

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	11
<b>Chapitre 1. PHM et maintenance prédictive</b> . . . . .	15
1.1. Maintenance anticipatrice et pronostic . . . . .	15
1.1.1. Nouveaux enjeux et évolution de la fonction maintenance . . . . .	15
1.1.1.1. La maintenance industrielle . . . . .	15
1.1.1.2. Enjeux et prérogatives de la fonction maintenance . . . . .	15
1.1.1.3. Evolution de la fonction maintenance . . . . .	16
1.1.2. Vers une anticipation des phénomènes de défaillances . . . . .	17
1.1.2.1. Cartographie des formes de maintenance . . . . .	17
1.1.2.2. Maintenances corrective et préventive . . . . .	17
1.1.2.3. Maintenances conditionnelle et prévisionnelle/prédictive . . . . .	18
1.2. Pronostic et estimation de la durée de vie résiduelle (RUL) . . . . .	19
1.2.1. Quoi ? Le pronostic – Définition, mesures . . . . .	19
1.2.1.1. Les mesures de pronostic . . . . .	20
1.2.1.2. Les mesures de performance du système de pronostic . . . . .	20
1.2.2. Comment ? Les approches de pronostic . . . . .	21
1.2.2.1. Une taxonomie des approches de pronostic . . . . .	21
1.2.2.2. Synthèse et remarques . . . . .	23
1.3. Des données aux décisions : le processus PHM . . . . .	24
1.3.1. Détection, diagnostic et pronostic . . . . .	24
1.3.2. Architecture CBM et processus PHM . . . . .	26
1.3.2.1. Architecture CBM . . . . .	26
1.3.2.2. Et le PHM ? . . . . .	27
1.4. Portée de l’ouvrage . . . . .	28

<b>Chapitre 2. Acquisition : du système aux données</b> . . . . .	<b>29</b>
2.1. Motivation et objet . . . . .	29
2.2. Composants critiques et grandeurs physiques . . . . .	30
2.2.1. Choix des composants critiques : démarche générale . . . . .	30
2.2.2. Analyse SdF du système et outils associés . . . . .	31
2.2.2.1. Retour d'expérience . . . . .	32
2.2.2.2. AMDEC . . . . .	33
2.2.2.3. Arbre de défaillances . . . . .	33
2.2.3. Grandeurs physiques à surveiller . . . . .	34
2.3. Acquisition et stockage de données . . . . .	34
2.3.1. Choix des capteurs . . . . .	35
2.3.1.1. Types de capteurs . . . . .	36
2.3.1.2. Critères de choix . . . . .	36
2.3.2. Acquisition des données . . . . .	37
2.3.2.1. Acquisition . . . . .	37
2.3.2.2. Echantillonnage . . . . .	38
2.3.3. Prétraitement et stockage des données . . . . .	39
2.4. Cas d'étude : vers le PHM de roulements . . . . .	39
2.4.1. Du système « train » au composant critique « roulement » . . . . .	39
2.4.2. La plateforme expérimentale Pronostia . . . . .	41
2.4.2.1. Critères de choix . . . . .	41
2.4.2.2. Principe de fonctionnement . . . . .	42
2.4.2.3. Expérimentations réalisées . . . . .	44
2.4.3. Exemples de signaux obtenus . . . . .	45
2.5. Synthèse partielle . . . . .	47
 <b>Chapitre 3. Traitement : des données aux indicateurs de santé</b> . . . . .	 <b>49</b>
3.1. Motivation et objet . . . . .	49
3.1.1. Extraction de caractéristiques/descripteurs . . . . .	49
3.1.2. Réduction/sélection de caractéristiques/descripteurs . . . . .	50
3.1.3. Construction d'indicateurs de santé . . . . .	51
3.2. Extraction de caractéristiques . . . . .	51
3.2.1. Cartographie des approches . . . . .	51
3.2.1.1. Analyse temporelle . . . . .	51
3.2.1.2. Analyse fréquentielle . . . . .	52
3.2.1.3. Analyse temps-fréquence . . . . .	52
3.2.2. Caractéristiques temporelles et fréquentielles . . . . .	53
3.2.2.1. Descripteurs temporels . . . . .	53
3.2.2.2. Descripteurs fréquentiels . . . . .	53
3.2.3. Caractéristiques temps-fréquence . . . . .	54
3.2.3.1. Transformée de Fourier à court terme . . . . .	54
3.2.3.2. Décomposition en paquets d'ondelettes . . . . .	56

3.2.3.3. Décomposition modale empirique . . . . .	58
3.2.3.4. Transformée de Hilbert-Huang . . . . .	62
3.3. Réduction/sélection de caractéristiques . . . . .	65
3.3.1. Réduction de l'espace des caractéristiques . . . . .	65
3.3.1.1. Analyse en composantes principales (ACP) . . . . .	68
3.3.1.2. Analyse en composantes principales à noyau . . . . .	69
3.3.1.3. Isomap – <i>Isometric Feature Mapping</i> . . . . .	72
3.3.2. Sélection de caractéristiques . . . . .	74
3.3.2.1. Vers des descripteurs prédictibles . . . . .	74
3.3.2.2. Sélection de caractéristiques par la prédictibilité . . . . .	76
3.3.2.3. Application et discussion . . . . .	76
3.4. Construction d'indicateurs de santé . . . . .	81
3.4.1. Une approche basée sur la transformée de Hilbert-Huang . . . . .	81
3.4.2. Description de la démarche et éléments d'illustration . . . . .	82
3.5. Synthèse partielle . . . . .	84

## **Chapitre 4. Surveillance d'état, pronostic et durée de vie résiduelle : partie A**

<b>de vie résiduelle : partie A</b> . . . . .	<b>87</b>
4.1. Motivation et objet . . . . .	87
4.1.1. Prédiction des descripteurs . . . . .	87
4.1.2. Classification des états . . . . .	88
4.2. Prédiction des descripteurs par réseaux connexionistes . . . . .	89
4.2.1. Systèmes connexionistes prédictifs à long terme . . . . .	89
4.2.1.1. Approximation et apprentissage – Formalisation . . . . .	89
4.2.1.2. Adaptation à la prédiction long terme . . . . .	90
4.2.1.3. Taxonomie de prédicteurs long terme . . . . .	91
4.2.1.4. Applications et discussion : tests sur la compétition NN3 . . . . .	92
4.2.1.5. Applications et discussion : tests sur l'application Turbofan . . . . .	94
4.2.2. Prédiction par réseaux de neurones « rapides » . . . . .	96
4.2.2.1. Vers une combinaison des réseaux à ondelettes et de l'ELM . . . . .	97
4.2.2.2. SW-ELM : <i>Summation Wavelet-Extreme Learning Machine</i> . . . . .	98
4.2.2.3. Analyse des performances du SW-ELM . . . . .	101
4.2.3. Applications à des problématiques de PHM et discussion . . . . .	103
4.2.3.1. Données et méthodologie de tests . . . . .	103
4.2.3.2. Robustesse, fiabilité et applicabilité . . . . .	104
4.2.3.3. Ensemble SW-ELM, fiabilité et pronostic . . . . .	106
4.3. Classification d'états et estimation du RUL . . . . .	107
4.3.1. Estimation d'états sans <i>a priori</i> sur les données . . . . .	107
4.3.1.1. Principe et problèmes sous-jacents . . . . .	109
4.3.1.2. Taxonomie de classificateurs et applicabilité au PHM . . . . .	110
4.3.1.3. Problèmes inhérents aux classificateurs non supervisés . . . . .	112

4.3.2. Vers des performances accrues : l'algorithme S-MEFC . . . . .	113
4.3.2.1. Principe : fusion de deux algorithmes de <i>clustering</i> . . . . .	113
4.3.2.2. Formalisation de l'algorithme S-MEFC . . . . .	114
4.3.3. Procédure de seuillage dynamique . . . . .	115
4.3.3.1. Pronostic sans <i>a priori</i> sur les seuils, synoptique d'ensemble . . . . .	115
4.3.3.2. Phase hors ligne : apprentissage des prédicteurs et classificateurs . . . . .	116
4.3.3.3. Phase en ligne : prédictions et estimations d'états . . . . .	117
4.4. Application et discussion . . . . .	117
4.4.1. Données et protocole de tests . . . . .	117
4.4.1.1. Données de tests : le PHM challenge 2008 . . . . .	117
4.4.1.2. Objet des tests et critères d'évaluation . . . . .	118
4.4.2. Illustration de la procédure de seuillage dynamique . . . . .	119
4.4.3. Performances de l'approche . . . . .	120
4.5. Synthèse partielle . . . . .	123

## Chapitre 5. Surveillance d'état, pronostic et durée de vie résiduelle : partie B . . . . .

125

5.1. Motivation et objet . . . . .	125
5.1.1. Estimation de l'état de santé . . . . .	126
5.1.2. Prédiction du comportement . . . . .	126
5.2. Modélisation et estimation de l'état de santé . . . . .	127
5.2.1. Fondements : les chaînes de Markov cachées (HMM) . . . . .	127
5.2.1.1. Chaînes de Markov – Formalisation et usage . . . . .	127
5.2.1.2. Chaînes de Markov cachées – Formalisation et apprentissage . . . . .	129
5.2.2. Extension : HMM à mélange de gaussiennes . . . . .	133
5.2.3. Estimation d'états par réseaux bayésiens dynamiques . . . . .	135
5.2.3.1. Réseaux bayésiens dynamiques . . . . .	135
5.2.3.2. Représentation des HMM et des MoG-HMM par des RBD . . . . .	137
5.2.3.3. Choix des paramètres des modèles MoG-HMM et RBD . . . . .	139
5.3. Prédiction du comportement et estimation du RUL . . . . .	140
5.3.1. Démarche : pronostic par utilisation des RBD . . . . .	140
5.3.2. Apprentissage des séquences d'états . . . . .	142
5.3.3. Prédiction d'états et estimation du RUL . . . . .	144
5.4. Application et discussion . . . . .	146
5.4.1. Données et protocole de tests . . . . .	146
5.4.2. Identification des modèles d'états . . . . .	147

5.4.3. Estimations et prédictions du RUL . . . . .	151
5.5. Synthèse partielle . . . . .	152
<b>Conclusion et perspectives . . . . .</b>	<b>155</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>163</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>183</b>