficile en tenant compte des erreurs de mesures [74, 98, 210] notamment des erreurs engendrées par la dégradation des composants de mesures (capteurs) et des composants d'actionnements associés dans le contexte des systèmes CPPS. Par conséquent, la proposition de méthodologies de modélisation du processus de dégradation, d'algorithmes avancées de pronostic constitue un défi scientifique majeur pour le pronostic de défaillance d'un système CPPS.

Dans ce contexte, mon premier axe de mon projet de recherche s'adresse à ce défi scientifique avec l'objectif de développer des modèles hybrides pour le pronostic de défaillance d'un système CPPS. Les contributions scientifiques visées doivent mettre l'accent sur la prise en compte des dépendances multiples entre composants et des erreurs produites par des capteurs dégradés dans les processus de dégradation et de pronostic. Dans ce sens, cet axe de recherche est structuré sur deux actions concrètes originales :

**Action P1** : *Construction de modèles de dégradation avec dépendances multiples entre composants*

**Action P2** : *Développement d'approches de pronostic avec considération de dépendances multiples et d'erreurs de mesure*

De plus, dans un système construit à partir des CPSs, l'autonomie au niveau composant est une propriété nécessaire (auto-configuration), il est donc important d'investiguer des approches/algorithmes de pronostic dont les résultats sont directement "implantables" dans le composant (embedded component) considérant cette autonomie. C'est-à-dire que les traitements du pronostic peuvent s'exécuter directement au niveau composant. En effet, les approches de pronostic proposées au niveau système ne pourraient plus être applicables au niveau composant à cause de la capacité limitée à la fois en stockage de données et en traitement pour le pronostic des composants. Il est donc important de proposer d'autres types d'approches/algorithmes de pronostic plus adaptés. Dans cette optique, la troisième action de recherche intitulée *extension et déploiement d'approches de pronostic au niveau composant* (**Action P3**) est envisagée dans mon premier axe de recherche.

Le reste de cette section est dédié à une description succincte des trois actions de recherche envisagées.

### 6.2.1 Construction de modèles de dégradation avec des dépendances multiples

L'objectif de cette action de recherche est de développer des modèles de dégradation pour des composants CPS de nature différente (CPS d'actionnement et CPS de mesure). Les modèles proposés doivent permettre de prendre en considération non seulement des caractéristiques propres d'un composant, des dépendances au niveau composant (ex., condition opératoire, modes/fonctions multiples) mais aussi des dépendances multiples entre composants.

#### Quelques éléments clés pour la modélisation de dégradation

##### Outils scientifiques en support de l'action

Le développement de modèles de dégradation visés nécessite des modèles mathématiques et des outils de modélisation spécifiques/statistiques. Plus précisément, on peut isoler quelques modèles/outillages intéressants comme :

- Les processus stochastiques : processus gamma, Wiener, Markov
- le modèle de copule (Copulas), modèle de mélange gaussien (gaussian mixture models).

##### Moyens, ressources prévisionnels pour mener à bien l'action

En terme de ressources de support à ces travaux, j'ai débuté une thèse au sein du CRAN en collaboration avec Pr. Benoit Iung en octobre 2018. Cette thèse est financée par un contrat doctoral avec comme doctorant M. Duc-Hanh Dinh. Cette thèse est intitulée "Contribution à la maintenance prévisionnelle d'un système de production à composants multiples avec dépendances". Son objectif principal est de développer des modèles de dégradation adéquats permettant de prendre en compte des interactions entre composants notamment des dépendances structurelles : l'impact d'une action de maintenance, effectuée sur un composant ou un groupe de composants, au processus de dégradation d'autres composants non-maintenus. Par exemple, la maintenance d'un composant CPS pourrait accélérer le processus de dégradation d'autres composants CPS.

De plus, le travail visé dans cette action possède un lien fort avec mes travaux réalisés au sein du CRAN (publications R19, R16, C25) en collaboration avec Pr. Philip Scarf (Salford university, UK). Cette collaboration pourra être envisagée à nouveau pour cette voie de recherche.

Cette action peut s'appuyer aussi sur des collaborations pérennes avec Pr. Christophe Bérenguer, (GiPSA-Lab Grenoble INP) et Pr. Antoine Grall (LM2S, UTT Troyes), experts

en modélisation de dégradation.

A moyen terme (2021/2022), une thèse pourra être envisagée pour cette action sous la forme d'un contrat doctoral ou d'une bourse gouvernementale (Vietnam). L'objectif de cette thèse sera de développer des modèles de dégradation des composants CPS avec des dépendances multiples notamment des dépendances fonctionnelles et/ou stochastiques entre composants.

### 6.2.2 Développement d'approches de pronostic avec considération de dépendances multiples et d'erreurs de mesure

On suppose dans cette direction de recherche que les données relatives aux états des composants CPS de nature différente (CPS d'actionnement et CPS de mesure) d'un système sont mesurées et envoyées au calculateur central du système pour un traitement plus global afin de pronostiquer les dates de défaillance des composants et du système dans son ensemble.

L'objectif de cette piste de recherche est, dans un premier temps, de développer des algorithmes de pronostic avancés permettant de prédire la défaillance (fiabilité/RUL) des composants à partir de données disponibles en utilisant leurs modèles de dégradation et de mesures. Dans un second temps, le travail vise à développer des modèles de défaillance au niveau système pour estimer la défaillance (fiabilité/RUL) d'un système à partir de l'information sur la défaillance des composants individuels en tenant compte de l'ensemble de dépendances au niveau composant et de celles existantes entre composants.

#### Pronostic de défaillance d'un composant

De façon générale, l'approche de pronostic visée pour la prédiction de la défaillance d'un composant est illustrée dans la figure 6.7.

#### Pronostic de défaillance d'une machine/sous-système

Une machine/sous-système est définie comme un sous-ensemble de composants interconnectés pour assurer une ou plusieurs fonctions spécifiques. Dans ce sens, on suppose qu'une machine étudiée est composée de  $N$  composants CPS. On s'intéresse à la prédiction de la durée de vie restante de la machine/sous-système.

$$RUL(t_k) = \varphi(RUL^1(t_k), RUL^2(t_k), \dots, RUL^N(t_k)), \mathfrak{F}_{t_k}), \quad (6.1)$$

avec  $\mathfrak{F}_{t_k}$  étant la fonction de fiabilité à la défaillance de la machine.

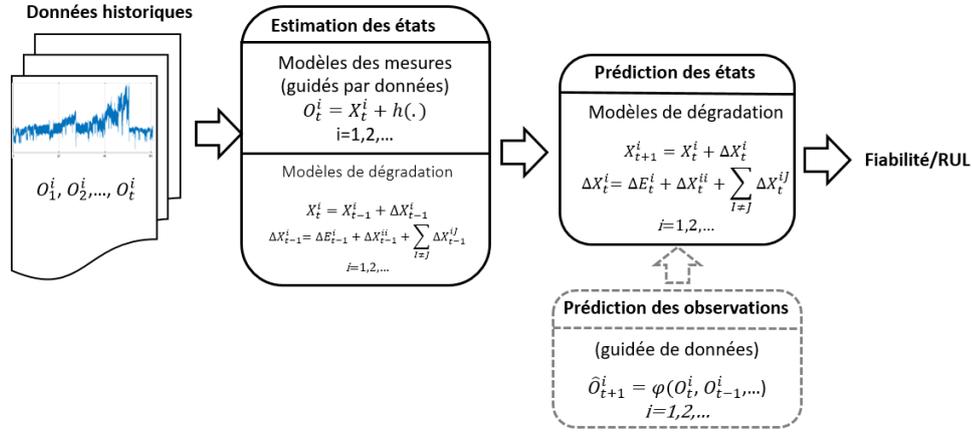


FIGURE 6.7 – Illustration de l’approche de pronostic proposée.

De façon similaire, la fiabilité prévisionnelle de la machine est calculée par :

$$R(t_k) = \psi(R^1(t_k), R^2(t_k), \dots, R^N(t_k)), \mathfrak{F}_{t_k}), \quad (6.2)$$

Il est important de souligner que la fonction de structure classique permettant de calculer la fiabilité d’une machine à partir de la fiabilité de ses composants ne peut plus être applicable en présence de dépendances entre composants [171]. Pour pallier cette problématique, un modèle a été proposé récemment dans [184]. Il n’est cependant applicable que pour une interaction linéaire avec la loi de durée de vie statique (distribution de Weibull). Par conséquent, le travail demandé dans cette partie s’appuie principalement sur le développement de modèles pour le calcul de la fiabilité/RUL d’une machine à partir des fiabilités/RUL estimées de ses composants (Equations (6.2) et (6.1)) avec des dépendances multiples entre composants.

### Outils scientifiques en support de l’action

En terme d’outillage pour cette voie de recherche, les outils nécessaires s’appuient à la fois sur des développements mathématiques, les modèles probabilistes mais aussi des outils/algorithmes de traitement statistiques et d’apprentissage. Plus précisément, les outils suivants sont potentiellement utilisables :

- Processus de Markov, réseaux de Pétri, filtres de Kalman, filtres particulières (particle filters)
- Machine learning, réseaux bayésiens

## Moyens, ressources prévisionnels pour mener à bien l'action

En terme de moyens et ressources en support à cette action de recherche, les collaborations suivantes ont été planifiées ou initiées :

- Au niveau international, la collaboration avec le Dr. Roy Assaf, actuellement expert en intelligence artificielle chez IBM (Zurich Research Laboratory, Switzerland), pourra être étendue afin d'investiguer des problématiques de l'action. Ce principe d'extension peut aussi s'appliquer à la collaboration avec le Pr. Min Xie.
- Au niveau laboratoire, cette action possède un lien avec les travaux du Dr. Nicolae Brinzei (maître de conférences au CRAN) autour de la formulation mathématique et d'outils de modélisation/calcul (réseaux de Pétri colorés) pour l'évaluation de la fiabilité au niveau système. Ces techniques semblent intéressantes pour le calcul de fiabilité/RUL au niveau machine à partir des fiabilités/RUL des composants avec la considération de dépendances multiples. Une collaboration avec Dr. Nicolae Brinzei est en cours d'investigation en continuité avec notre collaboration passée autour du projet VITTEL.

Plus globalement sur ce sujet, une thèse en co-direction avec le Pr. Benoit Iung et en collaboration avec le Dr. Laurent Mendizabal (CEA tech Grenoble) a démarrée en octobre 2018. Il s'agit en effet de la thèse de Minh-Tuan Truong financée par CEA LETI de Grenoble. Le travail visé dans cette thèse est dans un premier temps de développer un modèle de fiabilité d'un système électronique à composants multiples avec fortes dépendances entre composants. Dans un second temps, l'objectif est de proposer des approches/algorithmes permettant d'estimer les paramètres du modèle proposé à partir des données de tests accélérés.

En fonction des résultats de cette première thèse, une seconde thèse avec le CEA est tout-à-fait envisageable toujours sur cette même problématique.

### 6.2.3 Extension et déploiement d'approches de pronostic au niveau composant

On s'intéresse dans cette voie de recherche à une architecture de pronostic distribuée [64, 95]. Le traitement du pronostic de défaillance d'un composant est réalisé directement au niveau composant. Cela est tout-à-fait en phase avec le concept de l'industrie du futur. Chaque composant CPS est capable de traiter lui-même ses données pour pronostiquer sa date de défaillance (auto-pronostic). En se basant sur les résultats du pronostic fournis par des composants CPS, le pronostic de défaillance d'une machine est réalisé au niveau machine (ex., calculateur central de la machine). Dans la littérature, quelques modèles

de support ont été proposés mais il existe très peu de travaux sur des algorithmes de pronostic adaptés pour cette architecture distribuée [50, 175]. Un défi majeur à ce type d'architecture est la capacité limitée en stockage et en traitement des composants CPS. Ce défi devient plus difficile en présence des dépendances multiples entre composants et d'erreurs de mesures.

Pour adresser ce défi, l'objectif de cette voie de recherche est de développer des approches de pronostic adaptées requérant moins de ressources informatiques (ex., moins de données de stockage et moins de puissance de calcul). Les modèles/algorithmes de pronostic développés seront exécutés aux niveaux composants pour la prédiction de défaillance des composants individuels. Il est important de souligner qu'avec des contraintes techniques relatives à la capacité informatique limitée des composants CPS, les approches proposées (modèles de dégradation, algorithmes de pronostic) dans l'action P2 ne pourraient plus être applicables.

### **Outils scientifiques en support de l'action**

En terme d'outillage, les outils suivants pourraient être utilisés :

- Développement mathématique
- Techniques de régression, machine learning
- Réseaux bayésiens, filtres de Kalman, filtres particuliers (particle filters)

### **Moyens, ressources prévisionnels pour mener à bien l'action**

Au niveau international, un projet de collaboration le Pr. Li Li (Tongji university, China) intitulé "Advanced prognostics models for multi-component system with stochastic dependence and sensor data uncertainty" a été déposé en Mars 2019 dans le cadre de l'appel d'offres du FY2019 (Fund for international Young scientists). De plus, comme le travail visé dans cette action de recherche a un lien avec le travail de postdoc de Dr. Bin Liu, actuellement chercheur à l'University of Strathclyde (UK), que j'ai encadré (publication R22 et C41), une poursuite à cette collaboration est à envisager.

An niveau laboratoire, ce travail prospectif a un lien avec des travaux du Dr. Alexandre Voisin (maître de conférences, CRAN) autour de l'agrégation d'indicateurs de santé par l'intégral de Choquet. Cette technique semble intéressante pour l'étape 2 de la méthode proposée dans cette action de recherche. Une collaboration spécifique sur ce sujet avec Dr. Alexandre Voisin est donc à envisager. Il est à noter que depuis mon arrivée au CRAN, j'ai une collaboration forte avec lui dans plusieurs projets de recherche autour de la thématique PHM (Prognostics and Health Management) et maintenance (ex. LabCOM

PHM-Factory, projet HUMS) et des publications scientifiques communes (R8, RN1, C19, C18, C14 et C12).

## 6.3 Vers un système autonome de planification de la maintenance

Dans le contexte des systèmes CPPS, cet axe de recherche a pour originalité majeure de reconsidérer la phase cruciale de déploiement optimal des actions de maintenance en cherchant à exploiter au mieux toutes les opportunités offertes par la mise à disposition de sources d'information massive afin de fournir de façon automatique un plan de maintenance optimal et efficace dans un contexte opératoire dynamique. Par conséquent, les techniques avancées en apprentissage par renforcement [150, 190, 191] semblent bien adaptées pour répondre à cette problématique. Le principe est qu'un agent (opérateur) est autorisé à décider d'actions affectant la sortie du système, telles que des interventions de maintenance, et les états référents du système sont indiqués à l'agent en utilisant une fonction de récompense (ex. fiabilité/disponibilité, coût, etc.). De cette façon, l'agent apprend à améliorer ses décisions à long terme par l'évaluation et le retour d'expérience sur la qualité de choix réalisé. Dans ce sens, cette approche semble efficace pour la prise de décision séquentielle en présence d'incertitude telles qu'inhérentes aux masses d'informations. Des travaux, dans le cadre de la maintenance, ont déjà expérimenté cette approche [38, 107, 133, 148]. Cependant, les approches proposées ne peuvent être appliquées qu'au niveau composant ou à des systèmes à composant unique avec des hypothèses simplistes (ex., maintenance parfaite, nombre d'états limité, etc.). Plus récemment, quelques travaux sur l'application de l'apprentissage par renforcement pour l'optimisation de la maintenance de systèmes à composants multiples ont été proposés dans [8, 150, 174]. Néanmoins, les approches proposées sont encore limitées à des systèmes avec composants indépendants. De plus, aucune exigence liée au système de soutien (ex., pièces de rechange, nombre de réparateurs, contraintes spécifiques, etc.) n'est considérée. Par conséquent, elles ne peuvent pas être directement appliquées aux CPPS avec lesquelles les entités (composants ou machines/sous-systèmes) sont dépendants et collaborent fortement entre eux.

Dans ce contexte, mon deuxième axe de recherche a pour objet d'adresser ce défi scientifique avec l'objectif de développer des modèles de maintenance innovants pour permettre à un CPS/CPPS de planifier son planning de maintenance de façon autonome et efficace. Dans ce sens, cet axe de recherche est structuré en deux actions concrètes originales :

**Action M1 :** *Développement de modèles d'aide à la décision autonome en maintenance*

**Action M2 :** *Développement d'une plate-forme expérimentale pour la validation des ap-*

*proches développées*

### 6.3.1 Développement de modèles d'aide à la décision autonome en maintenance

L'objectif de cette orientation de recherche est de développer des modèles d'aide à la décision autonome de maintenance pour des systèmes CPPS. Les travaux développés dans cette piste de recherche visent à répondre aux différentes questions :

- Quels sont les processus de décision pertinents permettant aux entités CPS (composants ou machines/sous-systèmes) de prendre de façon autonome leurs décisions optimales en maintenance ?
- Quels types d'algorithmes d'apprentissage par renforcement sont les plus adaptés à la planification autonome de maintenance ?
- Quelles sont les modèles mathématiques à formaliser/développer pour la modélisation de la maintenance (modèles de maintenance intégrée, modèles de maintenance collaborative, modèles de regroupement direct ou indirect des actions, etc.) ?
- Comment prendre en considération des dépendances multiples entre composants CPS dans le modèle de maintenance prescriptive ? Quels sont leurs impacts sur le processus de décision autonome en maintenance ?

#### Quelques éléments clés

Une réflexion sur le modèle d'aide à la planification autonome de maintenance est donnée dans la figure 6.8. Dans l'approche générique proposée, trois modules principaux à développer sont :

- La modélisation de la maintenance qui consiste à développer des modèles de maintenance intégrée (maintenance, gestion des pièces de rechange, réparateurs, outils de maintenance, etc.) ; des modèles de maintenance collaborative entre entités CPS ; regroupement dynamiques d'actions, modèles de dépendances multiples entre entités CPS et aussi des contraintes. Ceci permet de fournir aux deux agents (agent d'apprentissage et agent de sélection d'action) les caractérisations et spécifications complètes relatives aux entités maintenues, leur système de soutien et des modèles avancés de maintenance etc. Le processus d'apprentissage et de décision autonome est réalisé par deux agents (agent de sélection d'actions et agent d'apprentissage).
- l'agent d'apprentissage qui a comme objectif d'estimer la récompense potentielle produite par la réalisation d'une action de maintenance autorisée par l'agent de sélection d'actions.

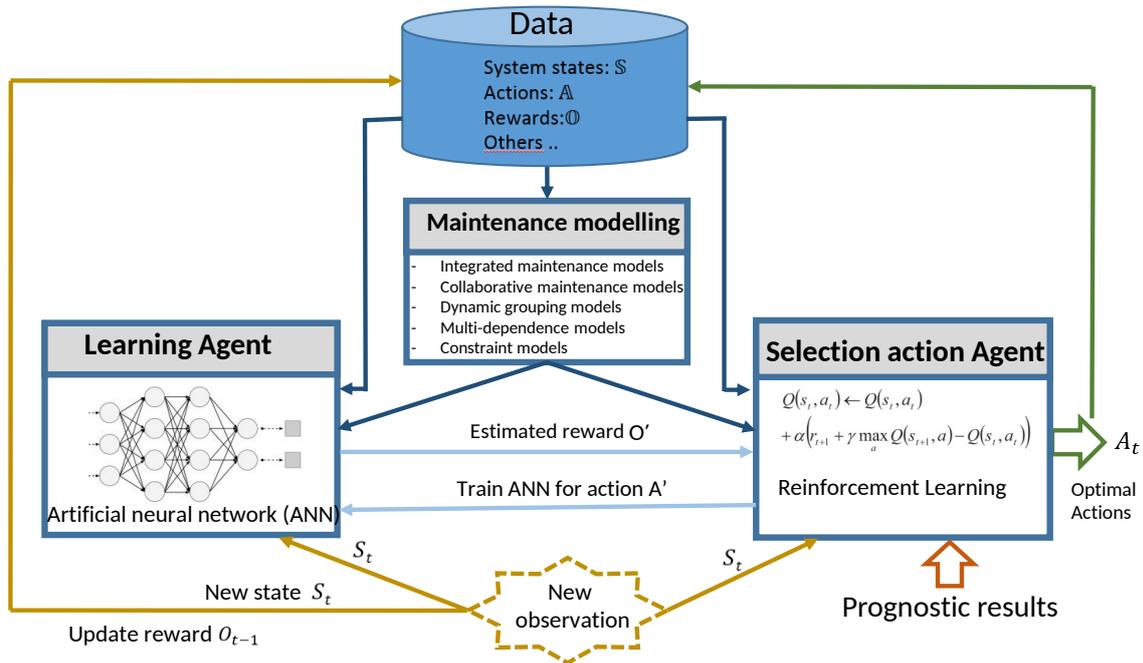


FIGURE 6.8 – Un modèle générique d'aide à la planification autonome de maintenance

- l'agent de sélection d'actions qui apprend à améliorer ses décisions à long terme par l'évaluation et le retour sur la qualité de choix réalisé selon une ou plusieurs fonctions objectifs spécifiées.

### Outils scientifiques en support de l'action

En terme d'outillage, les outils suivants pourraient être utilisés :

- Machine learning : réseaux de neurones artificiels (Artificial neural networks - ANN), apprentissage par renforcement (Q-learning, SARSA, Deep-Q-Networks) ;
- Développement mathématique.

### Moyens, ressources prévisionnels pour mener à bien l'action

En terme de moyens et ressources en support à cette action, j'ai initié une collaboration forte avec l'équipe RANDOM (Reponsable Pr. Cristiano Cavalcante à l'Universidade Federal de Pernambuco(UFPE), Brésil) dans le cadre du projet CAPES-COFECUB. La collaboration porte sur le développement de modèles d'apprentissage (agent d'apprentissage) et d'aide à la décision autonome (agent de sélection d'actions) en maintenance conditionnelle pour un système à composants multiples. Deplus, un dépôt ANR Franco-brésillien avec l'équipe RANDOM dans le cadre d'appel à projets générique PRCI (Projets

de recherche collaborative – International) 2020 a été initié (je suis coordinateur du côté français).

Un deuxième projet de collaboration avec le Pr. Li Li (Tongji university, china) a été déposé, projet intitulé "Basic theory and key technology of intelligent operation, maintenance and management of IC front production line". L'objectif de ce projet est de développer des nouvelles méthodes basées sur la technique d'intelligence artificielle (IA) pour une optimisation de production et maintenance de la ligne de production de l'entreprise SMIC (Ningb), China.

Au niveau national, une collaboration avec le Dr. Thi-Phuong-Khanh Nguyen (maître de conférences à l'ENIT, Tarbes) avec qui j'ai travaillé (publications R21, C32, C30) est envisagée. En effet, Dr. Nguyen a publié récemment un travail sur l'application de techniques d'apprentissage par renforcement à la maintenance prédictive d'un système à composant unique. Le travail envisagé avec elle s'appuie sur une extension de son approche au problème de regroupement dynamique d'actions de maintenance pour un système à composants multiples.

Une autre collaboration avec Dr. Hai-Canh Vu (enseignant-chercheur à l'Université de technologie de Troyes) autour des modèles de maintenance collaborative est également prévue.

### 6.3.2 Développement d'une plate-forme expérimentale pour la validation des approches développées

L'objectif de cette action est de développer une plate-forme (assimilable à un système CPPS) permettant de tester et valider des algorithmes de pronostic et le système autonome de planification de la maintenance développés dans les actions de recherche P3 et M1. La plate-forme développée sera utilisée, dans des conditions proches de la réalité industrielle, pour générer les données nécessaires aux phases de pronostic et d'apprentissage du système autonome de maintenance. Le système autonome sera par conséquent, par la maîtrise de la plate-forme, alimenté avec des données issues de différents scénarios de fonctionnement permettant ensuite de tester/valider ce système dans la prise de décision sur les interventions de maintenance en tenant compte aussi des interactions entre les composants du système cible ainsi que les différentes dépendances/contraintes liées au système de soutien (dépendance économique, réparateurs / outils de maintenance, pièces de rechange, etc.).

En ce sens, la plate-forme d'expérimentation TELMA (TELÉMAintenance, figure 6.9) du pôle AIP-PRIMECA Lorraine qui est une plate-forme déjà utilisée depuis plusieurs années sera modifiée en ajoutant deux nouvelles fonctionnalités d'auto-pronostic et d'auto-

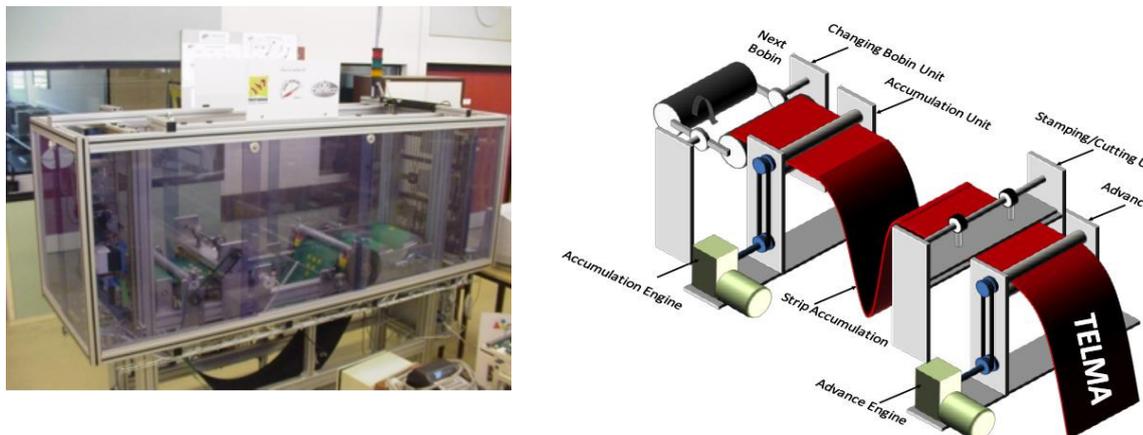


FIGURE 6.9 – Vues réelle et schématique de la plate-forme TELMA

planification de la maintenance.

Il est important de souligner que TELMA est à la fois une plate-forme pédagogique et une ressource pour la recherche en relation avec les nouveaux besoins exprimés par les entreprises, notamment dans les domaines de la maintenance, de la sûreté de fonctionnement et de la qualité, liés au développement des technologies de l'information et de la communication. Ainsi, sa vocation est de mettre en avant l'efficacité des organisations modernes et des nouveaux outils de maintenance (maintenance prévisionnelle, maintenance collaborative, maintenance opportuniste, e-maintenance, pronostic, CPS,...) et leur impact sur la disponibilité, les coûts et la qualité de fabrication d'un système de production. Elle est utilisée comme support de validation pour certains travaux de recherche effectués au CRAN qui concernent ces problématiques (ex. la thèse de Anh Hoang que j'ai co-encadré avec Pr. Benoit Iung). La plateforme TELMA est constituée de deux systèmes superposés : un premier système permettant de simuler un système de presse/poinçonnage inspiré de systèmes industriels et un second système permettant de créer des symptômes de dégradations/défaillances du premier système. Ces deux systèmes sont indépendants au sens où leurs parties commande et opérative sont physiquement découplées (supportées par des composants distincts). La vue fonctionnelle de la plate-forme TELMA est donnée dans la figure 6.10.

L'extension de la plate-forme en support aux expérimentations souhaitées pour mon projet de recherche s'appuie sur les éléments principaux suivants :

- La génération du processus de dégradation : la dégradation des deux moteurs (deux composants clés de la plate-forme) est simulée par la force du frein magnétique. Cependant, le niveau de la force (niveau de dégradation) est saisi manuellement.

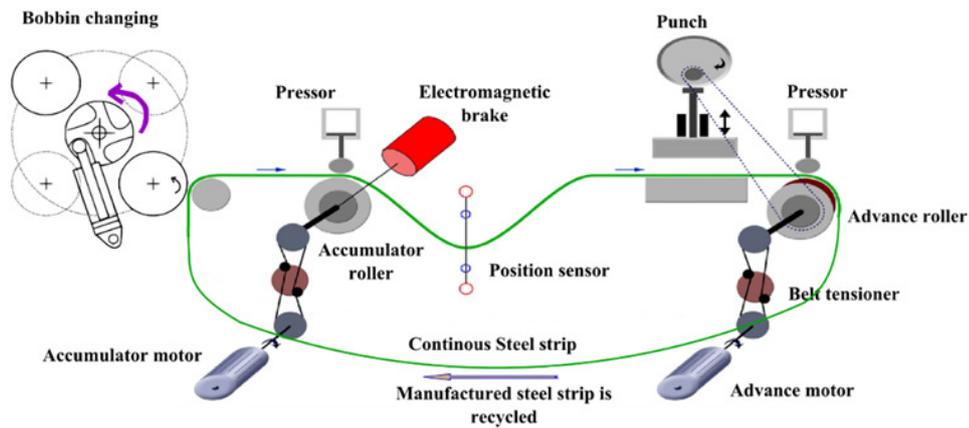


FIGURE 6.10 – Vue fonctionnelle de la plate-forme TELMA

Cela ne permet pas de simuler un processus de dégradation stochastique. Il faudra donc ajouter un module permettant de générer automatiquement un processus de dégradation (ex., processus stochastique gamma, Markov ou Wiener) selon les paramètres donnés.

- L'implantation de capteurs intelligents de type Raspberry Pi permettant à la fois de mesurer l'état de santé de quelques composants principaux (températures, consommation électrique de chaque moteur, ...) et de traiter les données mesurées de façon efficace ;
- L'implantation d'algorithmes de pronostic développés dans l'axe de recherche 1 dans des capteurs intelligents pour prédire l'évolution potentielle de dégradation des composants cibles/plate-forme dans un contexte donné (plan de production spécifique, ex. nombre de produits par heure) ;
- L'implantation d'un module d'aide à la décision autonome de la maintenance aux niveaux composants ou/et système. Les entrées de ce module sont non seulement les informations relatives à l'état actuel (température, efficacité énergétique, ...) de quelques composants clés de la plate-forme mesurées et pré-traitées par des capteurs intelligents installés mais aussi les résultats de pronostic traités par le calculateur central ou directement par des capteurs intelligents installés.

Les données issues de cette plate-forme seront générées lors de l'exécution de différents scénarios d'exploitation (variation de productivité avec différents processus de dégradation simulés) et de maintenance (maintenance parfaite ou imparfaite). La plate-forme va donc se comporter comme une plate-forme d'émulation permettant au système autonome d'apprendre mais aussi d'être validée en regard de performances de planification de maintenance attendues.

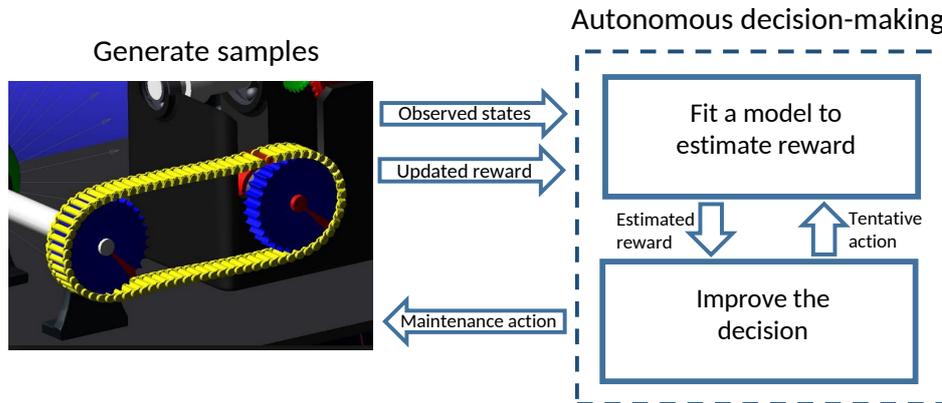


FIGURE 6.11 – Prototypage du système autonome de planification à l'échelle réduite

Cette extension sur la plate-forme TELMA peut être également utilisée au montage de travaux pratiques pour la formation. Plus précisément, deux maquettes de travaux pratiques sur cette extension sont détaillées dans la section 6.7.2.

De plus, cette extension sur la plate-forme TELMA doit permettre également de pouvoir développer, dans le cadre du projet CAFES-COFECUB Ph950/19, un système d'aide à la décision autonome à l'échelle réduite. L'idée est de transposer les caractéristiques principales de TELMA vers une plate-forme beaucoup plus restreinte et représentative de problématiques traitées par notre partenaire brésilien. En ce sens, la plate-forme expérimentale à l'échelle réduite sera composée de quelques composants mécaniques (en cohérence avec l'exemple choisi de ligne de production) dont des engrenages d'entraînement (drive gear), des chaînes (chain), des engrenages entraînés (gear driven); des capteurs fournissant tout un ensemble de données sur le fonctionnement, l'état des composants (ex. capteur de vibration, capteur de température, capteur de couple). Certains de ces capteurs sont de type MEMS avec capacités de traitement embarqués; des contrôleurs/superviseurs (ex. SCADA) fournissant aussi des données de fonctionnement; des alimentations; un réseau de communication pour la transmission de données, un outil de GMAO (ex. Optimaint), des bains d'huile contenant un mélange liquide/solide pour accélérer le processus de dégradation de la chaîne; potentiellement des freins pour venir simuler, sur l'axe des engrenages, des problèmes de dégradation des roulements etc. Le prototypage de cette plate-forme réduite est donné dans figure 6.11.

### **Moyens, ressources prévisionnels pour mener à bien l'action**

Cette action de recherche s'inscrit dans le projet de collaboration avec notre partenaire brésilien dans le cadre du projet CAPES-COFECUB (co-responsable avec Pr. Benoit Iung, côté CRAN). Il s'agit du projet intitulé "Vers un système autonome-intelligent pour l'optimisation de maintenance dans un contexte de l'industrie du futur" (projet Ph950/19) financé par CAPES-COFECUB pour une période de 4 ans (2019-2022).

## **6.4 Récapitulatif des moyens, ressources prévisionnelles**

Un aperçu des ressources et collaborations externes prévisionnelles sur une période de 6 ans à venir est donné par la figure 6.12 à partir des descriptifs des sections précédentes. D'autres collaborations/projets pourraient être initiées au fur et à mesure selon l'avancement des actions de recherche et mon implication scientifique dans différentes communautés.

Des collaborations internes sont directement envisageables avec des membres de l'équipe SdF-PHM2 du département ISET notamment avec Pr. Benoit Iung, Pr. Eric Levrat, Dr. Alexandre Voisin et Dr. Nicolae Brinzei.

### **Projet CAPES-COFECUB Ph950/19**

Ce projet CAPES-COFECUB Ph950/19 est co-financé entre la France et le Brésil dans le cadre de coopération scientifique entre des centres de recherche et des universités des deux pays. L'objectif de ce projet est de développer un prototype de système autonome de planification de la maintenance.

*Titre du projet* : Vers un système autonome-intelligent pour l'optimisation de maintenance dans le contexte de l'industrie du futur.

*Durée* : 4 ans à partir du 01 janvier 2019.

*Partenaires* : Université fédérale du Pernambouc et Université de lorraine (CRAN).

*Mon rôle* : Je suis impliqué très fortement dans ce projet. Je suis l'initiateur et co-responsable scientifique de l'équipe française. Mon rôle est surtout de concevoir/développer des modèles de maintenance prescriptive permettant de fournir un planning de maintenance optimale en utilisant l'IA.

*Budget* : Environ 20k€ par an dont 5,6k€ pour l'équipe française.

### **Dépôt du projet DP1 en collaboration avec Pr. Li Li**

Ce projet a été déposé dans le cadre de l'appel d'offre du NSFC-International Young Scientists. L'objectif de ce projet est de développer des approches de pronostic avancés

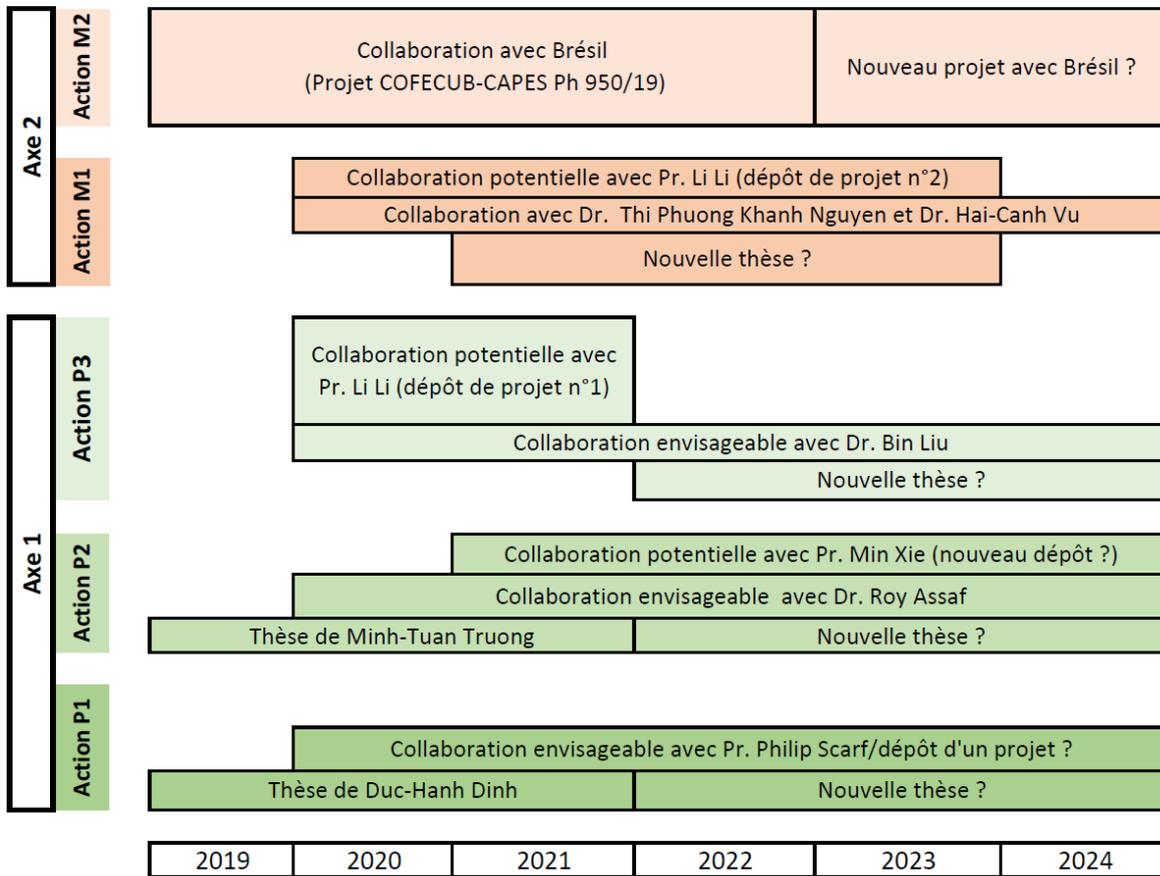


FIGURE 6.12 – Aperçu des ressources doctorales et collaborations externes prévisionnelles sur les 6 ans à venir

permettant de prédire la date de défaillance d'un système à composants multiples avec dépendance stochastique et prise en compte de données erronées générées par la dégradation de capteurs.

*Titre du projet* : Advanced prognostics models for a multi-component system with stochastic dependence and sensor data uncertainty.

*Durée* : 2 ans à partir du 01 janvier 2020.

*Partenaires* : Université de lorraine (CRAN) et Université de Tongji (Chine).

*Mon rôle* : Je suis porteur de ce projet. Trois doctorants chinois ont été prévus pour travailler avec moi sur trois work-packages du projet. La description plus détaillée de ce projet est donnée dans l'annexe B.

*Budget* : 400k CNY (environ 50k€).

### Dépôt du projet DP2 avec Pr. Li Li.

Ce projet a été déposé dans le cadre de l'appel d'offre du NSFC (Natural Science Foundation of China) en collaboration avec des partenaires chinois (deux partenaires académiques et un partenaire industriel). L'objectif de ce projet est de développer des nouvelles méthodes basées sur l'IA (Intelligence Artificielle) pour une optimisation de la production et la maintenance. Les approches proposées seront appliquées à la ligne de production de l'entreprise SMIC (Ningbo).

*Titre du projet* : Fundamental Theories and Critical Technologies for Intelligent Operation and Management of Integrated Circuit Front-end Fabrication.

*Durée* : 4 ans à partir du 01 janvier 2020.

*Partenaires* : 4 partenaires internationaux (Université de Tongji, Université de Zhejiang, Université de Lorraine (CRAN) et entreprise SMIC Ningbo).

*Mon rôle* : Je suis co-responsable scientifique pour le CRAN qui interviendra pour développer des modèles de maintenance prédictive. La description plus détaillée de ce projet est donnée dans l'annexe B.

## 6.5 Positionnement du projet de recherche

Au niveau laboratoire, mon projet de recherche s'inscrit complètement dans des thématiques recherche privilégiées au sein du projet SdF-PHM2 (Sûreté de Fonctionnement Système - Prognostics & Health Management et Maintenance) du département ISET/CRAN autour de l'évaluation de fiabilité prévisionnelle et l'optimisation de la maintenance pour l'industrie du futur. D'autre part, il se situe comme une complémentarité à des thématiques de recherche identifiées dans le groupe de recherche PHM initié par le Pr. Benoit Lung.

Au niveau national, mon projet de recherche se positionne clairement dans des communautés françaises comme H2M (Health Management and Maintenance), S3 (Sûreté, Surveillance et Supervision) du GDR MACS CNRS, ou encore IMdR (institut pour la maîtrise des risques).

Au niveau international, il s'inscrit dans des thématiques fortes défendues par différentes communautés comme :

- ESRA (European Safety and Reliability Association), MIMAR (Modelling in Industrial Maintenance and Reliability), IFAC TC 5.1. (Manufacturing Plant Control), IFAC SafeProcess pour les thématiques relatives à la maintenance qui visent à développer des nouvelles modèles de maintenance prédictive ou prescriptive pour des systèmes complexes notamment des systèmes de production cyberphysiques ;

- les communautés savantes PHM (Prognostics and Health Management), IEEE PHM ou PHM society pour les thématiques autour du pronostic de défaillance qui visent à développer des modèles avancés de pronostic pour des systèmes à composants multiples avec des dépendances multiples.

## 6.6 Collaborations et rayonnement

### 6.6.1 Collaborations de recherche

Différentes collaborations (voir figure 6.12) ont déjà été développés ou initiées pour supporter mon projet de recherche :

1. Collaborations fortes au sein du laboratoire : Pr. Benoit Iung, Pr. Eric Levrat, Dr. Alexandre Voisin et Dr. Nicolae Brinzei
2. Collaborations externes au niveau national :
  - Dr. Hai-Canh Vu, Pr. Antoine Grall (LM2S/UTT, Troyes)
  - Pr. Christophe Bérenguer (Gipsa-Lab, Grenoble)
  - Dr. Thi-Phuong-Khanh Nguyen (ENIT, Tarbes)
  - Dr. Laurent Mendizabal (CEA LETI Grenoble)
3. Collaborations externes au niveau international :
  - Pr. Phil Scarf (Salford university, UK).
  - Dr. Bin Liu (University of strathclyde, UK).
  - Dr. Roy Assaf (Zurich Research Laboratory, Switzerland).
  - Pr. Emanuele Borgonovo (Bocconi University, Italy).
  - Pr. Min Xie (City university of Hongkong, China).
  - Pr. Anne Barros (Norwegian University of Science and Technology, Norway).
  - Pr. Cristiano Cavalcante (Universidade Federal de Pernambuco, Brésil).
  - Pr. Li Li (Tongji university, China).

### 6.6.2 Renforcement du rayonnement

Au niveau laboratoire, à terme mon ambition est de créer une "équipe" d'enseignants-chercheurs au sein du département ISET pour travailler sur mes deux axes de recherche proposés en cohérence avec les autres travaux PHM proposés au sein du CRAN .

En cohérence, au niveau national, je souhaite surtout promouvoir un axe de recherche autour de l'application de l'IA à la maintenance prescriptive au sein du groupe de travail H2M ou S3.

Au niveau international, je suis déjà impliqué dans certaines communautés scientifiques internationales à travers diverses activités de recherche (participation active à des congrès scientifiques comme ESREL, PHM, MIMAR... ; président de sessions ; membre de comité de conférences ; co-chair des conférences MIMAR2016, MIMAR2018, MIMAR2020 ; co-éditeur d'un numéro spécial dans le journal RESS). Je souhaite étendre ces implications notamment dans les thématiques ayant un lien fort avec mon projet de recherche envisagé par des activités concrètes, par exemple, la proposition de sections spéciales autour des approches/algorithmes de pronostic aux niveaux composants/système ou encore la maintenance prescriptive ; la proposition de numéros spéciaux dans des journaux connus (ex., RESS, JRR). Ceci devrait me permettre, en utilisant et étendant mon réseau de connaissance (Pr. Phil Scarf, Pr. Min Xie, Pr. Emanuele Borgononov, Pr. Christophe Bérenguer, ...), de prendre part plus activement à l'organisation de certains événements et aussi au comité éditorial de journaux relatifs à mon domaine de recherche comme RESS, JRR.

## 6.7 **Projet d'enseignement**

Mon projet d'enseignement est décliné sur deux actions concrètes aux enseignements existants à TELECOM Nancy (formation d'ingénieurs) et à la faculté des sciences et technologies (programme du Master ISC-Ingénierie des Systèmes Complexes). Mes contributions s'appuient non seulement sur "l'amélioration" d'unités d'enseignement (UE) existantes dans un contexte de l'industrie du futur mais aussi sur la création de nouveaux travaux pratiques (TP) sur des technologies avancées de l'industrie du futur (capteurs intelligents, technologies prédictives, apprentissage automatique).

### 6.7.1 **Innovation d'unités d'enseignement existantes**

Mon projet d'enseignement dans ce volet s'appuie sur l'innovation de deux UEs existantes : UE-Evaluation de performance et UE-Entreprise 4.0, UEs pour lesquelles j'assume la responsabilité pédagogique.

#### **UE-Evaluation de performances**

En 2013, j'ai repris l'UE-Evaluation de performances en tant que responsable. Cette UE est destinée aux étudiants en spécialisation IAMD (Intelligence Artificielle des Masses de Données) et ISS (Internet Systems and Security) de TELECOM Nancy. L'objectif de

cette UE est de sensibiliser les élèves aux différents indicateurs de performances d'un système informatique et des méthodes de base pour les évaluer. Dans ce sens, ce module d'enseignement élabore à la fois des méthodes mathématiques (analyse opérationnelle, chaînes de Markov, files d'attente) et des méthodes de simulation pour évaluer des indicateurs de performances (temps de réponse, débit, taux d'occupation, taux de pertes/retransmission, fiabilité, ...). Cette UE a été modifiée considérablement suite à mes investissements. Ce module d'enseignement nécessite néanmoins encore une innovation importante dans le contexte de l'industrie du futur. Plus précisément, il est important d'ajouter au contenu de ce module d'enseignement des méthodes de pronostic permettant de prédire l'évolution potentielle d'indicateurs de performances. Dans ce sens, mon projet d'enseignement porte sur l'amélioration de cette UE en s'appuyant sur les points suivants :

- Une révision complète du contenu actuel permettant de mieux se focaliser sur les points essentiels du module et de réduire le volume horaire en compactant le contenu actuel de façon efficace. Ceci doit permettre d'ajouter de nouvelles thématiques (pronostic de performance) à enseigner ;
- L'élaboration de cours magistraux (4h à 6h) sur des méthodes de pronostic notamment le pronostic guidé par des données (dans un contexte de données massives) et des travaux pratiques (6h de TP) sur la mise en pratique d'algorithmes de pronostic dans la prédiction de performance/défaillance. Ces TPs seront mis en place directement sur la plate-forme développée dans la section 6.7.2. Ceci permettra aux élèves non seulement de mieux maîtriser les algorithmes de pronostics utilisés mais aussi d'être confrontés aux difficultés dans la phase de mise en oeuvre de ces algorithmes sur des vrais équipements industriels (entité CPS ou assimilable).

#### **UE-Entreprise 4.0**

J'ai créé en collaboration avec mes collègues (Pr. Hervé Panetto, Dr. Mario Lezoche et Dr. Pascale Marangé) une nouvelle unité d'enseignement (UE) intitulée "Entreprise 4.0". Ceci est destiné aux étudiants en spécialisation SIE (systèmes d'information des entreprises) de TELECOM Nancy à partir de janvier 2019. L'objectif de cette UE est de donner aux étudiants les bases pour comprendre l'entreprise du futur (industrie 4.0) et les caractéristiques, les exigences ainsi que les outils numériques importants. Un regard particulier est donné aux systèmes Cyberphysiques, un pilier essentiel de la nouvelle révolution industrielle. Les technologies abordées dans cette UE doivent sensibiliser les étudiants à l'usine et l'entreprise numérique du futur. Dans ce sens, cette UE traite les points suivants :

- Introduction à l'entreprise 4.0

- Modèles/normes et exigences pour l'usine du futur
- Système Cyber-Physique (CPS) et Cobots
- Nouveaux réseaux (cloud et sécurité), blockchain
- Outils et modèles numériques (GAO, DAO, FAO, Digital Twin) pour l'entreprise 4.0

Par rapport au contenu existant, il est prévu d'ajouter une partie sur l'application de l'IA dans l'industrie du futur. Dans ce sens, mon projet d'enseignement dans cette UE porte sur l'élaboration de quelques cours (ex. 6h de cours magistraux) sur l'IA et ses applications dans l'industrie du futur et des expérimentations en de TP (6h) sur l'application de l'IA à la décision autonome (ex. décision autonome en maintenance) dans un contexte dynamique de l'industrie du futur. Ces TPs seront réalisés directement sur la plate-forme TELMA qui est détaillée dans la section 6.7.2.

### 6.7.2 Création de nouveaux travaux pratiques sur la plate-forme TELMA

Selon les résultats obtenus de l'action de recherche M2 (voir section 6.3.2), deux TPs seront développés. Ceux-ci sont destinés non seulement aux élèves de TELECOM Nancy mais aussi à certains étudiants du Master ISC (Ingénierie des Systèmes Complexe) de la Faculté des Sciences et Technologies de l'UL.

**TP sur l'implantation d'algorithme de pronostic :** Il a pour objectif d'implanter quelques algorithmes de pronostics notamment ceux de pronostic guidé par des données à des composants intelligents de type Raspberry Pi pour prédire l'état de santé de composants cibles (ex. moteurs) de la plate-forme.

Quelques points clés pour la mise en oeuvre de ce TP :

- Spécification de contraintes techniques (capacité de traitement, stockage, communication) des composants intelligents étudiés et d'indicateur de santé (dégradation) à prédire ;
- Choix d'algorithmes de pronostic adaptés ;
- Implantation des algorithmes de pronostic choisis aux composants intelligents cibles ;
- Test et analyse des résultats obtenus en utilisant quelques métriques de performances spécifiques (Horizon du pronostic, performance  $\alpha - \lambda$ , précision, exactitude).

En terme de volume horaire, trois séances de 2h sont prévues.

**TP autour de la décision autonome en maintenance par l'IA :** Il a pour objectif d'implanter quelques algorithmes d'apprentissage automatique pour la décision autonome en maintenance.

Quelques étapes principales pour la mise en oeuvre de ce TP :

- Spécification des scénarios d'apprentissage (état, fonction de récompenses, etc.) et de décision autonome (types d'actions de maintenance)
- Choix d'algorithme d'apprentissage (spécification de réseaux neurones à implanter) et d'optimisation par l'IA (ex. Q-learning) ;
- Implantation des algorithmes choisis ;
- Test et analyse des résultats obtenus sur la performance d'apprentissage et la décision autonome donnée par le système au fil du temps.

En terme de volume horaire, trois séances de 2h sont prévues.

De plus, il a été prévu également de transférer mes résultats de recherche à une autre plate-forme pédagogique intitulée "Entreprise 4.0". Ce projet a été déposé par Pr. Hervé Panetto en Avril 2019 dans le cadre de l'appel d'offres de la région Grand-Est.

# Annexe A

## Attestations de co-direction de thèses



**ATTESTATION**

Je soussigné, Khemais SAANOUNI, Directeur de l'Ecole Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur de l'Université de technologie de Troyes, atteste que **M. Phuc DO**, a dirigé les recherches des doctorants cités ci-après :

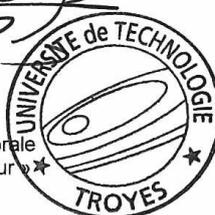
Thèses soutenues :

- **M. Hai Canh VU.**  
Date de début de thèse à l'UTT : 05/04/11  
Date de soutenance : 12/03/15  
Sujet : *Stratégie de regroupement pour la maintenance des systèmes à composants multiples avec structure complexe*  
Quotité d'encadrement : 50 % - Co-directeur : Anne BARROS.
- **M. Kim Anh NGUYEN.**  
Date de début de thèse à l'UTT : 01/10/11  
Date de soutenance : 16/10/15  
Sujet : *Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants avec structure complexe*  
Quotité d'encadrement : 50 % - Co-directeur : Antoine GRALL.

Fait à Troyes, le 5 avril 2018 2018,

Pour faire et valoir ce que de droit,

  
Khemais SAANOUNI  
Directeur de l'Ecole Doctorale  
« Sciences Pour l'Ingénieur »



15 mai 2014

Direction de la Recherche  
et de la Valorisation

Sous-Direction de  
l'Administration de la  
Recherche

91 avenue de la Libération  
BP 454  
54 001 NANCY Cedex

Personne chargée du  
dossier :  
Souad  
BOUTAGUERMOUCHET  
Ligne directe : 03  
54.50.41.02  
Souad.boutaguermouchet@  
univ-lorraine.fr

Monsieur,

J'ai l'honneur de vous faire connaître qu'après avis favorable de l'école doctoral IAEM, et du conseil scientifique réuni le 13 mai 2014, je vous autorise à codiriger la thèse de HOANG Anh.

Veillez agréer, Monsieur, l'expression de ma considération distinguée.

Le Président de l'université de  
Lorraine

~~Pour le Président et par délégation,  
La Vice-Présidente du CS~~

~~Pierre Mutzenhardt~~

Clotilde BOULANGER



Copies :

Benoît IUNG - CRAN  
IAEM  
Didier WOLF



**Direction de la Recherche  
et de la Valorisation**

Sous-Direction de  
l'Administration de la  
Recherche

91 avenue de la Libération  
BP 50454  
54 001 NANCY Cedex

Personne chargée du  
dossier :  
Souad  
BOUTAGUERMOUCHET  
Ligne directe :  
03.72.74.04.52  
Souad.boutaguermouchet  
@univ-lorraine.fr

Monsieur,

J'ai l'honneur de vous faire connaître qu'après avis favorable de l'école doctorale IAEM, et du conseil scientifique réuni le 6 avril 2017, je vous autorise à codiriger la thèse de NGUYEN Ho Si Hung.

Veuillez agréer, Monsieur, l'expression de ma considération distinguée.

Le Président, par délégation,  
le Vice-président du Conseil  
Scientifique de l'Université de Lorraine

Frédéric VILLIERAS

Copies :

IUNG Benoit – Directeur de thèse  
Ecole Doctorale - IAEM  
WOLF Didier – Directeur du laboratoire CRAN

de 03/04/2017

# Annexe B

## Deux dépôts de projets

### B.1 Projet DP1

**Project title :** Advanced prognostics models for a multi-component system with stochastic dependence and sensor data uncertainty

**Duration :** January 01, 2020 to December 31, 2021

**Call for projects :** Research Fund For International Young Scientists of NSFC (Natural Science Foundation of China), 2019

**Project members :** Phuc Do (projet leader, University of Lorraine) and 3 PhD students of prof. LiLi (Tongji University) : Junya Tang, Xiaoxiao Zhao & Yong Wang

**Abstract :** The global objective of this research proposal is to develop advanced prognostics models for predicting the remaining useful life (RUL) of a multi-component system with stochastic dependence and sensor data uncertainty. Stochastic dependence, which means that the degradation evolution of a component depends on both its degradation level and that of other components, can be found in a number of industrial systems, e.g., the state (quality) of oil may directly impact the degradation process of the crank and vice versa, wear on a pulley may impact the rate of wear of a belt and vice versa and likewise for chains and gears. Sensor data uncertainty indicates that measurement noises caused by sensors degradation. Both stochastic dependence and sensor data uncertainty may significantly influence the effectiveness of system health prognostics. Therefore, in presence of stochastic dependence and sensor data uncertainty, existing prognostics models may no longer be applicable. To support the global objective, the proposal is structured along three work packages : (i)-development of model-based prognostics algorithms using particle filters ; (ii)-development of a hybrid approach incorporating particle filters and data-driven based prognostic and (iii)-Implementation of the proposed prognostics

algorithms into smart-sensors.

## B.2 Projet DP2

**Project title :** Fundamental Theories and Critical Technologies for Intelligent Operation and Management of Integrated Circuit Front-end Fabrication

**Duration :** January 01, 2020 to December 31, 2023

**Call for projects :** NSFC Key project 2019

**Project members :** Four teams

1. Tongji University : Li Li (project leader), Xu Weisheng & Lin Guoyi
2. Zhejiang University : Ni Dong
3. University of lorraine : Benoit Iung & Phuc Do
4. SMIC Ningbo : Lin Guoyi & Li Bo

**Abstract :** The project conducts in-depth research on the new theories, new methods and application verification of intelligent operation and management in the integrated circuit front-end fabrication, based on the new generation of artificial intelligence technology of industrial big data and knowledge automation. The research contents include : (1) For product quality, it breaks through the bottleneck of qualitative and quantitative analysis of non-traditional industrial big data, and the industrial big data analysis methods based on deep learning are proposed to realize the quality management and yield improvement of wafer products.(2) In terms of equipment operation, to solve the missing label and uncertainty in the state data, unsupervised learning is used to detect abnormal conditions of equipment in time and a new predictive maintenance method driven by model and data is proposed to improve the reliability and capacity utilization of production equipment.(3) For operation management, a collaborative optimization scheduling framework driven by knowledge and data is constructed, and a flexible dynamic scheduling method is proposed, which can respond to actual working conditions, comprehensively consider equipment predictive maintenance, process constraints and various types of scheduling. The above research results are validated in SMIC (Ningbo) integrated circuit production line, which not only supports and guides the enterprise to apply new technology of artificial intelligence in the production of the core business, but also plays a role to demonstrate the application. It has an important significance in promoting the intelligent process of Chinese integrated circuit industry, as well as enhancing the international competitiveness of Chinese IC manufacturing industry.

# Bibliographie

- [1] ABIRI-JAHROMI, A., FOTUHI-FIRUZABAD, M., AND ABBASI, E. An efficient mixed-integer linear formulation for long-term overhead lines maintenance scheduling in power distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery* 24, 4 (2009), 2043–2053.
- [2] AGGOUNE, R. Minimizing the makespan for the flow shop scheduling problem with availability constraints. *European Journal of Operational Research* 115, 3 (2004), 534–543.
- [3] AGHAIE, M., NOROUZI, A., ZOLFAGHARI, A., MINUCHEHR, A., MOHAMADI FARD, Z., AND TUMARI, R. Advanced progressive real coded genetic algorithm for nuclear system availability optimization through preventive maintenance scheduling. *Annals of Nuclear Energy* 60 (2013), 64–72.
- [4] AHMAD, R., AND KAMARUDDIN, S. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering* 63, 1 (2012), 135–149.
- [5] AHMAD, R., AND KAMARUDDIN, S. A review of condition-based maintenance decision-making. *European Journal of Industrial Engineering* 6, 5 (2012), 519–541.
- [6] AL-THANI, N. A., AHMED, M. B., AND HAOUARI, M. A model and optimization-based heuristic for the operational aircraft maintenance routing problem. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 72 (2016), 29–44.
- [7] ALASWAD, S., AND XIANG, Y. A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system. *Reliability Engineering & System Safety* 157 (2017), 54–63.
- [8] ANDRIOTIS, C., AND PAPAKONSTANTINOY, K. Managing engineering systems with large state and action spaces through deep reinforcement learning. *Reliability Engineering & System Safety* (2019).
- [9] ANWAR, A.-M., NIBONG, T., WAEL, S., AND MOKHZAINI, A. Prospective of energy efficiency practice , indicator and power supplies efficiency. *Morden Applied Science* 3, 5.

- [10] ASSAF, R., DO, P., SCARF, P., AND NEFTI-MEZIANI, S. Wear rate-state interactions within a multi-component system : a study of a gearbox accelerated life testing platform. *Journal of risk and reliability* Accepted in February 2018..
- [11] AYO-IMORU, R., AND CILLIERS, A. A survey of the state of condition-based maintenance (cbm) in the nuclear power industry. *Annals of Nuclear Energy* 112 (2018), 177–188.
- [12] BANJEVIC, D., AND JARDINE, A. Calculation of reliability function and remaining useful life for a markov failure time process. *IMA Journal of Management Mathematics* 17, 2 (2006), 115.
- [13] BANJEVIC, D., JARDINE, A., MAKIS, V., AND ENNIS, M. A control-limit policy and software for condition-based maintenance optimization. *INFOR* 39, 1 (2001), 32–50.
- [14] BARBERA, F., SCHNEIDER, H., AND KELLE, P. A condition based maintenance model with exponential failures and fixed inspection intervals. *Journal of the Operational research Society* 47, 8 (1996), 1037–1045.
- [15] BARLOW, R., AND PROSCHAN, F. *Mathematical theory of reliability*, vol. 17. Siam, 1996.
- [16] BARONE, G., AND FRANGOPOL, D. Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost. *Structural Safety* 48 (2014), 40–50.
- [17] BEBBINGTON, M., LAI, C., AND ZITIKIS, R. Reduction in mean residual life in the presence of a constant competing risk. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 24, 1 (2008), 51–63.
- [18] BERRICHI, A., YALAOUI, F., AMODEO, L., AND MEZGHICHE, M. Bi-objective ant colony optimization approach to optimize production and maintenance scheduling. *Computers & Operations Research* 37, 9 (2010), 1584–1596.
- [19] BERTOLDI, P., REZESSY, S., AND OIKONOMOU, V. Rewarding energy savings rather than energy efficiency : Exploring the concept of a feed-in tariff for energy savings. *Energy Policy* 56 (2013), 526–535.
- [20] BIAN, L., AND GEBRAEEL, N. Stochastic framework for partially degradation systems with continuous component degradation-rate-interactions. *Naval Research Logistics* 61 (2014), 286–303.
- [21] BIAN, L., AND GEBRAEEL, N. Stochastic modeling and real-time prognostics for multi-component systems with degradation rate interactions. *IIE Transactions* 46 (2014), 470–482.

- 
- [22] BORGONOVO, E. Differential importance and comparative statics : An application to inventory management. *International Journal of Production Economics* 111, 1 (2008), 170–179.
- [23] BOUVARD, K., ARTUS, S., BÉRENGUER, C., AND COCQUEMPOT, V. Condition-based dynamic maintenance operations planning & grouping. application to commercial heavy vehicles. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 6 (2011), 601–610.
- [24] BURKE, E., AND SMITH, A. Hybrid evolutionary techniques for the maintenance scheduling problem. *IEEE Transactions on Power Systems* 15, 1 (2000), 122–128.
- [25] BYINGTON, C., ROEMER, M., AND GALIE, T. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance. In *Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE* (2002), pp. 2815–2824.
- [26] BYINGTON, C. S., ROEMER, M. J., AND GALIE, T. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance [military aircraft]. In *Proceedings, IEEE aerospace conference* (2002), vol. 6, IEEE, pp. 6–6.
- [27] CADINI, F., ZIO, E., AND AVRAM, D. Model-based monte carlo state estimation for condition-based component replacement. *Reliability Engineering & System Safety* 94, 3 (2009), 752–758.
- [28] CAMCI, F. System maintenance scheduling with prognostics information using genetic algorithm. *IEEE Transactions on Reliability* 58, 3 (2009), 539–552.
- [29] CAMCI, F. Maintenance scheduling of geographically distributed assets with prognostics information. *European Journal of Operational Research* 245, 2 (2015), 506–516.
- [30] CARR, M., AND WANG, W. An approximate algorithm for prognostic modelling using condition monitoring information. *European Journal of Operational Research* 211, 1 (2011), 90–96.
- [31] CASTANIER, B. *Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, France, 2001.
- [32] CASTANIER, B., BÉRENGUER, C., AND GRALL, A. A sequential condition-based repair/replacement policy with non-periodic inspections for a system subject to continuous wear. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 19, 4 (2003), 327–347.
- [33] CASTANIER, B., GRALL, A., AND BÉRENGUER, C. A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system. *Reliability Engineering & System Safety* 87, 1 (2005), 109–120.

- [34] CASTRO, I. T. A model of imperfect preventive maintenance with dependent failure modes. *European Journal of Operational Research* 196, 1 (2009), 217 – 224.
- [35] CERTA, A., GALANTE, G., LUPO, T., AND PASSANNANTI, G. Determination of pareto frontier in multi-objective maintenance optimization. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 7 (2011), 861–867.
- [36] CHERKAOUI, H., HUYNH, K., AND GRALL, A. Quantitative assessments of performance and robustness of maintenance policies for stochastically deteriorating production systems. *International Journal of Production Research* 56, 3 (2018), 1089–1108.
- [37] CHO, D.-I., AND PARLAR, M. A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research* 51, 1 (1991), 1–23.
- [38] CHOO, B. Y., ADAMS, S., AND BELING, P. Health-aware hierarchical control for smart manufacturing using reinforcement learning. In *2017 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)* (2017), IEEE, pp. 40–47.
- [39] CHUNG, C., AND FLYNN, J. Optimal replacement policies for k-out-of-n systems. *IEEE Transactions on Reliability* 38, 4 (1989), 462–467.
- [40] CHUNG, S., CHAN, F., AND CHAN, H. A modified genetic algorithm approach for scheduling of perfect maintenance in distributed production scheduling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22, 7 (2009), 1005–1014.
- [41] CUI, L., XIE, M., AND LOH, H.-T. Inspection schemes for general systems. *IIE Transactions* 39, 9 (2004), 817–825.
- [42] DARABNIA, B., AND DEMICHELA, M. Maintenance an opportunity for energy saving. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS* 32 (2013), 259–264.
- [43] DEKKER, R. Integrating optimisation, priority setting, planning and combining of maintenance activities. *European Journal of Operational Research* 82 (1995).
- [44] DEKKER, R., AND SMEITINK, E. Preventive maintenance at opportunities with restricted duration. *Serie Research Memoranda* (1991).
- [45] DEKKER, R., WILDEMAN, L., AND VAN DER DUYN SCHOUTEN, F. A review of multi-component maintenance models with economic dependence. *Mathematical Methods of Operations Research* 45, 3 (1997), 441–435.
- [46] DEKKER, R., WILDEMAN, R. E., AND VAN DER DUYN SCHOUTEN, F. A. A review of multi-component maintenance models with economic dependence. *Mathematical Methods of Operations Research* 45, 3 (1997), 411–435.

- 
- [47] DELOUX, E. *Politiques de maintenance conditionnelle pour un system à dégradation continue soumis à un environnement stressant*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, France, 2008.
- [48] DELOUX, E. *Politiques de maintenance conditionnelle pour un systeme à dégradation continue soumis à un environnement stressant*. PhD thesis, Université de Nantes, France, 2008.
- [49] DELOUX, E., CASTANIER, B., AND BÉRENGUER, C. Maintenance policy for a deteriorating system evolving in a stressful environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability* 222, 4 (2008), 613–622.
- [50] DESFORGES, X., DIÉVART, M., CHARBONNAUD, P., AND ARCHIMÈDE, B. A distributed architecture to implement a prognostic function for complex systems.
- [51] DÍAZ-RAMÍREZ, J., HUERTAS, J. I., AND TRIGOS, F. Aircraft maintenance, routing, and crew scheduling planning for airlines with a single fleet and a single maintenance and crew base. *Computers & Industrial Engineering* 75 (2014), 68–78.
- [52] DJURDJANOVIC, D., LEE, J., AND NI, J. Watchdog agent-an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction. *Advanced Engineering Informatics* 17, 3 (2003), 109–125.
- [53] DO, P., BARROS, A., BÉRENGUER, C. BOUVARD, K., AND BRISSAUD, F. Dynamic grouping maintenance with time limited opportunities. *Reliability Engineering & System Safety* 120 (2013), 51–59.
- [54] DO, P., VOISIN, A., LEVRAT, E., AND IUNG, B. Remaining useful life based maintenance decision making for deteriorating systems with both perfect and imperfect maintenance actions. In *IEEE Prognostics and Health Management, June 24-27, Washinton, USA* (2013), IEEE.
- [55] DO, P., VU, C., BARROS, A., AND BÉRENGUER, C. Grouping maintenance strategy with availability constraint under limited repairmen. In *8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes* (2012), vol. 8, pp. 486–491.
- [56] DO, P., VU, H.-C., BARROS, A., AND BERENQUER, C. Maintenance grouping for multi-component systems with availability constraints and limited maintenance teams. *Reliability Engineering and System Safety* 142 (2015), 56–67.
- [57] DO VAN, P. *Contribution au développement et à l'étude de facteurs d'importance fiabilistes pour les systèmes markoviens*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, 2008.

- [58] DO VAN, P., BARROS, A., AND BERENQUER, C. Importance measure on finite time horizon and application to markovian multi-state production systems. *Journal of Risk and Reliability* 222 (2008), 449–461.
- [59] DO VAN, P., BARROS, A., BERENQUER, C., BOUVARD, K., AND BRISSAUD, F. Dynamic grouping maintenance strategy with time limited opportunities. *Reliability Engineering and System Safety* 120 (2013), 51–59.
- [60] DO VAN, P., AND BERENQUER, C. Condition based maintenance model for a production deteriorating system. In *Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol'10), 6-8 September 2010, Nice, France* (2010).
- [61] DO VAN, P., AND BERENQUER, C. Condition-based maintenance with imperfect preventive repairs for a deteriorating production system. *Reliability and Quality Engineering International* 28, 9 (2012), 624–633r.
- [62] DO VAN, P., LEVRAT, E., VOISIN, A., AND IUNG, B. Remaining useful life (rul) based maintenance decision making for deteriorating systems. In *2nd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology, A-Mest'12* (2012).
- [63] DOOSTPARAST, M., KOLAHAN, F., AND DOOSTPARAST, M. A reliability-based approach to optimize preventive maintenance scheduling for coherent systems. *Reliability Engineering & System Safety* 126 (2014), 98–106.
- [64] DRAGOMIR, O. E., GOURTVEAU, R., ZERHOUNI, N., AND DRAGOMIR, F. Framework for a distributed and hybrid prognostic system. *IFAC Proceedings Volumes* 40, 18 (2007), 431–436.
- [65] EGAN, G., DILLON, T., AND MORSZTYN, K. An experimental method of determination of optimal maintenance schedules in power systems using the branch-and-bound technique. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 8 (1976), 538–547.
- [66] ELWANY, A. H., GEBRAEEL, N. Z., AND MAILLART, L. M. Structured replacement policies for components with complex degradation processes and dedicated sensors. *Operations research* 59, 3 (2011), 684–695.
- [67] ERKKI, J., , GIOVANNI, D. O., AND FELIX, L. A framework for maintenance 4.0. In *Proceedings of the 10th International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability (MIMAR 2018)* (2018), IMA - Institute of Mathematics and its Applications, pp. 13–15.
- [68] FERREIRA, R., BARROSO, L., FEINSTEIN, C., AND BORGES, C. A non-linear programming approach to maintenance budgeting for multi-component systems. In *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE* (July 2013), pp. 1–5.

- 
- [69] FOOTE, B. On the implementation of a control-based forecasting system for aircraft spare parts procurement. *IIE transactions* 27, 2 (1995), 210–216.
- [70] FOULADIRAD, M., AND GRALL, A. Condition-based maintenance for a system subject to a non-homogeneous wear process with a wear rate transition. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 6 (2011), 611–618.
- [71] FOULADIRAD, M., GRALL, A., AND DIEULLE, L. On the use of on-line detection for maintenance of gradually deteriorating systems. *Reliability Engineering & System Safety* 93, 12 (2008), 1814–1820.
- [72] FROGER, A., GENDREAU, M., MENDOZA, J. E., PINSON, É., AND ROUSSEAU, L.-M. Maintenance scheduling in the electricity industry : A literature review. *European Journal of Operational Research* 251, 3 (2016), 695–706.
- [73] GEBRAEEL, N., LAWLEY, M., LI, R., AND RYAN, J. Residual-life distributions from components degradation signals : A bayesian approach. *IIE Transactions* 37 (2005), 543–557.
- [74] GEBRAEEL, N. Z., LAWLEY, M. A., LI, R., AND RYAN, J. K. Residual-life distributions from component degradation signals : A bayesian approach. *IIE Transactions* 37, 6 (2005), 543–557.
- [75] GHASEMI, A., YACOUT, S., AND OUALI, M. Optimal condition based maintenance with imperfect information and the proportional hazards model. *International journal of production research* 45, 4 (2007), 989–1012.
- [76] GHASEMI, A., YAHCOU, S., AND OUALI, M. Parameter estimation methods for condition-based maintenance with indirect observations. *IEEE Transactions On Reliability* 59 (2010), 426–439.
- [77] GHOBBAR, A. A., AND FRIEND, C. H. Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation : a predictive model. *Computers & Operations Research* 30, 14 (2003), 2097–2114.
- [78] GOEBEL, K., SAHA, B., AND SAXENA, A. A comparison of three data-driven techniques for prognostics. In *62nd meeting of the society for machinery failure prevention technology (mfpt)* (2008), pp. 119–131.
- [79] GOEL, A., AND MEISEL, F. Workforce routing and scheduling for electricity network maintenance with downtime minimization. *European Journal of Operational Research* 231, 1 (2013), 210–228.
- [80] GOLMAKANI, H. R., AND MOAKEDI, H. Periodic inspection optimization model for a two-component repairable system with failure interaction. *Computers and Industrial Engineering* 63, 3 (2012), 540–545.

- [81] GOPALAKRISHNAN, M., MOHAN, S., AND HE, Z. A tabu search heuristic for preventive maintenance scheduling. *Computers & industrial engineering* 40, 1 (2001), 149–160.
- [82] GORJIAN, N., MA, L., MITTINTY, M., YARLAGADDA, P., AND SUN, Y. A review on degradation models in reliability analysis. In *Engineering Asset Lifecycle Management*. Springer, 2010, pp. 369–384.
- [83] GRALL, A. *Modélisation stochastique pour la maintenance conditionnelle : impact du mode de surveillance*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne, France, 2003.
- [84] GRALL, A., BÉRENGUER, C., AND DIEULLE, L. A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems. *Reliability Engineering & System Safety* 76, 2 (2002), 167–180.
- [85] GRALL, A., DIEULLE, L., BÉRENGUER, C., AND ROUSSIGNOL, M. Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system. *IEEE Transactions On Reliability* 51 (2002), 141–150.
- [86] GUSTAVSSON, E., PATRIKSSON, M., STRÖMBERG, A., WOJCIECHOWSKI, A., AND ÖNNHEIM, M. Preventive maintenance scheduling of multi-component systems with interval costs. *Computers & Industrial Engineering* (2014).
- [87] HOANG, A. *Pronostic de la performance d’Efficacité Energétique pour la prise de décision en maintenance dans les systèmes industriels*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2017.
- [88] HONG, H., ZHOU, W., ZHANG, S., AND YE, W. Optimal condition-based maintenance decisions for systems with dependent stochastic degradation of components. *Reliability Engineering & System Safety* 121 (2014), 276–288.
- [89] HONG, J. Joint reliability importance of k-out-of-n systems. *European Journal of Operational Research* 142 (2002), 539–547.
- [90] HUYNH, K. T. *Quantification de l’apport de l’information de surveillance dans la prise de décision en maintenance*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, France, 2011.
- [91] HUYNH, K. T., BARROS, A., AND BERENGUER, C. Multi-level decision-making for the predictive maintenance of  $k$ -out-of- $n$  : F deteriorating systems. *EEE Transactions on Reliability* 64, 1 (2015), 94–117.
- [92] HUYNH, K. T., TORRES CASTRO, I., BARROS, A., AND BÉRENGUER, C. On the use of mean residual life as a condition index for condition-based maintenance decision-making. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Systems’14* (2014), 877–893.

- 
- [93] IGHRAVWE, D., AND OKE, S. A non-zero integer non-linear programming model for maintenance workforce sizing. *International Journal of Production Economics* 150, 0 (2014), 204–214.
- [94] IRAWAN, C. A., OUELHADJ, D., JONES, D., STÅLHANE, M., AND SPERSTAD, I. B. Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms. *European Journal of Operational Research* 256, 1 (2017), 76–89.
- [95] IUNG, B., NEUNREUTHER, E., AND MOREL, G. Engineering process of integrated–distributed shop floor architecture based on interoperable field components. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 14, 3 (2001), 246–262.
- [96] JARDINE, A., LIN, D., AND BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing* 20, 7 (2006), 1483–1510.
- [97] JAYABALAN, V., AND CHAUDHURI, D. An heuristic approach for finite time maintenance policy. *International journal of production economics* 27, 3 (1992), 251–256.
- [98] JIANG, L., DJURDJANOVIC, D., NI, J., AND LEE, J. Sensor degradation detection in linear systems. In *Engineering Asset Management*. Springer, 2006, pp. 1252–1260.
- [99] KAABI, J., AND HARRATH, Y. A survey of parallel machine scheduling under availability constraints. *International Journal of Computer and Information Technology* 3, 2 (2014), 238–245.
- [100] KAGERMANN, H., LUKAS, W.-D., AND WAHLSTER, W. Industrie 4.0 : Mit dem internet der dinge auf dem weg zur 4. industriellen revolution. *VDI nachrichten* 13, 11 (2011).
- [101] KAISER, K. A., AND GEBRAEEL, N. Z. Predictive maintenance management using sensor-based degradation models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A : Systems and Humans* 39, 4 (2009), 840–849.
- [102] KANS, M., GALAR, D., AND THADURI, A. Maintenance 4.0 in railway transportation industry. In *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)* (2016), Springer, pp. 317–331.
- [103] KARIM, R., WESTERBERG, J., GALAR, D., AND KUMAR, U. Maintenance analytics—the new know in maintenance. *IFAC-PapersOnLine* 49, 28 (2016), 214–219.
- [104] KEIZER, M. C. O., FLAPPER, S. D. P., AND TEUNTER, R. H. Condition-based maintenance policies for systems with multiple dependent components : A review. *European Journal of Operational Research* 261, 1 (2017), 405–420.

- [105] KHOSHAFIAN, S., AND ROSTETTER, C. Digital prescriptive maintenance. *Internet of Things, Process of Everything, BPM Everywhere* (2015), 1–20.
- [106] KIJIMA, M., MORIMURA, H., AND SUZUKI, Y. Periodical replacement problem without assuming minimal repair. *European Journal of Operational Research* 37, 2 (1988), 194–203.
- [107] KNOWLES, M., BAGLEE, D., AND WERMTER, S. Reinforcement learning for scheduling of maintenance. In *International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence* (2010), Springer, pp. 409–422.
- [108] KOTHAMASU, R., HUANG, S., AND VERDUIN, W. System health monitoring and prognostics - a review of current paradigms and practices. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 28, 9 (2006), 1012–1024.
- [109] KUO, W., AND ZHU, X. *Importance Measures in Reliability, Risk, and Optimization : Principles and Applications*. John Wiley and Sons, 2012– 384 pages.
- [110] LABEAU, P.-E., AND SEGOVIA, M.-C. Effective age models for imperfect maintenance. *Journal of Risk and Reliability* 225 (2010), 117–130.
- [111] LAPA, C., PEREIRA, C., AND DE BARROS, M. A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability. *Reliability Engineering & System Safety* 91, 2 (2006), 233–240.
- [112] LEBOLD, M., AND THURSTON, M. Open standards for condition-based maintenance and prognostic systems. In *Maintenance and Reliability Conference (MARCON)* (2001), vol. 200, May.
- [113] LEE, E. A. Cyber physical systems : Design challenges. In *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)* (2008), IEEE, pp. 363–369.
- [114] LEE, J., BAGHERI, B., AND KAO, H.-A. Recent advances and trends of cyber-physical systems and big data analytics in industrial informatics. In *International proceeding of int conference on industrial informatics (INDIN)* (2014), pp. 1–6.
- [115] LEE, J., BAGHERI, B., AND KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters* 3 (2015), 18–23.
- [116] LEE, J., HOLGADO, M., KAO, H.-A., AND MACCHI, M. New thinking paradigm for maintenance innovation design. *IFAC Proceedings Volumes* 47, 3 (2014), 7104–7109.
- [117] LEE, J., KAO, H.-A., AND YANG, S. Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia Cirp* 16 (2014), 3–8.

- 
- [118] LEVITIN, G., AND LISNIANSKI, A. Optimization of imperfect preventive maintenance for multi-state systems. *Reliability Engineering and System Safety* 67 (2000), 193–203.
- [119] LEVRAT, E., THOMAS, E., AND IUNG, B. Odds-based decision-making tool for opportunistic production-maintenance synchronization. *International Journal of Production Research* 46 (2008), 5263–5287.
- [120] LI, X., DING, Q., AND SUN, J.-Q. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks. *Reliability Engineering & System Safety* 172 (2018), 1–11.
- [121] LIAO, L., AND KÖTTIG, F. Review of hybrid prognostics approaches for remaining useful life prediction of engineered systems, and an application to battery life prediction. *IEEE Transactions on Reliability* 63, 1 (2014), 191–207.
- [122] LIE, C. H., AND CHUN, Y. An algorithm for preventive maintenance policy. *IEEE Transactions On Reliability* 35, 1 (1986), 71 – 75.
- [123] LIE, D. Fuzzy job shop scheduling problem with availability constraints. *Computers and Industrial Engineering* 58, 4 (2010), 610–617.
- [124] LIN, D., BANJEVIC, D., AND JARDINE, A. Using principal components in a proportional hazards model with applications in condition-based maintenance. *Journal of the Operational Research Society* 57, 8 (2005), 910–919.
- [125] LIU, Y., AND HUANG, H. Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance. *IEEE Transactions On Reliability* 59, 2 (2010), 356 – 367.
- [126] LÓPEZ-SANTANA, E., AKHAVAN-TABATABAEI, R., DIEULLE, L., LABADIE, N., AND MEDAGLIA, A. L. On the combined maintenance and routing optimization problem. *Reliability Engineering & System Safety* 145 (2016), 199–214.
- [127] MARSEGUERRA, M., AND ZIO, E. Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and monte carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety* 68, 1 (2000), 69–83.
- [128] MARSEGUERRA, M., ZIO, E., AND PODOFILLINI, L. Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and monte carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety* 77, 2 (2002), 151–165.
- [129] MARSEGUERRA, M., ZIO, E., AND PODOFILLINI, L. Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and monte carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety* 77, 2 (2002), 151–165.

- [130] MARSEGUERRA, M., ZIO, E., AND PODOFILLINI, L. Multiobjective spare part allocation by means of genetic algorithms and monte carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety* 87, 3 (2005), 325–335.
- [131] MARTINOD, R. M., BISTORIN, O., CASTAÑEDA, L. F., AND REZG, N. Maintenance policy optimisation for multi-component systems considering degradation of components and imperfect maintenance actions. *Computers & Industrial Engineering* 124 (2018), 100–112.
- [132] MATT, D. T., RAUCH, E., AND DALLASEGA, P. Trends towards distributed manufacturing systems and modern forms for their design. *Procedia CIRP* 33 (2015), 185–190.
- [133] MATTILA, V., AND VIRTANEN, K. Scheduling fighter aircraft maintenance with reinforcement learning. In *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)* (2011), IEEE, pp. 2535–2546.
- [134] MEDJAHER, K., SKIMA, H., AND ZERHOUNI, N. Condition assessment and fault prognostics of microelectromechanical systems. *Microelectronics Reliability* 54, 1 (2014), 143–151.
- [135] MEIER-HIRMER, C., RIBOULET, G., SOURGET, F., AND ROUSSIGNOL, M. Maintenance optimisation for a system with a gamma deterioration process and intervention delay : application to track maintenance. *Journal of Risk and Reliability* 223 (2008), 189–198.
- [136] MERAGHNI, S., TERRISSA, L. S., AYAD, S., ZERHOUNI, N., AND VARNIER, C. Post-prognostics decision in cyber-physical systems. In *2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC\_ASET)* (2018), IEEE, pp. 201–205.
- [137] METTAS, A. Reliability allocation and optimization for complex systems. In *IEEE Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium* (2000), pp. 216 – 221.
- [138] MIZUTANI, S., NAKAGAWA, T., AND CHEN, M. Extended maintenance and inspection models for a parallel system. In *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2009*. (2009), IEEE, pp. 248–251.
- [139] MOGHADDAM, K., AND USHER, J. Preventive maintenance and replacement scheduling for repairable and maintainable systems using dynamic programming. *Computers & Industrial Engineering* 60, 4 (2011), 654–665.
- [140] MONOSTORI, L. Cyber-physical production systems : Roots, expectations and r&d challenges. *Procedia Cirp* 17 (2014), 9–13.

- 
- [141] MURPHY, K., CARTER, C., AND MALERICH, A. Reliability analysis of phased-mission systems : a correct approach. In *Reliability and Maintainability Symposium, 2007.* (2007), IEEE, pp. 7–12.
- [142] NAKAGAWA, T. Optimal number of units for a parallel system. *Journal of Applied probability* (1984), 431–436.
- [143] NAKAGAWA, T., AND YASUI, K. optimal policies for a system with imperfect maintenance. *IEEE Transactions On Reliability R-36*, 5 (1987), 631–633.
- [144] NAVARRO, J., AND RYCHLIK, T. Comparisons and bounds for expected lifetimes of reliability systems. *European Journal of Operational Research* 207, 1 (2010), 309–317.
- [145] NF-EN-13306-X-60-319. Terminologie de la maintenance. *Norme AFNOR* (2001).
- [146] NGUYEN, K.-A. *Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants avec structure complexe.* PhD thesis, Université de technologie de Troyes, 2015.
- [147] NGUYEN, K.-A., DO, P., AND GRALL, A. Multi-level predictive maintenance for multi-component systems. *Reliability Engineering and System Safety* 44 (2015), 83–94.
- [148] NGUYEN, K. T., AND MEDJAHER, K. A new dynamic predictive maintenance framework using deep learning for failure prognostics. *Reliability Engineering & System Safety* (2019).
- [149] NGUYEN, T., CASTANIER, B., AND YEUNG, T. Maintaining a system subject to uncertain technological evolution. *Reliability Engineering & System Safety* (2014).
- [150] NGUYEN, T. T. A multi-objective deep reinforcement learning framework. *arXiv preprint arXiv :1803.02965* (2018).
- [151] NICOLAI, R., AND DEKKER, R. Optimal maintenance of multi-component systems : a review. *Complex System Maintenance Handbook, London : Springer* (2008), 263–286.
- [152] NICOLAI, R. P. *Maintenance models for systems subject to measurable deterioration.* PhD thesis, Erasmus Universiteit, Rotterdam, Netherlands, 2008.
- [153] NOURELFATH, M., AND AIT-KADI, D. Optimization of series-parallel multi-state systems under maintenance policies. *Reliability Engineering and System Safety* 92, 12 (2007), 1620–1626.
- [154] NYCE, C., AND CPCU, A. Predictive analytics white paper. *American Institute for CPCU. Insurance Institute of America* (2007), 9–10.

- [155] O.E., D., GOURIVEAU, R., DRAGOMIR, F., MINCA, E., AND ZERHOUNI, N. Review of prognostic problem in condition-based maintenance. *European Control Conference* (2009).
- [156] OLDE KEIZER, M., TEUNTER, R. H., AND VELDMAN, J. Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components. *European Journal of Operational Research* 257, 1 (2017), 209–222.
- [157] PAPAKONSTANTINOY, K. G., AND SHINOZUKA, M. Planning structural inspection and maintenance policies via dynamic programming and markov processes. part ii : Pomdp implementation. *Reliability Engineering & System Safety* 130 (2014), 214–224.
- [158] PARK, M., AND PHAM, H. A generalized block replacement policy for a k-out-of-n system with respect to threshold number of failed components and risk costs. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans* 42, 2 (2012), 453–463.
- [159] PASCUAL, R., MERUANE, V., AND REY, P. On the effect of downtime costs and budget constraint on preventive and replacement policies. *Reliability Engineering & System Safety* 93, 1 (2008), 144–151.
- [160] PENG, Y., DONG, M., AND ZUO, M. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance : a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 50, 1–4 (2010), 1–17.
- [161] PENG, Y., DONG, M., AND ZUO, M. J. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance : a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 50, 1-4 (2010), 297–313.
- [162] PHAM, H., AND WANG, H. Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research* 94 (1996), 425–438.
- [163] PHAN, D. T., AND ZHU, Y. Multi-stage optimization for periodic inspection planning of geo-distributed infrastructure systems. *European Journal of Operational Research* 245, 3 (2015), 797–804.
- [164] POPOVA, E., AND WILSON, J. Group replacement policies for parallel systems whose components have phase distributed failure times. *Annals of operations research* 91 (1999), 163–198.
- [165] PRAJAPATI, A., BECHTEL, J., AND GANESAN, S. Condition based maintenance : a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 18, 4 (2012), 384–400.
- [166] QI, X. A note on worst-case performance of heuristics for maintenance scheduling problems. *Discrete Applied Mathematics* 155, 3 (2007), 416–422.

- 
- [167] RADOUANE, L., ALAA, C., AND DJAMIL, A. Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units. *Computers and Chemical Engineering* 9, 9 (2009), 1499–1510.
- [168] RASMEKOMEN, N., AND PARLIKAD, A. Condition-based maintenance of multi-component systems with degradation state-rate interactions. *Reliability Engineering and System Safety* 148 (2016), 1–10.
- [169] RASMEKOMEN, N., AND PARLIKAD, A. K. Optimising maintenance of multi-component systems with degradation interactions. In *Proceedings of the 19th IFAC World Congress, 2014* (2014), pp. 7098–7103.
- [170] RAUSAND, M., AND HØYLAND, A. *System reliability theory : models, statistical methods, and applications*, vol. 396. Wiley-Interscience, 2003.
- [171] RAUSAND, M., AND HÅYLAND, A. *System Reliability Theory : Models, Statistical Methods and Applications*, second ed. John Wiley & Sons, 2004.
- [172] REGNIER, E., SHARP, G., AND TOVEY, C. Replacement under ongoing technological progress. *IIE Transactions* 36, 6 (2004), 497–508.
- [173] REIHANI, E., SARIKHANI, A., DAVODI, M., AND DAVODI, M. Reliability based generator maintenance scheduling using hybrid evolutionary approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 42, 1 (2012), 434–439.
- [174] ROCCHETTA, R., BELLANI, L., COMPARE, M., ZIO, E., AND PATELLI, E. A reinforcement learning framework for optimal operation and maintenance of power grids. *Applied Energy* 241 (2019), 291–301.
- [175] SAHA, B., SAHA, S., AND GOEBEL, K. A distributed prognostic health management architecture. *Proceedings of MFPT 2009* (2009).
- [176] SAHRAOUI, Y., KHELIF, R., AND CHATEAUNEUF, A. Maintenance planning under imperfect inspections of corroded pipelines. *International journal of pressure vessels and piping* 104 (2013), 76–82.
- [177] SAMROUT, M., YALAOUI, F., CHATELET, E., AND CHEBBO, N. New methods to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems using ant colony optimization. *Reliability Engineering & System Safety* 89, 3 (2005), 346–354.
- [178] SARAIVA, J., PEREIRA, M., MENDES, V., AND SOUSA, J. A simulated annealing based approach to solve the generator maintenance scheduling problem. *Electric Power Systems Research* 81, 7 (2011), 1283–1291.
- [179] SCARF, P., AND DEARA, M. Block replacement policies for a two-component system with failure dependence. *Naval Research Logistics* 50 (2003), 70–87.

- [180] SELVIK, J., AND AVEN, T. A framework for reliability and risk centered maintenance. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 2 (2011), 324–331.
- [181] SHAFIEE, M., AND SØRENSEN, J. D. Maintenance optimization and inspection planning of wind energy assets : Models, methods and strategies. *Reliability Engineering & System Safety* (2017).
- [182] SHAHRAKI, A. F., YADAV, O. P., AND LIAO, H. A review on degradation modelling and its engineering applications. *International Journal of Performability Engineering* 13, 3 (2017), 299.
- [183] SHETTY, B., SEKHON, G., CHAWLA, O., AND KURIEN, K. Optimization of maintenance facility for a repairable system subject to availability constraint. *Microelectronics Reliability* 28, 6 (1988), 893–896.
- [184] SHI, H., AND ZENG, J. Real-time prediction of remaining useful life and preventive opportunistic maintenance strategy for multi-component systems considering stochastic dependence. *Computers & Industrial Engineering* 93 (2016), 192–204.
- [185] SI, X., HU, C., WANG, W., AND CHEN, M.-Y. An adaptive and nonlinear drift-based wiener process for remaining useful life estimation.
- [186] SI, X., LI, T., ZHANG, Q., AND HU, X. An optimal condition-based replacement method for systems with observed degradation signals. *IEEE Transactions on Reliability* 67, 3 (2018), 1281–1293.
- [187] SI, X., WANG, W., , HU, C., ZHOU, D.-H., AND PECHT, M.-G. Remaining useful life estimation based on a nonlinear diffusion degradation processn. *IEEE Transactions on reliability* 6 (2012), 50–67.
- [188] SI, X.-S., WANG, W., HU, C.-H., AND ZHOU, D.-H. Remaining useful life estimation—a review on the statistical data driven approaches. *European journal of operational research* 213, 1 (2011), 1–14.
- [189] SIKORSKAA, J., HODKIEWICZ, M., AND MA, L. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. *Mechanical Systems and Signal Processing* 25, 5 (2011), 1803–1836.
- [190] SILVER, D., HUANG, A., MADDISON, C. J., GUEZ, A., SIFRE, L., VAN DEN DRIESCHE, G., SCHRITTWIESER, J., ANTONOGLU, I., PANNEERSHELVAM, V., LANCTOT, M., ET AL. Mastering the game of go with deep neural networks and tree search. *nature* 529, 7587 (2016), 484.
- [191] SILVER, D., SCHRITTWIESER, J., SIMONYAN, K., ANTONOGLU, I., HUANG, A., GUEZ, A., HUBERT, T., BAKER, L., LAI, M., BOLTON, A., ET AL. Mastering the game of go without human knowledge. *Nature* 550, 7676 (2017), 354.

- 
- [192] SINGPURWALLA, N. Survival in dynamic environments. *Statistical Science* 10, 1 (1995), 86–103.
- [193] SIPSAS, K., ALEXOPOULOS, K., XANTHAKIS, V., AND CHRYSOLOURIS, G. Collaborative maintenance in flow-line manufacturing environments : An industry 4.0 approach. *Procedia Cirp* 55 (2016), 236–241.
- [194] SRISKANDARAJAH, C., JARDINE, A., AND CHAN, C. Maintenance scheduling of rolling stock using a genetic algorithm. *Journal of the Operational Research Society* (1998), 1130–1145.
- [195] STOCK, T., AND SELIGER, G. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia Cirp* 40 (2016), 536–541.
- [196] THOMAS, E. *Contribution à la prise de décision dynamique en maintenance prévisionnelle par formalisation d'un principe d'opportunité*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I, France, 2009.
- [197] THOMAS, L. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems. *Reliability Engineering* 16, 4 (1986), 297–309.
- [198] TIAN, Z., AND LIAO, H. Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 5 (2011), 581–589.
- [199] TIAN, Z., ZHANG, Y., AND CHENG, J. Condition based maintenance optimization for multi-component systems. In *In Proceedings of Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society* (2011).
- [200] TSAI, Y., WANG, K., AND TSAI, L. A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety* 84, 3 (2004), 261–270.
- [201] TURING, A., FEIGENBAUM, E., AND FELDMAN, J. Computers and thought. *Computing Machinery and Intelligence*, EA 6 (1963).
- [202] UHLMANN, E., LAGHMOUCHI, A., GEISERT, C., AND HOHWIELER, E. Decentralized data analytics for maintenance in industrie 4.0. *Procedia Manufacturing* 11 (2017), 1120–1126.
- [203] VAIDYA, P., AND RAUSAND, M. Remaining useful life, technical health, and life extension. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability* 225, 2 (2011), 219–231.
- [204] VAN NOORTWIJK, J. A survey of the application of Gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009), 2–21.

- [205] VAN NOORTWIJK, J. M. A survey of the application of gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering & System Safety* 94, 1 (2009), 2–21.
- [206] VINSON, G., RIBOT, P., AND COMBACAU, M. A generic ageing model for prognosis-application to permanent magnet synchronous machines. In *Second European Conference of the Prognostics and Health Management Society (PHM 2014)* (2014).
- [207] VU, H.-C. *Stratégies de regroupement pour la maintenance des systèmes à composants multiples avec structure complexe*. PhD thesis, Université de technologie de Troyes, 2015.
- [208] VU, H.-C., DO, P., BARROS, A., AND BERENQUER, C. Maintenance planning and dynamic grouping for multi-component systems with positive and negative economic dependencies. *IMA Journal of Management Mathematics* 23 (2015), 145–170.
- [209] WALSH, B., BALDWIN, G., AND FARRELL, R. Physical component performance degradation detection based on error probability analysis. In *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* (2007). doi :10.1109/PIMRC.2007.4394524.
- [210] WANG, D., MORTON, D., MASEK, J., WU, A., NAGOL, J., XIONG, X., LEVY, R., VERMOTE, E., AND WOLFE, R. Impact of sensor degradation on the modis ndvi time series. *Remote Sensing of Environment* 119 (2012), 55–61.
- [211] WANG, F., RAMAMRITHAM, K., AND STANKOVIC, J. Determining redundancy levels for fault tolerant real-time systems. *IEEE Transactions on Computers* 44, 2 (1995), 292–301.
- [212] WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European journal of operational research* 139, 3 (2002), 469–489.
- [213] WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European journal of operational research* 139, 3 (2002), 469–489.
- [214] WANG, H., AND PHAM, H. Availability and maintenance of series systems subject to imperfect repair and correlated failure and repair. *European Journal of Operational Research* 174, 3 (2006), 1706–1722.
- [215] WANG, K. Intelligent predictive maintenance (ipdm) system–industry 4.0 scenario. *WIT Transactions on Engineering Sciences* 113 (2016), 259–268.
- [216] WANG, L., CHU, J., AND MAO, W. A condition-based order-replacement policy for a single-unit system. *Applied mathematical modelling* 32, 11 (2008), 2274–2289.
- [217] WANG, L., CHU, J., AND MAO, W. A condition-based replacement and spare provisioning policy for deteriorating systems with uncertain deterioration to failure. *European Journal of Operational Research* 194, 1 (2009), 184–205.

- 
- [218] WANG, W. A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the delay-time concept. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 11 (2011), 1535–1541.
- [219] WANG, W. Overview of a semi-stochastic filtering approach for residual life estimation with applications in condition based maintenance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability* 225, 2 (2011), 185–197.
- [220] WANG, W., AND CHRISTER, A. Towards a general condition based maintenance model for a stochastic dynamic system. *Journal of the Operational Research Society* 51, 2 (2000), 145–155.
- [221] WANG, W., AND KOREN, Y. Scalability planning for reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 31, 2 (2012), 83–91.
- [222] WANG, W., AND ZHANG, W. A model to predict the residual life of aircraft engines based upon oil analysis data. *Naval Research Logistics (NRL)* 52, 3 (2005), 276–284.
- [223] WILDEMAN, R. *The art of grouping maintenance*. PhD thesis, Erasmus University Rotterdam, Netherlands, 1996.
- [224] WILDEMAN, R., AND DEKKER, R. Dynamic influences in multi-component maintenance. *Quality and reliability engineering international* (1997), 199–207.
- [225] WILDEMAN, R., DEKKER, R., AND SMIT, A. A dynamic policy for grouping maintenance activities. *European Journal of Operational Research* 99, 3 (1997), 530–551.
- [226] WILDEMAN, R., DEKKER, R., AND SMIT, A. A dynamic policy for grouping maintenance activities. *European Journal of Operational Research* 99 (1997), 530–551.
- [227] WU, S., CHEN, Y., WU, Q., AND WANG, Z. Linking component importance to optimisation of preventive maintenance policy. *Reliability Engineering and System Safety* 146 (2016), 26–32.
- [228] WU, S., AND ZUO, J. M. Linear and nonlinear preventive maintenance models. *IEEE Transactions On Reliability* 59, 1 (2010), 242–249.
- [229] WU, X., AND RYAN, S. M. Optimal replacement in the proportional hazards model with semi-markovian covariate process and continuous monitoring. *IEEE Transactions on Reliability* (2011). 10.1109/TR.2011.2161049.
- [230] XIA, T., DONG, Y., XIAO, L., DU, S., PAN, E., AND XI, L. Recent advances in prognostics and health management for advanced manufacturing paradigms. *Reliability Engineering & System Safety* 178 (2018), 255–268.

- [231] XU, W., AND CAO, L. Energy efficiency analysis of machine tools with periodic maintenance. *International Journal of Production Research* 52, 18 (2014), 5273–5285.
- [232] YANG, S. A condition-based failure-prediction and processing-scheme for preventive maintenance. *IEEE Transactions on Reliability* 52, 3 (2003), 373–383.
- [233] YANG, Y., AND KLUTKE, G.-A. A distribution-free lower bound for availability of quantile-based inspection schemes. *IEEE Transactions On Reliability* 50 (2001), 419–421.
- [234] YASUI, K., NAKAGAWA, T., AND OSAKI, S. A summary of optimum replacement policies for a parallel redundant system. *Microelectronics Reliability* 28, 4 (1988), 635–641.
- [235] YE, Z.-S., WANG, Y., TSUI, K.-L., AND PECHT, M. Degradation data analysis using wiener processes with measurement errors. *IEEE Transactions on Reliability* 62, 4 (2013), 772–780.
- [236] YOUNES, M., KHALIL, A., AND HASSAN, D. Improving reliability by modifying system configuration. In *2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability (ICQR)* (Sept 2011), pp. 450–454.
- [237] YUN, W. Y., MOON, I., AND KIM, G. Simulation-based maintenance support system for multi-functional complex systems. *Production Planning & Control* 19, 4 (2008), 365–378.
- [238] ZHANG, N., FOULADIRAD, M., AND BARROS, A. Warranty analysis of a two-component system with type i stochastic dependence. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability* (2017).
- [239] ZHANG, Z., SI, X., HU, C., AND LEI, Y. Degradation data analysis and remaining useful life estimation : A review on wiener-process-based methods. *European Journal of Operational Research* (2018).
- [240] ZHOU, W., HONG, H., AND ZHANG, S. Impact of dependent stochastic defect growth on system reliability of corroding pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 96 (2012), 68–77.

## Résumé

Ce mémoire présente mes activités de recherche et d'enseignement au laboratoire CRAN et à TELECOM Nancy entre 2011 et 2019. Celles-ci s'inscrivent globalement dans la thématique de modèles d'aide à la décision en maintenance et en sûreté pour des systèmes à dépendances multiples. Elles se structurent principalement autour de trois axes de contributions : (i)-modélisation de dégradation avec multiples facteurs d'influence ; (ii)-développement d'indicateurs d'aide à la décision en maintenance et (iii)-élaboration de stratégies de maintenance prévisionnelle et regroupement dynamique d'actions de maintenance. Mon projet de recherche proposé s'inscrit dans la continuité de mes activités de recherche précédentes mais avec une évolution importante au regard de l'objet de recherche adressé (systèmes de production cyberphysiques-CPPS) dans le contexte de l'industrie du futur. Dans ce sens, mon projet de recherche est structuré sur deux axes de recherche : (i)-modèles de pronostic de défaillance avec dépendances multiples et (ii)-vers un système autonome de planification de maintenance. Trois actions concrètes sont prévues principalement autour de la modélisation de dégradation et du pronostic de composants/systèmes CPPS sur le premier axe. Pour le deuxième axe, deux pistes de recherche sont prévues, l'une portant plutôt sur la construction de modèles d'aide à la décision autonome en maintenance alors que l'autre a pour objet de développer une plate-forme expérimentale pour la validation des modèles/approches proposés. Mon projet d'enseignement porte sur le transfert de mes résultats de recherche dans les enseignements existants à TELECOM Nancy et à la Faculté des Sciences et Technologies.

**Mots-clés:** Fiabilité, maintenance, pronostic, dépendance, industrie du future.

## Abstract

This document presents my teaching and research activities within the laboratory CRAN and the TELECOM Nancy between 2011 and 2019. These activities concerns the decision support models for maintenance optimization of multi-component systems with dependencies. They are mainly structured along three axes of contribution : (i)-degradation modelling avec different influencing factors ; (ii)-development of decision indicators for maintenance optimization et (iii)-construction of predictive maintenance strategies and dynamic grouping. My research project is a continuation of my archived research activities with an important evolution regarding the research object addressed (cyber physical production systems-CPPS) in the context of factory of future. In this way, my research project focuses on two original research directions : (i)-advanced prognostic models with consideration of multi dependencies and (ii)- towards an autonomous system for maintenance planning. In the first direction, three concrete research actions along the degradation modelling and prognostic for CPPS component/system are planned. For the second research direction, two research avenues are planned, one focusing on the construction of an autonomous system for maintenance planning, while the other aiming at developing an experimental platform for the validation of the proposed models/approaches. My teaching project focuses on the transfer of my research results in existing courses at TELECOM Nancy and at the Faculty of Sciences and Technologies.

**Keywords:** Reliability, maintenance, prognostic, dependence, factory of future.



