

Table des matières

Liste des symboles	XV
Préface	XVII
Avant-propos	XIX
Chapitre 1. Introduction	1
1.1. De la notion de causalité	1
1.2. Du diagnostic	2
1.3. Des concepts et de la terminologie	6
1.4. De la classification des méthodes de diagnostic	10
1.4.1. Les méthodes internes de diagnostic	14
1.4.2. Les méthodes externes de diagnostic	15
Reconnaissance des formes - Réseaux de neurones artificiels - Systèmes experts	
1.4.3. Les méthodes inductives et déductives	21
1.5. Des méthodes de prétraitement des données	21
1.6. Du bon usage de la théorie de la décision	23
1.7. De la difficulté du diagnostic industriel	25
Chapitre 2. Concepts et terminologie	27
2.1. Introduction	27
2.2. Systèmes et composants	28
2.2.1. Définitions	28
2.2.2. Nature des systèmes et composants	29
2.3. Concepts de base en sûreté de fonctionnement	30
2.3.1. Notion de risques	30
2.3.2. Sûreté de Fonctionnement	30
2.3.3. Fiabilité	31
2.3.4. Disponibilité	32
2.3.5. Maintenance	32
Maintenance préventive - Maintenance préventive systématique - Maintenance préventive conditionnelle - Maintenance prévisionnelle - Maintenance corrective - Maintenance palliative - Maintenance curative	
2.3.6. Tâches de maintenance	35
Contrôle - Surveillance en service - Inspection - Essais en exploitation - Visite - Révision - Modification	
2.3.7. Classification par niveaux de maintenance	36

VI Diagnostic des défaillances

1er Niveau – 2e Niveau – 3e Niveau – 4e Niveau – 5e Niveau	
2.3.8. Maintenabilité	37
2.3.9. Sécurité	38
2.4. Défaillances	39
2.4.1. Définition du dispositif	40
2.4.2. Définition de la défaillance	40
2.4.3. Définition de la défaillance potentielle	43
2.4.4. Définition d'une dégradation	44
2.4.5. Cause de défaillance	44
2.4.6. Mode de défaillance	45
2.4.7. Mécanisme de défaillance	45
2.5. Classification des défaillances en fonction des causes	45
2.5.1. Défaillance due à un mauvais emploi	45
2.5.2. Défaillance due à une faiblesse inhérente	45
2.5.3. Défaillance première	46
2.5.4. Défaillance seconde	46
2.6. Classification des défaillances en fonction du degré	46
2.6.1. Défaillance partielle	46
2.6.2. Défaillance complète	46
2.6.3. Défaillance intermittente	46
2.7. Classification des défaillances en fonction de la vitesse d'apparition	47
2.7.1. Défaillance soudaine	47
2.7.2. Défaillance progressive	47
2.8. Classification des défaillances en fonction de la vitesse d'apparition et du degré	47
2.8.1. Défaillance catalectique	47
2.8.2. Défaillance par dégradation	47
2.9. Classification des défaillances en fonction de la date d'apparition	47
2.9.1. Taux de défaillance	47
2.9.2. Taux de remise en service	49
Période de défaillance précoce – Période de défaillance à taux constant – Période de défaillance d'usure	
2.10. Classification des défaillances par rapport aux conséquences	50
2.10.1. Défaillance mineure	50
2.10.2. Défaillance majeure	51
2.10.3. Défaillance critique	51
2.10.4. Défaillance catastrophique	51
2.11. Défauts et pannes : définitions et classification	51
2.11.1. Panne intermittente	52
2.11.2. Panne fugitive	52
2.11.3. Panne permanente	52
2.11.4. Panne latente ou cachée	52
2.11.5. Notion de défaut	52
2.12. Conclusion	53

VI Diagnostic des défaillances

1er Niveau – 2e Niveau – 3e Niveau – 4e Niveau – 5e Niveau	
2.3.8. Maintenabilité	37
2.3.9. Sécurité	38
2.4. Défaillances	39
2.4.1. Définition du dispositif	40
2.4.2. Définition de la défaillance	40
2.4.3. Définition de la défaillance potentielle	43
2.4.4. Définition d'une dégradation	44
2.4.5. Cause de défaillance	44
2.4.6. Mode de défaillance	45
2.4.7. Mécanisme de défaillance	45
2.5. Classification des défaillances en fonction des causes	45
2.5.1. Défaillance due à un mauvais emploi	45
2.5.2. Défaillance due à une faiblesse inhérente	45
2.5.3. Défaillance première	46
2.5.4. Défaillance seconde	46
2.6. Classification des défaillances en fonction du degré	46
2.6.1. Défaillance partielle	46
2.6.2. Défaillance complète	46
2.6.3. Défaillance intermittente	46
2.7. Classification des défaillances en fonction de la vitesse d'apparition	47
2.7.1. Défaillance soudaine	47
2.7.2. Défaillance progressive	47
2.8. Classification des défaillances en fonction de la vitesse d'apparition et du degré	47
2.8.1. Défaillance catalectique	47
2.8.2. Défaillance par dégradation	47
2.9. Classification des défaillances en fonction de la date d'apparition	47
2.9.1. Taux de défaillance	47
2.9.2. Taux de remise en service	49
Période de défaillance précoce – Période de défaillance à taux constant – Période de défaillance d'usure	
2.10. Classification des défaillances par rapport aux conséquences	50
2.10.1. Défaillance mineure	50
2.10.2. Défaillance majeure	51
2.10.3. Défaillance critique	51
2.10.4. Défaillance catastrophique	51
2.11. Défauts et pannes : définitions et classification	51
2.11.1. Panne intermittente	52
2.11.2. Panne fugitive	52
2.11.3. Panne permanente	52
2.11.4. Panne latente ou cachée	52
2.11.5. Notion de défaut	52
2.12. Conclusion	53

VIII Diagnostic des défaillances

Les méthodes de diagnostic par estimation du vecteur d'état – Les méthodes de diagnostic par modélisation des signatures	
3.6.4. Méthodes de diagnostic par analyse des signatures externes	104
Introduction aux méthodes de diagnostic externe – Méthodes de reconnaissance des formes – Le diagnostic externe avec les réseaux de neurones – Diagnostic et systèmes experts	
3.7. Conclusions	131
Chapitre 4. Décision en diagnostic	133
4.1. Introduction aux tests statistiques de décision	134
4.2. Tests statistiques de Bayes	135
4.2.1. Test binaire	136
4.2.2. Test à hypothèses multiples	146
4.3. Test du Minimax	151
4.4. Test de Neyman-Pearson	154
4.5. Tests composites	155
4.7. Conclusion	161
Chapitre 5. Prétraitement des données par traitement du signal	163
5.1. Exemple introductif	164
5.2. Classification des signaux	169
5.2.1. Signaux déterministes	169
5.2.2. Signaux aléatoires	173
5.3. Énergie et puissance des signaux	174
5.3.1. Signal $x(t)$	174
5.3.2. Signaux $x(t)$ et $y(t)$	176
5.3.3. Notion de rapport signal sur bruit	177
5.4. Convolution et corrélation	178
5.4.1. Convolution	178
5.4.2. Corrélation	178
Définition pour les signaux à énergie finie – Définition pour les signaux à énergie infinie – Propriétés des fonctions de corrélation – Relation entre corrélation et convolution	
5.5. Modélisation de signaux déterministes	181
5.5.1. Série de Fourier	181
Série de Fourier complexe – Série de Fourier en sinus et cosinus – Série de Fourier en cosinus avec déphasage – Propriétés générales des séries de Fourier – Notion de spectre – Corrélation de signaux périodiques	
5.5.2. Transformation de Fourier	186
Introduction – Transformée de Fourier au sens des fonctions – Transformée de Fourier généralisée – Propriétés – Transformées des principaux signaux	
5.5.3. Densités spectrales des signaux déterministes	196
Signaux à énergie finie – Signaux à énergie infinie – Signaux périodiques – Résumé du calcul des densités spectrales	
5.5.4. Transformées de Laplace et transformées en z	202
La transformée de Laplace unilatérale – La transformée en z	
5.5.5. Transformation de Hilbert et signal analytique	211

Généralités et définitions – Propriétés – Signal analytique – Détection d'enveloppe	
5.6. Les signaux aléatoires	215
5.6.1. Notion de fonction aléatoire	216
5.6.2. Caractérisation des fonctions aléatoires	217
Statistiques d'ordre 1 – Statistiques d'ordre 2 – Statistiques d'ordre supérieur – Stationnarité – Notion d'ergodicité	
5.6.3. Fonctions de corrélation de processus aléatoires	222
Autocorrélation – Propriétés des fonctions d'autocorrélation – Intercorrélation – Propriétés des fonctions d'intercorrélation	
5.6.4. Analyse spectrale de fonctions aléatoires stationnaires	225
5.6.5. Les principales fonctions aléatoires	227
Fonctions aléatoires gaussiennes – Couple de deux variables aléatoires gaussiennes – Les principaux bruits	
5.7. Les systèmes linéaires	233
5.7.1. Introduction	233
5.7.2. Propriétés des systèmes linéaires	233
Linéarité – Invariance dans le temps – Réponse fréquentielle – Modèles mathématiques des systèmes linéaires – Système physiquement réalisable – Système stable	
5.7.3. Réponses des systèmes linéaires à des entrées déterministes	236
Entrées périodiques – Entrées quelconques	
5.7.4. Réponses des systèmes linéaires à des entrées aléatoires	238
Relations entrées-sorties – Caractéristiques statistiques du signal de sortie – Densité spectrale du signal de sortie – Fonction de cohérence	
5.8. Le filtrage	241
5.8.1. Le filtrage analogique et le filtrage numérique	241
5.8.2. Le filtrage analogique	241
Caractéristiques d'un filtre analogique – Réponse fréquentielle – Notions de gabarit d'un filtre – Les principaux filtres passe-bas normalisés – Filtres passe-haut, passe-bande et coupe-bande – Exemples de filtrage d'un signal aléatoire	
5.8.3. Le filtrage numérique	252
Généralités sur le filtrage numérique – Propriétés des filtres numériques – Les filtres numériques RII et RIF – Fonction de transfert en z d'un filtre numérique – Simulation de filtres analogiques	
5.9. Calculs pratiques des caractéristiques des signaux	258
5.9.1. Introduction	258
5.9.2. Transformées de Fourier Discrète et Rapide	258
Transformée de Fourier Discrète (TFD) – La Transformée de Fourier Rapide (TFR)	
5.9.3. Notions d'estimateur	261
Description d'un estimateur – Propriétés d'un estimateur	
5.9.4. Calcul des caractéristiques spectrales des signaux	267
Signaux déterministes – Signaux aléatoires	
5.9.5. Les erreurs de quantification et d'arrondi	284
Les bruits de quantification – Erreurs numériques en filtrage numérique	
5.10. Méthodes spécifiques de traitement du signal	289

X Diagnostic des défaillances

5.10.1. Introduction	289
Analyse synchrone – Analyse cepstrale – Analyse d'enveloppe d'un signal – Représentation Cascade – Facteur de crête – Facteur Kurtosis	
5.11. Modèles régressifs	303
5.11.1. Modèles régressifs de signaux aléatoires stationnaires	303
Modèle général régressif d'un signal iidéatoire – Modèle autorégressif (AR) – Modèle à moyenne mobile (MA) – Modèle autorégressif à moyenne mobile (ARMA)	
5.11.2. Étude de la modélisation AR d'un signal aléatoire	305
Calcul de la densité spectrale avec modèle AR – Identification des paramètres du modèle AR – Exemple d'application – Estimation spectrale avec la modé- lisation AR – Conclusions sur les modèles autorégressifs	
5.12. Modèles de Prony et de Pisarenko	309
5.12.1. Le modèle de Prony	310
5.12.2. Le modèle de Pisarenko	310
5.13. Etudes des signaux non stationnaires	311
5.13.1. Représentation des signaux non stationnaires	311
Les structures fréquentielles – Les structures temporelles – Les structures conjointes – Les structures d'échelle	
5.14. Conclusions et recommandations	320
Chapitre 6. Diagnostic externe par les techniques de reconnaissance des formes	323
6.1. Principe	323
6.1.1. Phase d'analyse	326
6.1.2. Phase de choix d'un système de détection	328
6.1.3. Phase d'exploitation	328
6.2. Discrimination paramétrique avec rejet	328
6.2.1. Rejet d'ambiguïté	330
6.2.2. Rejet de distance	338
6.2.3. Application au diagnostic	340
6.2.4. Mise en place et caractérisation du discriminateur	341
6.3. Discrimination non paramétrique	342
6.3.1. Principe de l'estimation d'une loi de probabilité	343
6.3.2. Règle des k plus proches voisins	345
6.3.3. Règles des kPPV avec rejet	347
Rejet d'ambiguïté – Rejet de distance	
6.3.4. Amélioration de la recherche des kPPV	349
6.3.5. Conclusion	350
6.4. Un exemple de mise en place de diagnostic par reconnaissance des formes	350
6.4.1. Description de la méthode	351
Caractérisation de l'ensemble d'apprentissage – Décision – Actualisation de la connaissance	
6.4.2. Exemple	356
6.5. Conclusion	363

Chapitre 7. Diagnostic par réseaux de neurones	365
Présentation générale	365
7.1. Les fondements biologiques	366
7.2. Historique	368
7.3. Description	370
7.3.1. Description des réseaux de neurones artificiels	374
Nature des cellules élémentaires – L'architecture et nombre d'automates du réseau – Les mécanismes d'apprentissage et de reconnaissance – Les mécanismes de classification – Les mémoires associatives	
7.3.2. Avantages des réseaux de neurones artificiels	381
7.4. Les grandes familles de réseaux de neurones à apprentissage	383
7.4.1. Le Perceptron	383
Structure du Perceptron – Apprentissage du Perceptron	
7.4.2. L'Adaline et le Madaline	387
Structure de l'Adaline et du Madaline – Apprentissage de l'Adaline	
7.4.3. Propriétés des classificateurs à deux classes	389
Principe d'un classifieur à deux classes – Apprentissage d'un classifieur	
7.4.4. Conclusions sur les classificateurs linéaires avec apprentissage supervisé	399
7.4.5. Les réseaux de neurones à couches	400
Architecture des réseaux à couches – Apprentissage avec l'algorithme de rétropropagation du gradient – Propriétés de l'algorithme de rétropropagation du gradient – Conclusions sur l'algorithme de rétropropagation du gradient – Exemple d'application en contrôle non destructif – L'associateur linéaire – La mémoire associative bidirectionnelle – Réseaux de neurones avec rejet	
7.5. Réseaux à apprentissage non supervisé	420
7.5.1. Généralités sur l'apprentissage non supervisé	420
7.5.2. Le réseau de Hopfield	420
7.5.3. Les réseaux à recuit simulé	423
Introduction au recuit simulé – Réseaux bouclés avec recuit simulé – Principe de la machine de Boltzman	
7.5.4. Les cartes topologiques de Kohonen	426
7.5.5. Les Réseaux ART 1 et ART 2	430
7.6. Conclusions sur les applications des réseaux de neurones artificiels en diagnostic industriel	432
Chapitre 8. Diagnostic par systèmes experts	435
8.1. Historique	435
8.2. Définition des systèmes experts	436
8.3. L'expert	436
8.4. Domaines d'application	437
8.5. Résultats attendus d'un système expert	437
8.5.1. Diffusion d'un savoir	438
8.5.2. Assistance de l'expert	438
8.5.3. Formation, enseignement	438
8.5.4. Recueil, conservation, sauvegarde de connaissances	438
8.6. Les intervenants	439
8.7. Les éléments constituant un système expert	439

XII Diagnostic des défaillances

8.7.1. Modélisation de connaissances	439
8.7.2. Mise sous forme codée de la connaissance de l'expert	440
Elaboration d'un modèle des connaissances de l'expert – Choix de formalismes adaptés à la traduction informatique du modèle – Implantation de l'ensemble de la connaissance modélisée à travers les formalismes	
8.7.3. Les grandes catégories de connaissances	441
Description structurée du domaine – Expression d'un raisonnement – Mise en œuvre d'un raisonnement	
8.7.4. Quelques éléments spécifiques	443
Prise en compte de ses limites par un système expert – Non monotonie – gestion du temps	
8.8. Formalismes de représentation	445
8.8.1. Les règles de production	445
Ordre d'un système à base de règles – Expression d'une expertise ou outils de programmation ?	
8.8.2. «Les objets»	450
8.9. Environnement	451
8.9.1. Ouvertures vers l'extérieur	451
8.9.2. Explication	451
8.10. Le développement d'un système expert	452
8.10.1. Analyse des connaissances	453
8.10.2. Maquettage et prototypage	454
8.10.3. Test et validation	454
8.10.4. Evolution et maintenance	454
8.11. Les outils informatiques	455
8.11.1. Langages informatiques	455
Langages généraux – Langages spécialisés	
8.11.2. Générateurs de systèmes experts	458
8.12. Conclusions	458
Chapitre 9. Diagnostic interne par modélisation et identification	461
Introduction	461
9.1. Description d'un processus 2	462
9.2. Identification et Simulation	464
9.3. Modèles paramétriques et non paramétriques	466
9.3.1. Modèles paramétriques	466
Modèle physique ou de «connaissances» – Modèle empirique – Modèle mixte	
9.3.2. Modèles non paramétriques	468
9.4. Les modèles et leurs représentations	468
9.5. Représentation des modèles de processus linéaires et déterministes	472
9.5.1. Modèles continus	472
Equation différentielle ordinaire – Représentation d'état – Fonction de transfert – Réponse impulsionnelle – Réponse fréquentielle	
9.5.2. Modèles discrets	476
Equations aux différences – Fonction de transfert en z – Equation d'état discrète	
9.5.3. Modèles numériques de processus continus	477

Discrétisation d'une fonction de transfert – Discrétisation d'une équation d'état	
9.6. Méthodes d'identification de modèles non paramétriques	485
9.6.1. Identification de la réponse impulsionnelle	486
9.6.2. Identification de la réponse indicielle	488
9.6.3. Identification de la réponse fréquentielle	488
9.6.4. Conclusions et recommandations sur les méthodes d'identification non paramétriques	492
9.7. Méthodes d'identification de modèles paramétriques	492
9.7.1. Méthodes déterministes d'identification	493
Méthodes graphiques d'identification – Méthode des moindres carrés – Méthode du modèle de référence	
9.7.2. Méthodes statistiques d'identification de paramètres	507
Propriétés statistiques de l'estimateur des moindres carrés – Estimateur des moindres carrés généralisés – Principes succincts des autres estimateurs classiques	
9.7.3. Méthodes d'estimation d'état	514
Filtre de Kalman – Filtre de Kalman appliqué à l'identification de paramètres – Application à un réacteur nucléaire point	
9.8. Conditions d'identifiabilité de paramètres	523
9.8.1. Généralités	523
9.8.2. Analyse de sensibilité	523
9.8.3. Analyse de la séparabilité et de l'unicité des paramètres	526
9.9. Exemples d'identification de modèle de processus industriels	528
9.9.1. Diagnostic de défaillance d'un capteur	528
Détermination du temps de réponse par lissage du spectre de puissance $S_{ss}(f)$ – Détermination du temps de réponse par analyse du signal temporel	
9.9.2. Identification des paramètres d'un réacteur nucléaire	536
Modèle physique – Modèle empirique	
9.10. Conclusions et recommandations	545
Chapitre 10. Conclusions et recommandations	549
10.1. Recommandations pour le choix des mesures et des prétraitements des informations	549
10.2. Recommandations pour le choix de la méthode de diagnostic	552
10.3. Du rôle de l'homme dans l'aide au diagnostic	554
10.4. Perspectives de développement et de recherche	554
Annexe. Rappel sur les probabilités	555
Bibliographie	585