

Table des matières

Introduction	11
Chapitre 1. PHM et maintenance prédictive	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

Chapitre 2. Acquisition : du système aux données	29
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
Chapitre 3. Traitement : des données aux indicateurs de santé	49
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

de vie résiduelle : partie A	87
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

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
Conclusion et perspectives	155
Bibliographie	163
Index	183