

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF1

THESE

présentée à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision
pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

en Optique et Mécanique de Précision

par

Ammar CHITER

Le 03/05/2018

Titre:

***CONTRIBUTION A LA SEPARATION AVEUGLE DE SOURCES
EN TRAITEMENT DU SIGNAL DES VIBRATIONS,
APPLIQUEE A LA SURVEILLANCE DES MACHINES TOURNANTES***

Jury

Président	Professeur Hammoud RADJEL	Université Ferhat Abbas Sétif1
Directeur de thèse	Professeur Rabah ZEGADI	Université Ferhat Abbas Sétif1
Co-directeur de thèse	Professeur Rais El'Hadi BEKKA	Université Ferhat Abbas Sétif1
Examineur	Professeur Hocine LABAR	Université Badji Mokhtar Annaba
Examineur	Professeur Tahar BAH	Université Badji Mokhtar Annaba
Examineur	Maître de Conférence-A Youcef SOUFI	Université Larbi Tebessi Tébessa
Invité	Professeur Ahmed FELKAOU	Université Ferhat Abbas Sétif1

A ma mère Fatima
A mon défunt père Mohamed
A ma petite famille

Remerciements

Je remercie vivement Messieurs le Professeur Rabah Zegadi de l'institut d'Optique et de Mécanique de Précision et le Professeur Rais El'Hadi Bekka du Département d'Electronique de la Faculté de Technologie directeurs de mes recherches, de m'avoir accompagné le long de ma thèse au Laboratoire de Mécanique de Précision Appliqué et surtout pour leurs encouragements et leurs patiences.

Je tiens à remercier le Professeur Hammoud Radjeai de la Faculté de Technologie de l'Université Ferhat Abbas de Sétif1 pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma soutenance, ainsi que le Professeur Tahar Bahi et le Professeur Hocine Labar de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, que je les remercie infiniment d'avoir accepté de juger ce modeste travail de thèse, aussi le Maître de conférence Youcef Soufi de l'Université Larbi Tebessi de Tébessa d'avoir accepté de juger mon travail de thèse et le Professeur Ahmed Felkaoui d'avoir accepté être parmi le jury.

Je remercie le Professeur Daniel Play et le Professeur Jarir Mahfoud du Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS) « ex CASM : Conception et Analyse des Systèmes Mécaniques », INSA de Lyon France pour m'avoir accueilli dans leur laboratoire.

Je remercie infiniment le Professeur Pierre Jaussaud ex-Directeur de l'INPG, Docteur François Combet et plus particulièrement l'ingénieur de recherches François Vial qui m'a accompagné et assisté au cours de l'acquisition des signaux, du groupe de recherche Gipsa-lab CNRS « ex L.I.S : Laboratoire des Images et des Signaux », de l'Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs de Grenoble « ENSIEG », Institut National Polytechnique de Grenoble. Sans oublier le Professeur Jean-Louis Lacoume l'un des maîtres du traitement de signal qui m'a accueilli dans son bureau personnel et d'avoir accepté de répondre à mes questions.

Je remercie aussi, le Professeur Gérard Champenois et Sandrine Moreau Maître de conférences au Laboratoire d'Informatique et d'Automatique pour les Systèmes « LIAS » « ex LAIL : Laboratoire d'Automatique et Informatique Industrielle » de l'Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs de Poitiers « ESIP ».

Je remercie également les chercheurs du GRESPI/MAN de l'Université de Reims ex LACM Laboratoire d'Analyse des Contraintes Mécaniques et c'est à travers mon passage à ce laboratoire que j'ai réalisé l'importance majeure de certaines connaissances en mécanique au service de l'être humain et surtout les applications en Biomécanique.

J'adresse mes plus sincères remerciements au Professeur Lazhar Rahmani de la Faculté de Technologie de l'Université Ferhat Abbas Sétif1, pour son aide et ses encouragements.

Je remercie ma femme et mes enfants pour leurs soutiens et leurs patiences de surmonter et supporter mes nervosités surtout pendant la rédaction cette thèse.

Au terme de remerciement, je ne peux pas oublier, le bon Dieu Allah, qui m'a aidé et c'est à lui que je dois rendre toutes expressions d'obéissance et de reconnaissance d'unicité et d'existence, donc avec Bismillah on commence et on termine tout travail.

Table des matières

Remerciements	I
Table des matières	I
Liste des Figures	V
Liste des Tableaux	IX
Annexes	XI
Biographie	XV
Introduction générale	1
1. Détection et diagnostic des défauts	5
1.1. Notions sur la maintenance industrielle.....	5
1.1.1. Introduction.....	5
1.1.2. Tâches de maintenance.....	8
1.1.3. Niveaux normalisés de maintenance	9
1.1.4. Méthodes de surveillance des machines	9
1.1.5. Choix du type de maintenance.....	10
1.1.6. Règles générales des stratégies de surveillance	11
1.1.7. Règles spécifiques à la détection	11
1.1.8. Différentes étapes du diagnostic	13
1.1.9. Choix d'une stratégie de surveillance	14
1.1.10. Conclusion	14
1.2. Défauts des organes mécaniques de transmission.	16
1.2.1. Les roulements	16
1.2.2. Défaillances des roulements	19
1.2.3. Les engrenages et leurs défaillances.....	23
1.2.4. Indicateurs scalaires de surveillance	26
1.2.5. Indicateurs d'hypothèse test.....	26
1.2.6. Niveau vibratoire.....	27
1.2.7. Méthodes des mesures vibratoires.....	27
1.2.8. Conclusion	28
1.3. Conclusion au chapitre	29
2. Analyse séquentielle	31
2.1. Introduction.....	31
2.2. Principaux types d'hypothèses testées.....	31
2.2.1. Hypothèses relatives au type de loi de probabilité.....	31
2.2.2. Hypothèses d'homogénéité de deux ou plusieurs échantillons	32
2.2.3. Hypothèses concernant les valeurs numériques des paramètres	32
2.2.4. Hypothèses concernant le type de dépendance.....	33
2.2.5. Hypothèses concernant l'indépendance et la stationnarité	33
2.3. Principe logique général d'un test statistique	34
2.4. Construction d'un test statistique	36
2.4.1. Essence du principe du rapport de vraisemblance	36
2.4.2. Test d'une hypothèse simple	37
2.4.3. Test d'une hypothèse multiple.....	38
2.4.4. Critères de « qualité » d'un test statistique	39
2.5. Procédure séquentielle de prise de décision.....	41
2.5.1. Procédure séquentielle d'observation	41
2.5.2. Test séquentiel du rapport de vraisemblance et ses propriétés.....	42
2.5.3. Test séquentiel généralisé entre hypothèses multiples.....	45

2.6.	Elaboration d'une nouvelle méthode de détection	46
2.6.1.	Introduction	46
2.6.2.	Densité de probabilité des vibrations des roulements.....	46
2.6.3.	Test Séquentiel (SPRT: Sequential Probability Rate Test)	47
2.6.4.	Test du Taux de Probabilité (TTP, PRT).....	48
2.6.5.	Expression de la probabilité de détection et de fausse alarme:	48
2.6.6.	Elaboration du Test Séquentiel de Wald (TSW).....	52
2.6.7.	Détection des défauts de roulements	54
2.7.	Conclusion.....	55
3.	Séparation aveugle de sources.....	57
3.1.	Introduction	57
3.2.	Analyse en composantes principales.....	57
3.3.	Blanchiment de données	59
3.4.	Fonction contraste	60
3.5.	La méthode à point fixe	61
3.6.	Analyse en composantes indépendantes	62
3.7.	Applications de l'ACI.....	63
3.8.	Types d'algorithmes d'ACI.....	64
3.9.	Kurtosis comme Fonction Contraste.....	64
3.10.	Algorithme à Point Fixe utilisant le kurtosis.....	66
3.11.	Dérivation de l'Algorithme à Point Fixe.....	66
3.12.	Généralisation des algorithmes à point fixe.....	67
3.13.	Evaluation d'une composante indépendante	67
3.14.	Evaluation de plusieurs composantes indépendantes	67
3.15.	Choix de la non-linéarité.....	68
3.16.	FastICA.....	68
3.17.	Organigramme fonctionnel-FastICA.....	68
3.18.	Objectif de l'algorithme.....	69
3.19.	Conclusion	70
4.	Expérimentations et traitements des résultats.....	71
4.1.	Introduction	71
4.2.	Banc d'essai Gipsa-lab.....	71
4.2.1.	Présentation du banc et fonctionnement	71
4.2.2.	Synoptique du banc d'essais.....	74
4.2.3.	Description des éléments du Banc	75
4.2.4.	Mesures et Acquisitions	84
4.3.	Banc d'essai LaMCoS.....	95
4.3.1.	Présentation du banc expérimental	95
4.3.2.	Caractéristiques du Banc d'essai LaMCoS	95
4.3.3.	Choix des défauts à simuler expérimentalement.....	98
4.3.4.	Choix des grandeurs physiques à mesurer	100
4.3.5.	Organisation des campagnes d'essais	100
4.4.	Analyse des Signaux Gipsa-lab	104
4.4.1.	Evaluation globale des accélérations verticales et horizontales	104
4.4.2.	Variation du couple, vitesses entrée-sortie et de température	111
4.4.3.	Courants et tensions de phases.....	115
4.4.4.	Encodeurs et Top tours.....	119
4.5.	Analyse des signaux LaMCoS	122
4.5.1.	Effets de défauts isolés sur les signaux d'accélération	122
4.5.2.	Influence des défauts isolés sur les signaux temporels bruts	123
4.5.3.	Signaux d'accélération.....	123
4.5.4.	Evolution du maximum d'accélération.....	128
4.5.5.	Propagation de la signature des défauts dans le système	129

4.6. Validation du test de Wald	132
4.6.1. Introduction.....	132
4.6.2. Procédure de détection.....	132
4.6.3. Plan du test.....	133
4.6.4. Validation du modèle par des signaux simulés	134
4.6.5. Validation du modèle par les signaux réels.....	136
4.6.6. Conclusion	138
4.7. Validation expérimental de FastICA	139
4.7.1. Introduction.....	139
4.7.2. Choix de non linéarité :	139
4.7.3. Critère d'adaptation des signaux :	139
4.7.4. Signaux des mélanges et leurs codifications	139
4.7.5. Procédure de séparation.....	140
4.7.6. Représentation temporelle des matrices mélanges	140
4.8. Conclusion.....	148
5. Conclusion générale et perspectives	149
6. Bibliographie	153
7. Annexe	161
7.1. Traitement des résultats Gipsa-lab.....	161
7.1.1. Kurtosis crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20	161
7.1.2. Skewness crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20	163
7.1.3. RMS crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20.....	165
7.1.4. Facteur de crête crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20.....	167
7.2. Tableaux des indicateurs par accéléromètres « LaMCoS »	169
7.2.1. Acc1	169
7.2.2. Acc2	172
7.2.3. Acc3	176
7.3. Variation des indicateurs	180
7.4. Interface utilisateur Matroule	198
7.5. Valeurs normalisées du Niveau vibratoire, RMS et CF	199
8. Biographie	201

Liste des Figures

Figure 1.1: Diagramme des différents concepts de maintenance	6
Figure 1.2: Causes de défaillances liées à la construction	7
Figure 1.3: Défaillances liées au phénomène de corrosion	7
Figure 1.4: Méthodes de surveillance des machines	10
Figure 1.5: Iceberg des coûts	12
Figure 1.6: Diagramme de Pareto (loi des 80/20).....	12
Figure 1.7: Choix d'une stratégie de surveillance	15
Figure 1.8: L'évolution des roulements à travers l'histoire	16
Figure 1.9: Premier roulement conçu par Léonard de Vinci.....	17
Figure 1.10: Prototype du roulement inspiré par Léonard de Vinci	17
Figure 1.11: Forme d'un roulement.....	18
Figure 1.12: Eléments constituant un roulement.....	18
Figure 1.13: Durée de vie « MTTF » d'une machine	19
Figure 1.14: Courbe de dispersion de la durée de vie des roulements « MTBF »	20
Figure 1.15: Caractéristiques géométriques d'un roulement.....	21
Figure 1.16: Géométrie d'une roue dentée	23
Figure 1.17: Avaries de corrosion de denture d'engrenages.....	24
Figure 1.18: Avaries de fatigue de surface de denture d'engrenage.....	24
Figure 2.1: Représentation de la densité de la statistique critique Ψ_n	35
Figure 2.2: Signal réel de roulement avec un défaut localisé	47
Figure 2.3: Plan du test (TSW).....	55
Figure 3.1 : Modèle SAS	57
Figure 3.2: Variation de $g(x)=x-\sin(\pi \cdot x)$	61
Figure 3.3: Synoptique d'Analyse en Composantes Indépendantes	62
Figure 3.4: Organigramme fonctionnel de FastICA.....	69
Figure 4.1: Banc côté entraînement	73
Figure 4.2: Banc coté charge.....	73
Figure 4.3: Armoire Moteur et Générale	73
Figure 4.4: Armoire de charge	73
Figure 4.5: Baie de mesures.....	73
Figure 4.6: Vue d'ensemble	73
Figure 4.7: Synoptique du banc d'essais.....	74
Figure 4.8: Moteur LEROY SOMER	76
Figure 4.9: Limiteur de couple STROMAG	76

Figure 4.10: Multiplicateur (Boite d'engrenages)	77
Figure 4.11: Arbres d'entrée et de sortie avec engrenages et leurs roulements	77
Figure 4.12: Relation entre le couple et le nombre de cycles d'apparition de l'écaillage	79
Figure 4.13: Accouplement Metastream	80
Figure 4.14: Schéma descriptif du couplemètre Metastream	80
Figure 4.15: Couplemètre TG20	81
Figure 4.16: Emplacement du Couplemètre TG20.....	81
Figure 4.17: Principe du Couplemètre TG "Roue-Capteur"	81
Figure 4.18: Moteur Charge-Tachymètre.....	82
Figure 4.19: Armoire de commande du Moteur	82
Figure 4.20: ALTIVAR 66	82
Figure 4.21: Groupe de lubrification	83
Figure 4.22: Accéléromètres B&K	84
Figure 4.23: Courbe de réponse des accéléromètres	84
Figure 4.24: Racal Storeplex Delta	85
Figure 4.25: Disposition des accéléromètres RV-RH	88
Figure 4.26: Caractéristiques des roulements et engrenages du banc Gotix	88
Figure 4.27: Dimensions du banc Gotix.....	88
Figure 4.28: Architecture du banc d'essai.....	95
Figure 4.29: Vue de dessus de la transmission de puissance.....	96
Figure 4.30: Simulation d'un défaut local d'engrenage	97
Figure 4.31: Facteurs à considérer pour l'expérimentation.....	98
Figure 4.32: Disposition des défauts sur roulements et engrenages.....	99
Figure 4.33: Géométrie du défaut bague intérieure du roulement à rouleaux.....	99
Figure 4.34: Positionnement de l'instrumentation de mesure	100
Figure 4.35: Schéma cinématique de positionnement des accéléromètres.....	100
Figure 4.36: Désignation des tests pour les signaux LaMCoS	101
Figure 4.37 : Codification des essais par organe.....	102
Figure 4.38 : Echantillon de fichiers des données expérimentales.....	103
Figure 4.39: Accélérations au niveau du capteur 1 crea1-4.....	104
Figure 4.40: Accélérations au niveau du capteur 3 crea1-4.....	104
Figure 4.41: Accélérations au niveau du capteur 5 crea1-4.....	105
Figure 4.42: Accélérations au niveau du capteur 2 crea1-4.....	105
Figure 4.43: Accélérations au niveau du capteur 4 crea1-4.....	105
Figure 4.44: Accélérations au niveau du capteur 6 crea1-4.....	106
Figure 4.45: Variation de Jarque-Bera en Fonction des creas et capteurs	107

Figure 4.46: Variation de l'Indice de Cornish-Fisher en fonction des creas et capteurs	108
Figure 4.47: Variation des indicateurs scalaires en fonction de la charge	109
Figure 4.48: Variation du Kurtosis CVT en fonction de la charge	112
Figure 4.49: Variation du Skewness CVT en fonction de la charge.....	112
Figure 4.50: Variation du RMS CVT en fonction de la charge	113
Figure 4.51: Variation du CF en fonction de la charge.....	113
Figure 4.52: Variation du Kurtosis des indicateurs des courants et tensions.....	116
Figure 4.53: Variation du Skewness des indicateurs des courants et tensions	116
Figure 4.54: Variation du RMS des indicateurs des courants et tensions	116
Figure 4.55: Variation du CF des indicateurs des courants et tensions.....	116
Figure 4.56: Zoom de la variation du RMS des courants en fonction des creas.....	117
Figure 4.57: Représentation temporelle des courants et des tensions des crea 1 et 2	118
Figure 4.58: Variation du Kurtosis des encodeurs et des Top Tours	120
Figure 4.59: Variation du Skewness des encodeurs et des Top Tours.....	120
Figure 4.60: Variation du RMS des encodeurs et des Top Tours	120
Figure 4.61: Variation du CF des encodeurs et des Top Tours	120
Figure 4.62: Influence de l'état de l'engrenage sur le signal temporel d'accélération	124
Figure 4.63: Variation des indicateurs par test.....	125
Figure 4.64: Variation des indicateurs par test en fonction de la vitesse.....	125
Figure 4.65: Effet d'un écaillage de la bague intérieure Test 121	126
Figure 4.66: Influence de l'écaillage de la bague intérieure et l'élément roulant.....	126
Figure 4.67: Signature de l'écaillage sur l'élément roulant Test 131	126
Figure 4.68: Kurtosis par acc des avaries choisis	127
Figure 4.69: Accélérations maximales par acc des avaries choisis	127
Figure 4.70: Niveau vibratoire par acc des avaries choisis	128
Figure 4.71: Evolution du maximum d'accélération	129
Figure 4.72: Disposition des capteurs piézoélectriques par voies.....	129
Figure 4.73: Evaluation du maximum de l'amplitude des vibrations sur les trois voies.....	130
Figure 4.74: Interface paquet de programmes de traitement sous Matlab.....	132
Figure 4.75: Plan du Test de Wald	133
Figure 4.76: Signal référence simulé.....	134
Figure 4.77: Signal défaut simulé.....	134
Figure 4.78: Signal hypothétique	135
Figure 4.79: Autocorrélation du signal hypothétique.....	135
Figure 4.80: FFT du signal hypothétique.....	135
Figure 4.81 : Géométrie du défaut dans la bague intérieure du roulement	136

Figure 4.82: Signal de référence réel	137
Figure 4.83: Signal réel avec défaut	137
Figure 4.84: Signal hypothétique réel	137
Figure 4.85: FFT du signal hypothétique réel	137
Figure 4.86: Signaux de bases pour le mélange M1 avant troncature.....	141
Figure 4.87: Signaux de bases pour le mélange M2 avant troncature.....	141
Figure 4.88: Signaux de bases pour le mélange M3 avant troncature.....	141
Figure 4.89: Signaux de bases pour le mélange M4 avant troncature.....	141
Figure 4.90: Signaux de bases pour le mélange M5 avant troncature.....	141
Figure 4.91: Signaux mixés du mélange M1.....	142
Figure 4.92: Signaux mixés du mélange M2.....	142
Figure 4.93: Signaux mixés du mélange M3.....	142
Figure 4.94: Signaux mixés du mélange M4.....	142
Figure 4.95: Signaux mixés du mélange M5.....	142
Figure 4.96: Signaux blanchis du mélange M1.....	143
Figure 4.97: Signaux blanchis du mélange M2.....	143
Figure 4.98: Signaux blanchis du mélange M3.....	143
Figure 4.99: Signaux blanchis du mélange M4.....	143
Figure 4.100: Signaux blanchis du mélange M5.....	143
Figure 4.101: Signaux séparés du mélange M1.....	144
Figure 4.102: Signaux séparés du mélange M2.....	144
Figure 4.103: Signaux séparés du mélange M3.....	144
Figure 4.104: Signaux séparés du mélange M4.....	144
Figure 4.105: Signaux séparés du mélange M5.....	144
Figure 4.106: Indicateurs des signaux sources.....	146
Figure 4.107: Indicateurs des signaux séparés.....	146
Figure 4.108: Kurtosis non ordonné des signaux sources et mélangés	147
Figure 4.109 : Kurtosis ordonnés des signaux sources et séparés	147

Liste des Tableaux

Tableau 1.1: Choix des indicateurs	13
Tableau 1.2: Evolution des indicateurs de suivi en mode global	14
Tableau 1.3: Défaillances roulements/paliers lisses	20
Tableau 1.4: Défauts de roulements avec leurs causes (SKF).....	21
Tableau 1.5: Fréquences caractéristiques d'un roulement	22
Tableau 1.6: Fréquences de modulation des roulements	22
Tableau 1.7: Caractéristiques géométriques d'une denture	23
Tableau 1.8: Récapitulatif des Causes des avaries des dentures des engrenages.....	25
Tableau 1.9: Indicateurs Scalaires de surveillance	26
Tableau 2.1: Valeurs de la fonction $\omega(\alpha,\beta)$ correspondant aux risques α et β	44
Tableau 4.1: Caractéristiques du banc GOTIX.....	86
Tableau 4.2: Configuration par défaut de l'analyseur Racal	87
Tableau 4.3: Différentes mesures et leurs correspondances	89
Tableau 4.4: Fiche d'acquisition crea2004-1	91
Tableau 4.5: Fiche d'acquisition crea2004-2	92
Tableau 4.6: Fiche d'acquisition crea2004-3	93
Tableau 4.7: Fiche d'acquisition crea2004-3	94
Tableau 4.8: Caractéristiques simplifiées d'engrenages.....	97
Tableau 4.9: Caractéristiques géométriques des roulements	98
Tableau 4.10: Défaut simulé sur chaque organe mécanique	99
Tableau 4.11: Conditions de fonctionnement pour les campagnes d'essai	101
Tableau 4.12: Paramètres de manipulation.....	101
Tableau 4.13: Les différentes combinaisons d'expériences	102
Tableau 4.14: Introduction du défaut localisé par élément	102
Tableau 4.15: Données des conditions de fonctionnement	102
Tableau 4.16: Valeurs du Kurtosis pour différents charges crea-1-4	106
Tableau 4.17: Valeurs du Skewness pour différents charges crea-1-4.....	106
Tableau 4.18: Valeurs du RMS pour différents charges crea-1-4	106
Tableau 4.19: Valeurs du Facteur de Crête (CF) pour différents charges crea-1-4	107
Tableau 4.20: Test de Jarque-Bera des creas selon les capteurs.....	107
Tableau 4.21: Indice de Cornish-Fisher des creas selon les capteurs.....	107
Tableau 4.22: Variation du Kurtosis CVT en fonction de la charge.....	111
Tableau 4.23: Variation du Skewness CVT en fonction de la charge	111
Tableau 4.24: Variation du RMS CVT en fonction de la charge	111

Tableau 4.25: Variation de CF en fonction de la charge	111
Tableau 4.26: Kurtosis des courants et tensions de phases en fonction des creas	115
Tableau 4.27: Skewness des courants et tensions de phases en fonction des creas	115
Tableau 4.28: RMS des courants et tensions de phases en fonction des creas.....	115
Tableau 4.29: CF des courants et tensions de phases en fonction des creas	115
Tableau 4.30: Kurtosis des encodeurs et des Top Tours en fonction des creas	119
Tableau 4.31: Skewness des encodeurs et des Top Tours en fonction des creas.....	119
Tableau 4.32: RMS des encodeurs et des Top Tours en fonction des creas.....	119
Tableau 4.33: CF des encodeurs et des Top Tours en fonction des creas	120
Tableau 4.34: Tableau des indicateurs pour un engrenage sain/écaillé.....	124
Tableau 4.35: Kurtosis par défaut des Test 111-211-121-131	127
Tableau 4.36: Accélérations maximales des Test 111-211-121-131.....	127
Tableau 4.37: Niveau vibratoire en dB des Test 211-121-131 par rapport à 111.....	128
Tableau 4.38: Caractéristiques géométriques roulements à billes et à rouleaux.....	136
Tableau 4.39: Fréquences caractéristiques des roulements à billes et à rouleaux	136
Tableau 4.40: Signaux constituant les mélanges.....	140
Tableau 4.41: Indicateurs des signaux mélanges.....	146
Tableau 4.42: Indicateurs des signaux séparés.....	146
Tableau 4.43: Position initiales de MM.....	147
Tableau 4.44: Position initiales de IC	147

Annexes

Annexe 1: Kurtosis crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20.....	161
Annexe 2: Kurtosis crea1-29 CAPT11-20.....	162
Annexe 3: Skewness crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20.....	163
Annexe 4: Skewness crea1-29 CAPT 11-20.....	164
Annexe 5: RMS crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20.....	165
Annexe 6: RMS crea1-29 CAPT 11-20.....	166
Annexe 7: Facteur de crête crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20.....	167
Annexe 8: Facteur de crête crea1-29 CAPT11-20.....	168
Annexe 9: Indicateurs scalaires essai 111 acc1.....	169
Annexe 10: Indicateurs scalaires essai 112 acc1.....	169
Annexe 11: Indicateurs scalaires essai 113 acc1.....	169
Annexe 12: Indicateurs scalaires essai 121 acc1.....	169
Annexe 13: Indicateurs scalaires essai 122 acc1.....	169
Annexe 14: Indicateurs scalaires essai 123 acc1.....	170
Annexe 15: Indicateurs scalaires essai 131 acc1.....	170
Annexe 16: Indicateurs scalaires essai 132 acc1.....	170
Annexe 17: Indicateurs scalaires essai 133 acc1.....	170
Annexe 18: Indicateurs scalaires essai 211 acc1.....	170
Annexe 19: Indicateurs scalaires essai 212 acc1.....	171
Annexe 20: Indicateurs scalaires essai 213 acc1.....	171
Annexe 21: Indicateurs scalaires essai 221 acc1.....	171
Annexe 22: Indicateurs scalaires essai 222 acc1.....	171
Annexe 23: Indicateurs scalaires essai 223 acc1.....	171
Annexe 24: Indicateurs scalaires essai 231 acc1.....	172
Annexe 25: Indicateurs scalaires essai 232 acc1.....	172
Annexe 26: Indicateurs scalaires essai 233 acc1.....	172
Annexe 27: Indicateurs scalaires essai 111 acc2.....	172
Annexe 28: Indicateurs scalaires essai 112 acc2.....	172
Annexe 29: Indicateurs scalaires essai 113 acc2.....	173
Annexe 30: Indicateurs scalaires essai 121 acc2.....	173
Annexe 31: Indicateurs scalaires essai 122 acc2.....	173
Annexe 32: Indicateurs scalaires essai 123 acc2.....	173
Annexe 33: Indicateurs scalaires essai 131 acc2.....	173
Annexe 34: Indicateurs scalaires essai 132 acc2.....	174

Annexe 35: Indicateurs scalaires essai 133 acc2.....	174
Annexe 36: Indicateurs scalaires essai 211 acc2.....	174
Annexe 37: Indicateurs scalaires essai 212 acc2.....	174
Annexe 38: Indicateurs scalaires essai 213 acc2.....	174
Annexe 39: Indicateurs scalaires essai 221 acc2.....	175
Annexe 40: Indicateurs scalaires essai 222 acc2.....	175
Annexe 41: Indicateurs scalaires essai 223 acc2.....	175
Annexe 42: Indicateurs scalaires essai 231 acc2.....	175
Annexe 43: Indicateurs scalaires essai 232 acc2.....	175
Annexe 44: Indicateurs scalaires essai 233 acc2.....	176
Annexe 45: Indicateurs scalaires essai 111 acc3.....	176
Annexe 46: Indicateurs scalaires essai 112 acc3.....	176
Annexe 47 : Indicateurs scalaires essai 113 acc3.....	176
Annexe 48: Indicateurs scalaires essai 121 acc3.....	176
Annexe 49: Indicateurs scalaires essai 122 acc3.....	177
Annexe 50: Indicateurs scalaires essai 123 acc3.....	177
Annexe 51: Indicateurs scalaires essai 131 acc3.....	177
Annexe 52: Indicateurs scalaires essai 132 acc3.....	177
Annexe 53: Indicateurs scalaires essai 133 acc3.....	177
Annexe 54: Indicateurs scalaires essai 211 acc3.....	178
Annexe 55: Indicateurs scalaires essai 212 acc3.....	178
Annexe 56: Indicateurs scalaires essai 213 acc3.....	178
Annexe 57: Indicateurs scalaires essai 221 acc3.....	178
Annexe 58: Indicateurs scalaires essai 222 acc3.....	178
Annexe 59: Indicateurs scalaires essai 223 acc3.....	179
Annexe 60: Indicateurs scalaires essai 231 acc3.....	179
Annexe 61: Indicateurs scalaires essai 232 acc3.....	179
Annexe 62: Indicateurs scalaires essai 233 acc3.....	179
Annexe 63: Variation des indicateurs Test 111.....	180
Annexe 64: Variation des indicateurs Test 112.....	181
Annexe 65: Variation des indicateurs Test 113.....	182
Annexe 66: Variation des indicateurs Test 121.....	183
Annexe 67: Variation des indicateurs Test 122.....	184
Annexe 68: Variation des indicateurs Test 123.....	185
Annexe 69: Variation des indicateurs Test 131.....	186
Annexe 70: Variation des indicateurs Test 132.....	187

Annexe 71: Variation des indicateurs Test 133	188
Annexe 72: Variation des indicateurs Test 211	189
Annexe 73: Variation des indicateurs Test 212	190
Annexe 74: Variation des indicateurs Test 213	191
Annexe 75: Variation des indicateurs Test 221	192
Annexe 76: Variation des indicateurs Test 222	193
Annexe 77: Variation des indicateurs Test 223	194
Annexe 78: Variation des indicateurs Test 231	195
Annexe 79: Variation des indicateurs Test 232	196
Annexe 80: Variation des indicateurs Test 233	197
Annexe 81: Interface utilisateur Matroule	198
Annexe 82: Valeurs normalisées du niveau vibratoire, RMS et CF	199

Biographie

Biographie 1: Abraham Wald	201
Biographie 2: Milton Sobel.....	201
Biographie 3: Jacob Wolfowitz.....	201
Biographie 4: Herald Cramér	201
Biographie 5: Jerzy Neyman.....	201
Biographie 6: Karl Pearson.....	201
Biographie 7: Edmund Alfred Cornish.....	202
Biographie 8: Ronald Aylmer Fisher.....	202
Biographie 9: Joseph Berkson	202
Biographie 10: Lucien Le Cam	202

Introduction générale

Dans l'industrie, une grande attention est accordée aux conditions de surveillance et de maintenance dans le but d'améliorer la qualité de la production. En 1998-1999 dans leur travail Edwards [1] et Tandon [2], ont montré l'importance de la maintenance comme le meilleur moyen d'éviter les problèmes d'entretien souvent très coûteux et aussi comment les techniques de maintenance prédictive ont évolué comme un moyen de contrôle de la santé mécanique, en générant des informations sur l'état de la machine.

Dans les machines tournantes, les éléments de transmission: courroies, engrenages et roulements sont d'un intérêt majeur dans la maintenance industrielle car le fonctionnement du système mécanique dépend fortement de la santé de ces éléments qui peuvent faire nuire au bon fonctionnement d'une machine. En effet en 2008 Jayaswal et al [3] ont alloués une attention particulière au roulement qui est l'un des composants les plus critiques qui déterminent la santé de la machine de production moderne et sa durée de vie restante.

Il est important, pour la surveillance prédictive de se munir des outils robustes pour garantir l'état de santé des roulements pendant le fonctionnement en indiquant les défaillances à venir dans un délai suffisant pour la planification de la maintenance. Ces outils ont été présentés en 2015 dans le travail d'El-Thalji et Jantunen [4], en 1995 par Mann [5] et en 1985 par Renwick et Babson [6].

Au cours des deux dernières décennies, plusieurs méthodes ont fait l'objet d'étude et de développement, parmi ces méthodes on remarque visiblement des méthodes révolutionnaires basées sur le traitement du signal en analysant les signaux vibratoires issus des organes mécaniques de transmissions en défaillance « plus particulièrement les roulements » par des méthodes temporelles, fréquentielles, ou la combinaison des deux, et qui sont divisées en deux catégories principales : la détection et le diagnostic des défauts mécaniques.

Ainsi, de nombreuses méthodes sont nées, les indicateurs scalaires tels que le kurtosis, le skewness et le facteur de crête en 2004 par Dron [7] et en 1997 Pachaud [8], prétraitement avancé du signal vibratoire et la modélisation autorégressive par Al-Bugharbee H. et Trendafilova I. en 2016 [9], la démodulation et détection de l'enveloppe en 2004-2008 par Sheen [10, 11], modulation d'amplitude en 2004 par Stack [12], l'identification par analyse des modes de vibrations en 1990 par Rizos [13], le débruitage des signaux vibratoires en 2004 par Bolaers [14], l'analyse de la densité spectrale en 2011 par Krejcar et Frischer [15], la transformée rapide de Fourier en 1995 par Lenort [16], les test statistiques KS-test « Kolmogorov et Smirnov » en 2004 par Kar et Mohanty [17], la modification de la morphologie des défauts des roulements en 2011 par Dong [18], les algorithmes génétiques par Liang Zhang et all [19], la méthode de poursuite de base pour l'extraction de caractéristiques fréquentielles des défauts en 2005 par Yang [20], la méthode de séries temporelles en 2011 par Kopsaftopoulos et

Fassois [21], les réseaux neurones en 2003 par Samanta et Al-Balushi [22], la logique floue en 1996 par Liu [23], les ondelettes par Bendjama et Boucherit en 2016 [24] et Fu-Cheng Zhou et all [25], l'analyse en composantes indépendantes en 2011 par Wang Z. [26] et Bell A.J. et Sejnowski T.J. [27], la séparation aveugle en 2014 par Wang H. [28] et en fin, l'intéressant travail en 2015 par El-Thalji and Jantunen [4] et en 2016 par Rai and Upadhyay [29] dans lequel les chercheurs ont résumés presque toutes les techniques utilisées dans le domaine de la prédiction des défauts de roulements.

Dans les roulements, les défauts typiques sont les défauts localisés [30] qui se manifestent généralement par une fissuration de fatigue sous pression cyclique de contact telle qu'elle a été mentionnée par El-Thalji et Jantunen [4], Fajdiga et Sraml [31], Ismail [32] et Tauqir [33]. Ainsi, la détection de la fissuration est souvent basée sur la détection de l'attaque [34].

Pendant un fonctionnement anormale, une série d'impulsions à bande large sera générée lorsque l'élément roulant du roulement passe au-dessus du défaut à une fréquence [35-38], qui sera déterminée par la vitesse de l'arbre, la géométrie du roulement et l'emplacement du défaut [2, 39-41]. Cette fréquence donne la possibilité de détecter la présence du défaut et d'effectuer le diagnostic de la partie défectueuse [42].

La difficulté de la détection des défauts localisés [43] est liée au fait que l'énergie de la signature du roulement est diffusée à travers une bande large de fréquence et d'ici la signature peut être facilement noyée dans le bruit [41, 44]. Ainsi, sous différents régimes de fonctionnement, charges et vitesses variables, les méthodes de détection les plus couramment utilisées et précédemment citées, demeurent inefficaces pour la prédiction [4, 42], car il se peut présenter qu'un mode de résonance excité au début de l'attaque du défaut peut être non excité plus tard quand ce dernier se développe [41, 42, 45].

En se basant sur l'analyse séquentielle développée dans les années 1940 par Wald [46-51], Wald and Wolfowitz [52-55], les hypothèses test composées ont fait l'objet de ce travail de recherche pour la détection et le diagnostic des défauts localisés dans les roulements d'une part et d'autre part pour le débruitage des signaux pour la séparation aveugle des signaux de roulement [42].

Le travail présenté dans ce manuscrit s'organise autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre traite la détection et le diagnostic des défauts des roulements. Ce chapitre comprend deux parties. La première partie est consacrée à la maintenance prédictive ou conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire, appliquée à la surveillance des organes mécaniques de transmission en particulier les roulements. La deuxième partie présente des notions de base et spécifiques sur les roulements-

Le deuxième chapitre décrit une nouvelle méthode pour la détection des défauts spécifiques aux roulements. Cette méthode est basée sur l'analyse séquentielle fondée par le mathématicien américain Abraham Wald en 1943 [56, 57]. Il s'agit d'une méthode de calcul permettant à la fois la

détection des défauts avec un niveau de bruit quelconque et l'optimisation du nombre d'échantillons pour une expérimentation rapide et efficace sous différents régimes de fonctionnements.

Dans le troisième chapitre, on a présenté la méthode de la séparation aveugle appliquée aux traitements des signaux de roulements. Ce travail a conduit à l'introduction à l'analyse en composantes indépendantes (ACI), et les étapes principales pour séparer les signaux issu d'une machine tournante. On a aussi présenté l'algorithme FastICA (Fast Independent Component Analysis : analyse en composantes indépendantes à convergence rapide), algorithme le plus réputé pour la séparation des signaux.

Le chapitre 4 est dédié aux expérimentations effectuées et la description des bancs d'essais utilisés d'une part, et d'autre part au traitement des signaux obtenus et à l'interprétation des résultats et aussi à la validation expérimentale du test de Wald et l'algorithme FastICA.

On a terminé cette thèse par une conclusion générale présentant un bilan de ce travail de recherche et les perspectives d'avenir pour l'améliorer et les possibles pistes qui restent à exploiter.

1. Détection et diagnostic des défauts

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter dans sa première partie, les notions fondamentales de la maintenance industrielle et plus particulièrement la maintenance prédictive et dans la deuxième partie, on donne les outils nécessaires qui ont un intérêt primordial pour la détection et le diagnostic des défauts dans les roulements et aussi dans les engrenages.

1.2. Notions sur la maintenance industrielle

1.2.1. Introduction

Les coûts d'entretien sont une partie importante des coûts d'exploitation totaux de toutes les industries de fabrication ou des usines de production. Selon l'industrie spécifique, les coûts de maintenance peuvent représenter entre 15 et 60% du coût des biens produits. Par exemple, dans les industries alimentaires, les coûts d'entretien moyens représentent environ 15% du coût des biens produits, alors que les coûts d'entretien de la sidérurgie, des pâtes et papiers et d'autres industries lourdes représentent jusqu'à 60% des coûts de production totaux.

Des enquêtes récentes sur l'efficacité de la gestion de la maintenance indiquent qu'un tiers de tous les coûts d'entretien est gaspillé à la suite d'un entretien inutile ou incorrect. Si l'on considère que l'industrie d'un pays dépense plus de 10 milliards d'Euros par an pour l'entretien du matériel et des installations, l'impact sur la productivité et le profit que représente l'opération de maintenance devient évident. Le résultat d'une gestion de maintenance inefficace représente une perte de plus de 3 milliards d'Euros chaque année. Peut-être plus important est le fait que la maintenance inefficace la gestion affecte de manière significative la capacité à fabriquer des produits de qualité compétitifs. Les pertes de temps de production et de qualité des produits résultant d'une gestion insuffisante ou inadéquate de l'entretien ont eu un impact considérable sur la capacité des industries à concurrencer un autre pays qui a mis en œuvre des philosophies de gestion de fabrication et de maintenance plus avancées.

La raison dominante de cette gestion inefficace est le manque de données factuelles pour quantifier le besoin réel de réparation ou d'entretien de la machinerie, de l'équipement et des systèmes d'une usine. L'ordonnement de la maintenance a été, et dans de nombreux cas encore, fondé sur des données de tendances statistiques ou sur la défaillance réelle du matériel de l'usine.

Jusqu'à récemment, la direction au niveau intermédiaire et au niveau de l'entreprise a ignoré l'impact de l'opération de maintenance sur la qualité des produits, les coûts de production et, plus important encore, sur les bénéfices nets. L'opinion générale a été :

« La maintenance est un mal nécessaire »,

peut-être que cette affirmation était vraie il y a 20 ou 30 ans, mais le développement de microprocesseurs ou d'instruments informatisés l'état de fonctionnement de l'équipement, de la machinerie et des systèmes de l'usine a fourni les moyens de gérer l'opération de maintenance. Cette instrumentation a permis de réduire ou d'éliminer les réparations inutiles, d'éviter les pannes catastrophiques des machines et de réduire l'impact négatif de l'opération de maintenance sur la rentabilité des usines de fabrication et de production.

Pour s'introduire dans le domaine de la maintenance, on se contente pour définir la maintenance de sa terminologie intégrale préconisée par la norme AFNOR X60 010, révisée en 1994, la définition de la maintenance se formule comme :

« Toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management ». [58-63]

Il existe plusieurs termes utilisés pour définir les différentes actions de maintenance tel que : curatif, correctif, prédictif, conditionnel, etc..., et qui caractérisent la manière d'intervenir dans une maintenance planifiée. [58-63], le diagramme de la Figure 1.1 représente les différents concepts de maintenance :

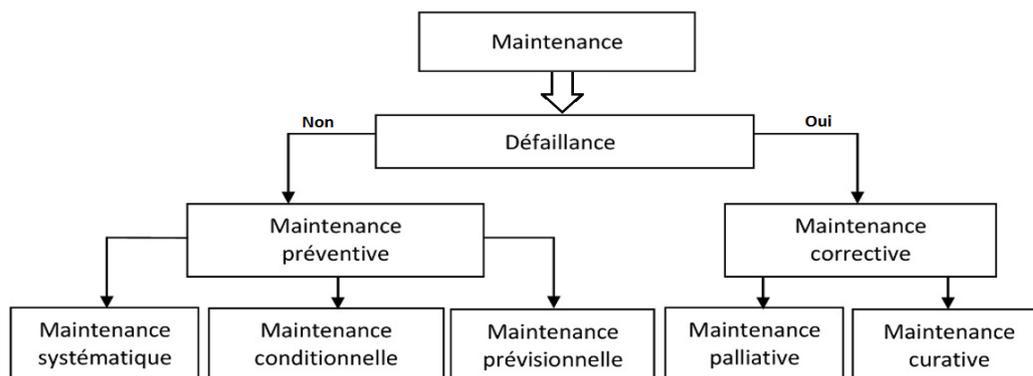


Figure 1.1: Diagramme des différents concepts de maintenance

a- Défaillance :

La défaillance est définie comme étant la cessation de l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise aussi on peut la définir comme étant une l'altération ou la cessation d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec des performances bien définies dans les spécifications techniques, l'ensemble est indisponible suite une défaillance.

Cause de défaillance : La cause de défaillance est définie comme étant les circonstances liées à la conception, la fabrication ou l'emploi et qui ont entraîné la défaillance [58-60, 64, 65]. Cette définition est fondamentale en diagnostic industriel puisque l'on recherche la cause première de la défaillance en fonction des symptômes externes qui sont observés. les Figure 1.2 et Figure 1.3 représentent les principales causes de défaillance induites lors de la construction ou liées aux phénomènes de corrosion.

Classification des défaillances :

- Défaillance mineure ;
- Défaillance majeure ;
- Défaillance critique ;
- Défaillance catastrophique.

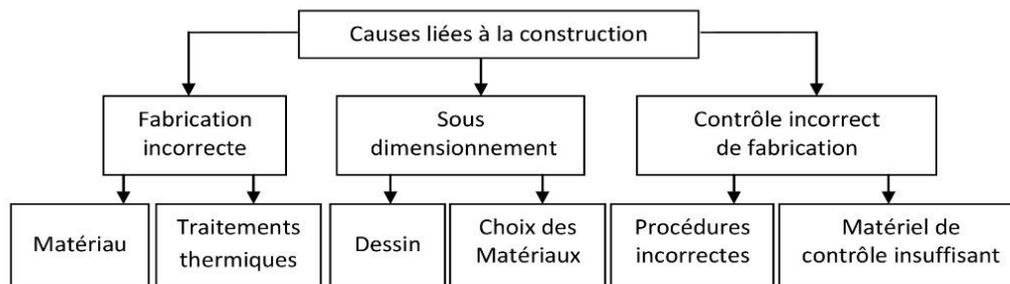


Figure 1.2: Causes de défaillances liées à la construction

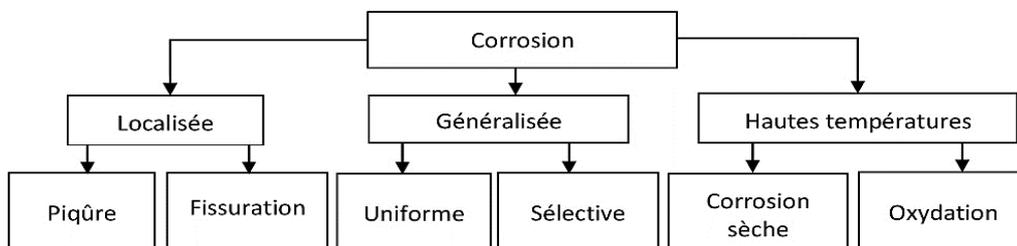


Figure 1.3: Défaillances liées au phénomène de corrosion

b- Maintenance préventive : La maintenance préventive s'effectue selon des critères prédéterminés afin de réduire la probabilité de défaillance d'une machine reliées à un seuil de détection fixé au préalable. Dans le cadre de cette maintenance on peut intervenir selon un échéancier établi par avance, en fonction de la durée d'usage (maintenance systématique), ou en fonction d'évènements révélateurs de l'état de dégradation de machine (maintenance conditionnelle). [58, 66-68]

b.1- Maintenance systématique : Ce type de maintenance a été toujours le premier à s'imposer car il ne demande aucun moyen d'analyse. Cette maintenance se traduit par des arrêts réguliers de la machine dans des moments planifiés fondés sur des bases statistiques reliés soit au nombre de pannes par période ou au stock ou encore pour des mesures de sécurité, la date de l'arrêt est donc fixée et planifiée par expérience, et l'intervention se fait par démontage, contrôle et remplacement systématique d'organes.

L'inconvénient de cette procédure est le risque d'un démontage inutile d'une machine et par conséquent une perte de temps de production et donc une perte d'argent et encore le redémarrage d'une machine exige dans la plupart du temps un ajustage supplémentaire des éléments qui ont été remplacés. De plus rien ne confirme qu'un évènement ne se manifeste dans l'intervalle d'intervention préétabli. Ce type de maintenance est géré par l'expérience de l'être humain et par conséquent sujette à des erreurs non intentionnelles. Mais ce type reste à l'heure actuelle le moyen le plus utilisé, par ce

qu'il ne demande pas une analyse de comportement d'une machine, alors que la plupart le suggère pour des raisons économiques mais cette suggestion reste relative, et l'avenir est cependant tracé pour la maintenance conditionnelle. [58, 59, 68-70]

b.2- Maintenance conditionnelle : Ce type de maintenance est basé sur l'induction scientifique, inclut le principe fondamental des sciences expérimentales, l'interaction permanente entre l'observation de faits réels et l'élaboration de théories bien spécifiées. Pour une machine ; elle permet de déceler d'une part quel organe mécanique sujet d'une anomalie et qui devrait être remplacé et d'autre part, la date d'intervention. Il est bien évident pour faire de telles prédictions, il est nécessaire de comprendre le comportement (cinématique et dynamique) interne de la machine et l'interprétation des phénomènes vibratoires résultants. Il est quasiment impossible de prédire l'avenir d'une machine sans connaître son état de santé au temps précis par rapport à un état de référence initial.

Les avantages de ce type de maintenance se résument comme suit :

- Elimination d'arrêts imprévus ;
- Elimination des dommages secondaires (dégradation d'un élément entraîne un autre) ;
- Elimination du gaspillage de pièce de rechange ;
- Réduction du stock de pièce de rechange et du personnel ;
- Réduction de nombre d'arrêts (en profitant des arrêts planifiés) ;
- Amélioration de la sécurité des personnels et la qualité de service.

Les avantages de la maintenance conditionnelle sont tellement évidents qu'elle devrait être implantée dans la plupart des entreprises. [64, 65, 67, 69, 70]

b.3- Maintenance prévisionnelle : C'est une technique de prévention subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions.

c-Maintenance corrective : La maintenance corrective est une méthode qui se traduit par des interventions non planifiées et qui n'aura lieu que si l'état d'une machine se dégrade complètement, elle est appelée aussi « fonctionnement jusqu'à la rupture » ou « arrêt sur panne ».

c.1- Maintenance palliative : Ce type de maintenance est défini comme étant l'ensemble des activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelée couramment dépannage, cette technique est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.

c.2- Maintenance curative : Définie comme l'ensemble des activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou lui permettre d'accomplir une fonction requise.

1.2.2. Tâches de maintenance

La classification et le contenu des tâches de maintenance doivent être définis clairement pour identifier les compétences des différents intervenants amenés à réaliser la maintenance des

équipements. [67]. En général, les tâches se résument en opérations de : Contrôle ; inspection ; essais; visite ; révision.

1.2.3. Niveaux normalisés de maintenance

Une politique de maintenance bien définie doit clairement identifier les niveaux de maintenance réalisés à l'intérieur de l'entreprise et ceux confiés au tiers. Ils permettent en outre d'identifier le niveau de diagnostic auquel on s'intéresse : systèmes, sous-systèmes, matériels, composants élémentaires. D'une manière générale, il existe cinq niveaux de maintenance : [58]

- a- **Premier niveau réglage simple** : Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité (fusibles etc.).
- b- **Deuxième niveau « dépannage »** : Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventive, telles que le graissage ou le contrôle de bon fonctionnement.
- c- **Troisième niveau « identification et diagnostic »** : Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels. Réparations mécaniques mineures, et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réaligement des appareils de mesures.
- d- **Quatrième niveau « maintenabilité »** : Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesures utilisés pour la maintenance, et éventuellement la vérification des étalons de travail par les organismes spécialisés.
- e- **Cinquième niveau « rénovation et reconstruction »** : Rénovation, reconstruction ou exécution des opérations importantes confiées à un atelier central ou à une unité extérieure.

1.2.4. Méthodes de surveillance des machines

Le terme de surveillance de l'état d'une machine regroupe l'ensemble des opérations qui permettent de quantifier la capacité d'un matériel à remplir sa fonction par rapport à des caractéristiques et consignes définies soit au départ soit au cours de fonctionnement.

Le principe consiste à établir un diagnostic en choisissant un ou plusieurs paramètres de fonctionnement mesurables, à un instant, et à comparer de façon statistique ces paramètres à des données standards caractérisant la présence d'anomalies de fonctionnement.

Ce diagnostic présente donc l'intérêt de permettre la détermination de l'instant où commence une dégradation, et de décider ainsi de l'intervention au moment optimal. La Figure 1.4 regroupe les méthodes utilisées dans l'industrie pour effectuer des opérations de surveillance:

Surveillance traditionnelle : Ces méthodes contiennent celles qui sont utilisées depuis longtemps par les personnels de maintenance. Parmi celles-ci, on trouve la mesure de température, de pression etc.

A titre d'exemple, si on considère la surveillance par mesure de la température, cette méthode ne permet pas de faire un diagnostic précis car elle exige fortement une surveillance continue, d'où la limitation de cette technique. Finalement on peut dire qu'il existe au moins une ou d'autres méthodes qui permettent de faire un diagnostic. [29, 58, 59, 66, 67, 70]

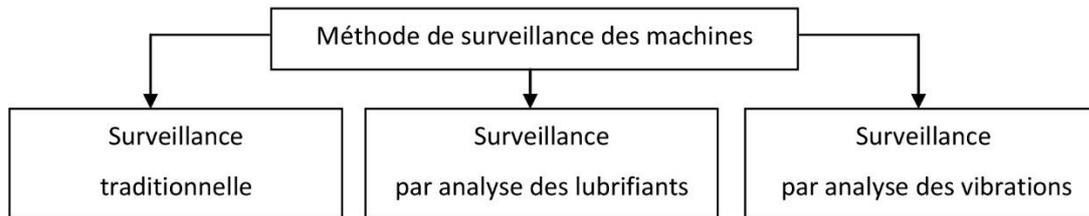


Figure 1.4: Méthodes de surveillance des machines

Surveillance par analyse de lubrifiant : Cette méthode est appliquée en temps différé et basée sur l'analyse de la dégradation et de la contamination des huiles qui se produit par oxydation et entraîne une altération des caractéristiques des lubrifiants ainsi que la formation de dépôts susceptibles d'obstruer les canalisations d'huile. [67, 70-72]. En fin la contamination des lubrifiants, son taux et sa nature sont des éléments riches en information sur l'état mécanique de la machine. Pour l'analyse, il existe deux types d'examen des huiles, qui sont : Les examens physico-chimiques et les examens spectroscopiques.

Cette méthode présente certains avantages sur l'analyse des vibrations telle que la détection de micropitting. Mais elle présente aussi des inconvénients qui sont :

- Difficulté d'établir un catalogue regroupant toutes les pièces susceptibles de s'user.
- Impossibilité de prévoir les avaries à évolution rapide.

Les ajustements des machines modernes sont de plus en plus précis dans le souci de diminuer les usures. De ce fait, l'analyse doit être de plus en plus grande et c'est elle qui fixe la résolution de la surveillance des machines par l'analyse d'huile. [57, 71, 72]

Surveillance par analyse de vibrations : Cette méthode est appliquée au cours de fonctionnement de la machine, elle consiste à analyser les vibrations produites par les pièces en mouvement en :

- Comparent le niveau vibratoire à un seuil fixé au préalable,
- Mettent en œuvre l'analyse temporelle,
- Mettent en œuvre l'analyse fréquentielle et ses dérivées, spécifiques à la surveillance d'un type précis de machine ou d'un organe mécanique particulier (roulement, engrenage, courroies etc.) [58, 59, 67]

1.2.5. Choix du type de maintenance

Vue que les machines deviennent complexes et leurs fonctionnements plus critique. On constate que la maintenance conditionnelle est plus économique que n'importe quel autre type de maintenance. [3, 58, 66]. Et en se basant sur le coût d'intervention et d'échec, des arguments

scientifiques assez justifiés par des démonstrations purement mathématiques faites par S. Luce [73], dans le cadre du choix des critères dans la maintenance ont montré que la maintenance conditionnelle est deux fois plus économique que d'autres types de maintenances et spécialement la maintenance systématique.

1.2.6. Règles générales des stratégies de surveillance

Mettre en place d'une stratégie de surveillance nécessite de sélectionner les machines à surveiller et de valider de cette sélection sur les plans techniques et économiques [74-78]. Ainsi, le choix de la surveillance par analyse des vibrations pour des machines susceptibles des éventuelles pannes est justifié par l'aspect économique et de sécurité. Cette réflexion doit être menée en analysant le coût réel de chaque panne, en considérant les coûts directs de la réparation, et les coûts indirects et qui représentent, la partie la plus importante des pertes enregistrées représenté par la Figure 1.5 [74-78]. De cette réflexion sur les conséquences réelles d'une panne, doit découler, de façon plus ou moins évidente pour la détermination des quelques machines réellement stratégiques. Cette détermination est facilitée par l'utilisation des lois statistiques et, notamment, le diagramme de Pareto de la Figure 1.6 [74-78]. La surveillance se limite alors aux 20% de machines (Zone A) représentant 80% des coûts d'arrêt pour une panne et, éventuellement, aux machines de la Zone B, auxquelles il faut ajouter les machines à problèmes (panne fréquente, démontage difficile) et les machines dangereuses.

1.2.7. Règles spécifiques à la détection

Choix du type de suivi : Le choix s'effectue parmi les types de suivi suivants : le suivi des indicateurs en mode global large bande, le suivi des indicateurs en mode global par bandes de fréquences, le suivi de la forme spectrale des indicateurs par comparaison avec un gabarit, et le suivi des indicateurs spécifiques aux roulements. Il est dicté par :

- Le type de défaut redouté, dans le cas des roulements, on utilise les indicateurs spécifiques aux roulements.
- Le niveau de fiabilité recherché, il est souvent lié au caractère stratégique de la machine surveillée, sur le plan de la production ou de la sécurité.
- La complexité cinématique de la machine, cette complexité accroît le nombre et le type de défauts redoutés et nécessite, de ce fait, une plus grande finesse dans la détection.
- Le suivi des indicateurs spécifiques aux roulements, ne s'applique qu'à la surveillance des roulements. Il y a un risque de confusion si des défauts sur d'autres organes sont susceptibles de se manifester en hautes fréquences. De plus la détection n'est plus fiable que si la machine tourne à une certaine vitesse.
- Le suivi en mode global large bande, présente un risque d'effet de masque, qui a tendance à ne mettre en évidence que les défauts d'amplitude élevée ; or, ceux-ci ne sont pas toujours les plus graves.

- Le suivi de la forme spectrale des indicateurs par comparaison avec un gabarit, ce type de suivi est la méthode de détection la plus fine, même si elle ne permet pas d'observer les phénomènes de modulation, souvent seuls à pouvoir mettre en évidence certains défauts.



Figure 1.5: Iceberg des coûts

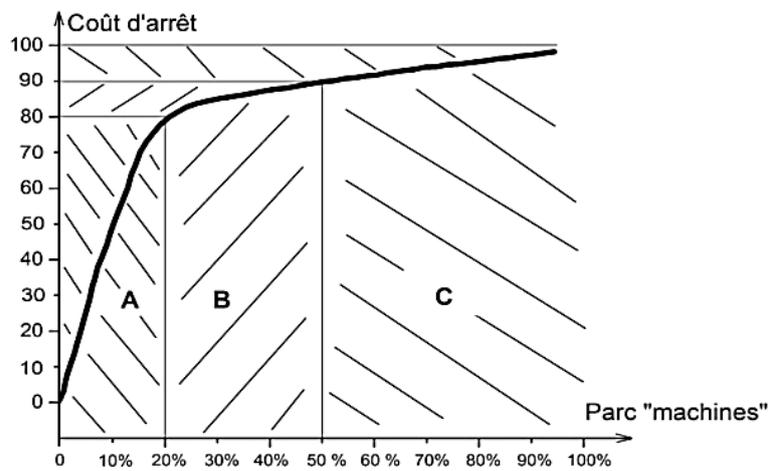


Figure 1.6: Diagramme de Pareto (loi des 80/20)

Choix des indicateurs : Selon les défauts redoutés, on choisira le ou les indicateurs les mieux appropriés, en s'aidant du Tableau 1.1 [58, 59, 74], il faut noter que le choix des indicateurs d'amplitude (x , \dot{x} et \ddot{x}) ne doit pas être confondu avec le choix du capteur.

		Indicateurs
Quelques exemples d'organes surveillés	Roulements	Accélération Kurtosis, Skew, Facteur de Crête Démodulation d'amplitude Cepstre
	Engrenages	Accélération Cepstre Démodulation d'amplitude Kurtosis
	Paliers fluides	Déplacement (relatif ou absolu)
Nature des vibrations générées	Vibrations de type Impulsionnel	Accélération Kurtosis, Skew, Facteur de Crête Cepstre Démodulation d'amplitude
	Vibration de type Sinusoïdal	Déplacement, vitesse ou accélération, selon la fréquence observée
Plage de Fréquences où le défaut est plus facilement identifiable	Basses fréquences	Déplacement ou vitesse
	Moyennes fréquences	Vitesse ou accélération
	Hautes fréquences	Accélération

Tableau 1.1: Choix des indicateurs

Evolution des indicateurs : L'évolution dans le temps d'un indicateur est souvent représentée par une courbe, accompagnée parfois d'une courbe de tendance extrapolée qui indique la pente de la dégradation et permet, en théorie, d'estimer ainsi une date présumée de défaillance (maintenance prédictive). Cependant, l'évolution d'un seul indicateur est souvent insuffisante pour identifier et suivre un défaut, notamment si le suivi se fait simplement en mode global.

En effet, le processus de dégradation d'une machine est parfois complexe et ne peut être représenté, que par l'évolution de plusieurs indicateurs. En comparant, l'évolution des différents indicateurs classiques du Tableau 1.2 [58, 59, 74], on peut avec des moyens simples se faire une première idée des types de défauts qui affectent une machine.

1.2.8. Différentes étapes du diagnostic

Les principales étapes du diagnostic, les plus communément utilisées sont :

- Etude approfondie de la cinématique de l'installation.
- Prise de mesure.
- Recherche de phénomène de modulation.
- Recherche de chocs.
- Identification de l'origine des chocs et des modulations.
- Détermination des déphasages.
- Identification des anomalies.
- Analyse de la sévérité des anomalies.

Déplacement	Vitesse	Accélération	Chocs	Défauts
				Balourd désalignement
				Usure d'accouplement
Roulement				
				Usure régulière
				Mauvais graissage
				Début d'écaillage
				Dégradation importante

Tableau 1.2: Evolution des indicateurs de suivi en mode global

1.2.9. Choix d'une stratégie de surveillance

Les questions déterminantes relatives au choix de la stratégie de surveillance en maintenance conditionnelle par analyse des vibrations sont représentées par la Figure 1.7. [58-63, 69, 74, 79]

1.2.10. Conclusion

Dans cette première partie du chapitre, on a introduit quelques notions de bases sur la maintenance industrielle, de la définition jusqu'au stratégies de la mise en place d'une maintenance planifié avec un minimum garantit d'informations ; et cela dans le but de tracer et orienter les idées vers la maintenance préventive voir conditionnelle afin de justifier l'utilisation de la signature vibratoire comme une technique puissante et complexe, à cet effet il s'avère que l'analyse des vibrations est la technique la plus diversifiée, la mieux codifiée et celle qui permet, sur les machines tournantes, d'aller le plus loin dans le diagnostic.

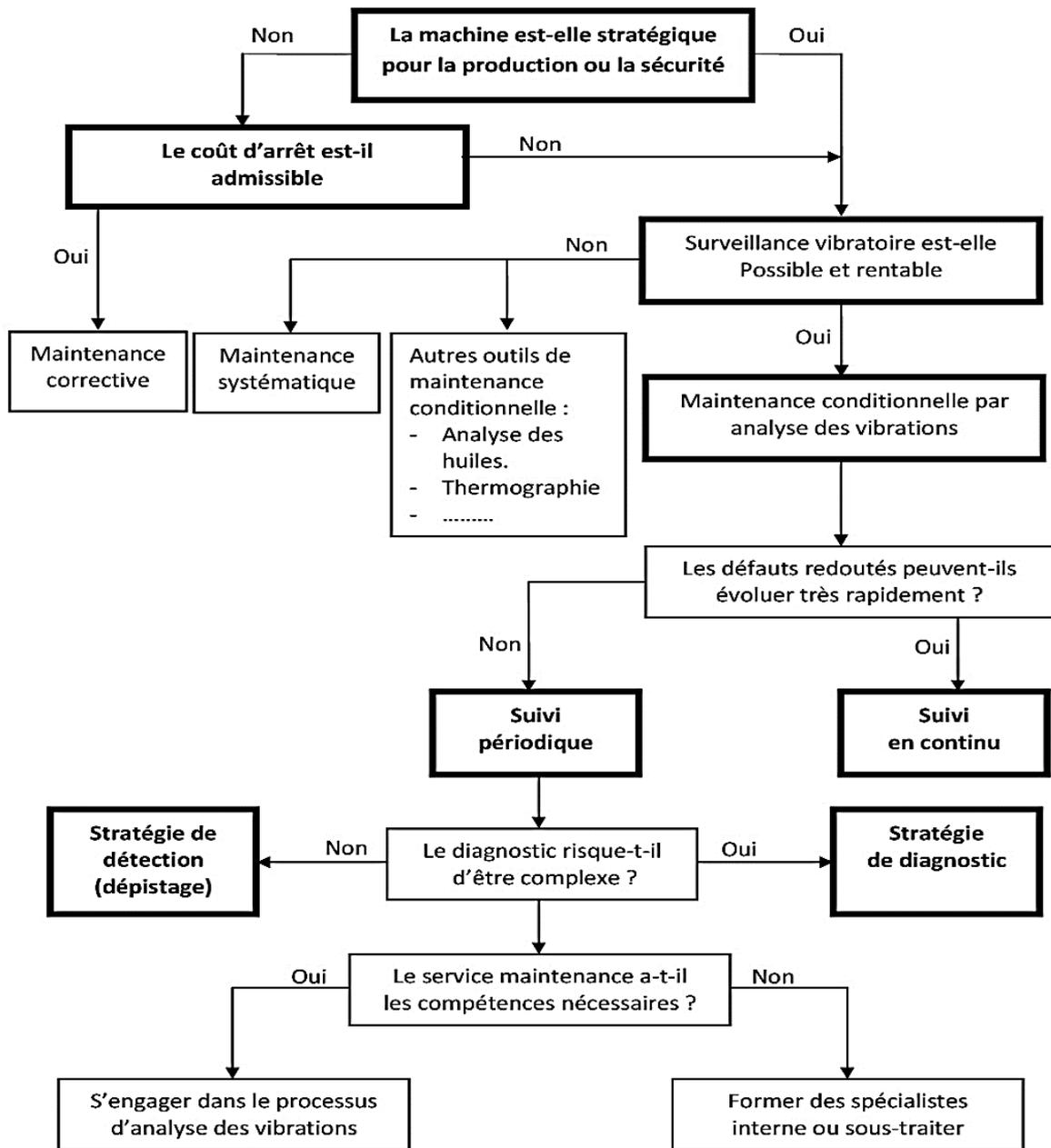
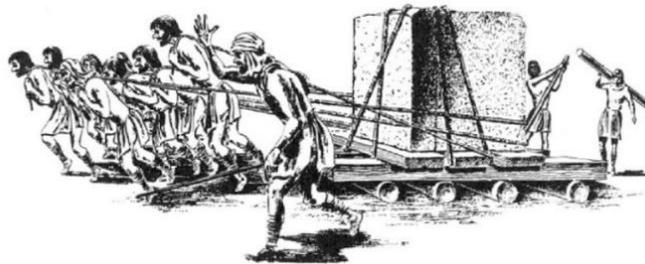


Figure 1.7: Choix d'une stratégie de surveillance

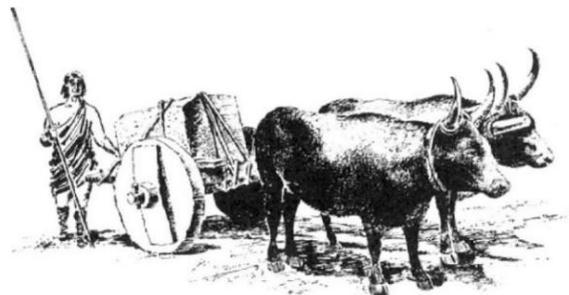
1.3. Défauts des organes mécaniques de transmission.

1.3.1. Les roulements

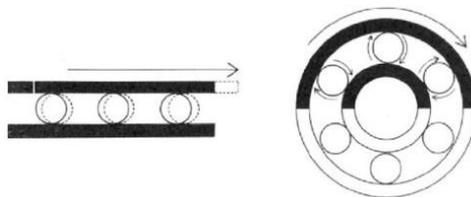
Après l'invention de la roue, il a été appris que moins d'effort était nécessaire pour déplacer un objet sur des rouleaux que pour le faire glisser sur la même surface. Même après que la lubrification ait été découverte pour réduire le travail nécessaire au glissement, le mouvement de roulement exigeait moins de travail quand il pouvait être utilisé. Par exemple, des preuves archéologiques montrent que les Egyptiens, 2400 avant J.C., ont employé la lubrification, probablement l'eau, pour réduire la main-d'œuvre requise pour traîner des traîneaux portant des pierres et des statues énormes. Cependant, Les Assyriens, 1100 avant J.C. utilisaient des rouleaux sous les traîneaux pour obtenir un résultat similaire avec moins de main-d'œuvre. Il était donc inévitable que des roulements utilisant le mouvement de roulement soient développés pour être utilisés dans des machines et des mécanismes complexes. La Figure 1.8 décrit, de manière simpliste, l'évolution des roulements [80-82].



Les Assyriens, en 1100 avant J.C., avaient utilisés les rouleaux pour déplacer des pierres massives.



Plus tard, avec des roues de charrette, l'homme s'est efforcé de surmonter la force de frottement.



Le simple roulement à billes pour bicyclettes du 19ème siècle a marqué la première victoire importante de l'homme.

Figure 1.8: L'évolution des roulements à travers l'histoire

Dowson [83] a présenté un aperçu complet sur l'histoire des roulements et de la lubrification en général. Bien que le concept de mouvement de roulement ait été connu et utilisé pendant des milliers

d'années, des formes simples de roulements ont été utilisées. 50 ad pendant la civilisation romaine, l'utilisation générale des roulements n'a pas eu lieu jusqu'à la révolution industrielle 18^{ème} siècle. Cependant, Reti [84], montre que Léonard de Vinci (1452-1519 ad), dans son Codex Madrid, a conçu diverses formes de paliers de pivot qui avaient des éléments roulants et même un roulement à billes Figure 1.9 avec un dispositif pour espacer les billes Figure 1.10 (prototype INSA-Lyon) . En fait, Leonardo, qui parmi ses réalisations prolifiques a étudié la friction, a déclaré [85, 86]:

J'affirme que si un poids de surface plane se déplace sur un plan similaire, leur mouvement sera facilité en interposant entre eux des billes ou des rouleaux; et je ne vois aucune différence entre les billes et les rouleaux, sauf le fait que les billes ont un mouvement universel tandis que les roulettes peuvent se déplacer dans une seule direction. Mais si des billes ou des rouleaux se touchent dans leur mouvement, ils rendront le mouvement plus difficile que s'il n'y avait pas de contact entre eux, parce que leur contact est par des mouvements contraires et que ce frottement provoque des mouvements contraires.

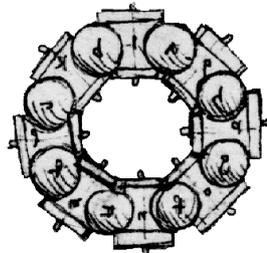


Figure 1.9: Premier roulement conçu par Léonard de Vinci

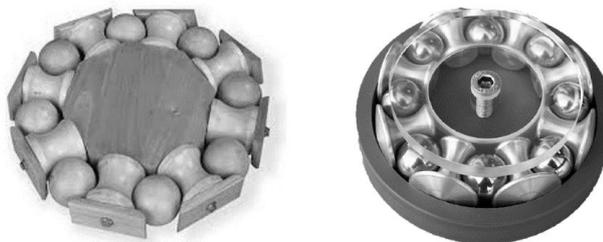


Figure 1.10: Prototype du roulement inspiré par Léonard de Vinci

Les paliers à roulements sont des constituants mécaniques qui assurent une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme, en rotation l'un par rapport à l'autre. Leur fonction est de permettre la rotation relative de ces éléments, sous charge, avec précision et avec un frottement minimal.

L'idée de remplacer le frottement de glissement par celui de roulement remonte aux civilisations les plus anciennes et développée à travers le temps ce qui a donné la configuration actuelle du roulement montrée par la Figure 1.11

A partir de 1960, la lubrification est introduite dans la conception du roulement ce qui a permis aujourd'hui que de nombreuses machines tournantes sont conçues à partir de cet organe mécanique vital de transmission de mouvement.



Figure 1.11: Forme d'un roulement

(a) : roulement à billes (b) : roulement à rouleaux

Les roulements se différencient par leur type : forme des éléments roulants, conception interne; par leurs dimensions : étroits ou larges, légers ou forts et par leur alésage qui indique la dimension de l'arbre et aussi par le mode de fonctionnement charges et vitesses.

Ces caractéristiques sont fixées par une norme et symbolisées par un code pour chaque roulement. [87-89]

L'illustration de la Figure 1.12 est une représentation schématique d'un roulement le plus répandu et utilisé dans l'industrie. Il est constitué des éléments suivants [87]:

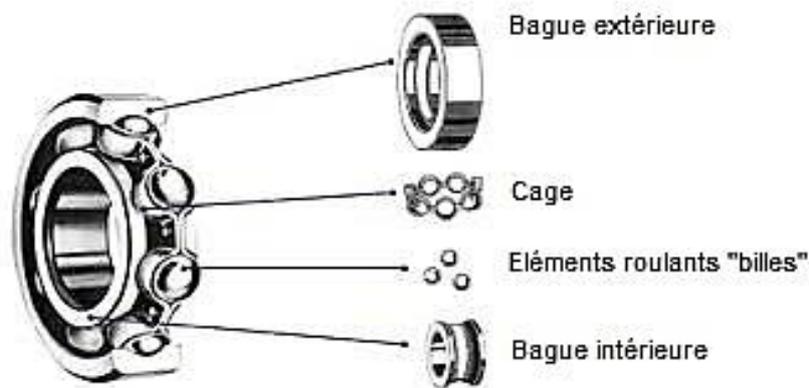


Figure 1.12: Eléments constituant un roulement

- Une bague intérieure, qui peut être fixe, ou tourne à une vitesse ω .
- Une bague extérieure qui peut être fixe, ou tourne à une vitesse ω .
- Des éléments roulants « des billes ou des rouleaux », permettant le déplacement relatif des deux bagues avec un frottement minimal.
- Une cage guidant et séparant les éléments roulants.

Cependant, comme tout composant mécanique, les éléments du roulement peuvent se détériorer et ont une durée de vie finie, c'est pourquoi il faut penser à changer totalement le roulement au bon moment.

1.3.2. Défaillances des roulements

En général, les tâches d'une maintenance préventive sont basées sur le temps ou les heures d'opération[70]. La Figure 1.13 illustre un exemple de la vie statistique d'une machine [90]. La courbe TF (Mean-Time-To-Failure) ou baignoire indique qu'une nouvelle machine présente une forte probabilité de défaillance en raison de problèmes d'installation au cours des premières semaines de fonctionnement. Après cette période initiale, la probabilité d'échec est relativement faible pendant une période prolongée. Après cette période de vie normale de la machine, la probabilité de défaillance augmente fortement avec le temps écoulé. Dans la gestion de la maintenance préventive, les réparations ou reconstructions de machines sont planifiées en fonction de la statistique MTTF.

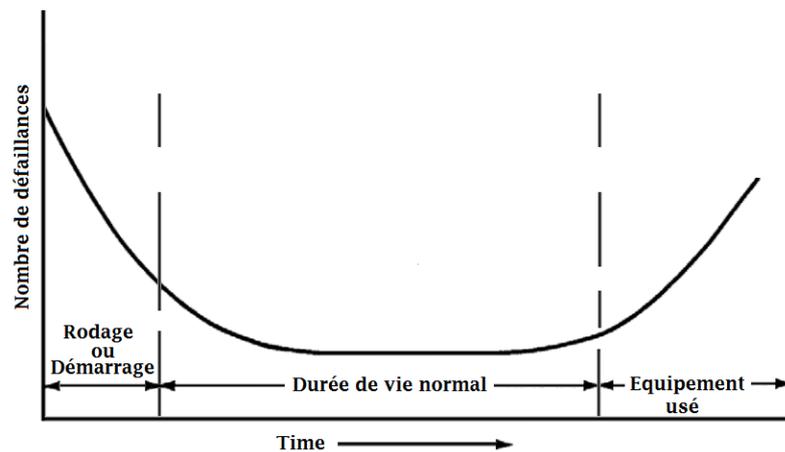


Figure 1.13: Durée de vie « MTTF » d'une machine

Comme indiqué dans les travaux spécialisés, les diverses défaillances dans les paliers sont liées principalement à l'usure, donc on peut conclure qu'une grande partie des composants des machines lubrifiées subiront des dommages dus à l'usure par suite d'une panne de lubrification. Les roulements ne font pas exception. Selon l'expérience, l'extrémité ultime de tous les paliers à roulements serait la fatigue qui est liée directement à MTBF « moyen temps de bon fonctionnement ». Ainsi, dans n'importe quel montage à éléments roulants, si tous fonctionnaient dans des conditions identiques jusqu'à ce que tout se rompe par fatigue, il y aurait une dispersion considérable entre les « vies » les plus longues et les plus courtes [91]. La Figure 1.14 montre la tendance de dispersion de la durée de vie pour un groupe de roulements fonctionnant sous les mêmes conditions [70]. En bref, si les roulements sont correctement conçus et utilisés, les roulements échoueront tôt ou tard en mode d'usure, les paliers lisses dureront presque indéfiniment.

Les causes typiques de défaillance de palier ont été élaborés par Allianz Insurance de Munich, Allemagne [70]. Le Tableau 1.3 contient les résultats des recherches sur les causes de 1400 défaillances de roulements et 530 défaillances de paliers lisses. On peut voir que pour ces composants, environ 30% des défaillances fonctionnelles sont dues à des processus liés à l'usure ou à la lubrification.

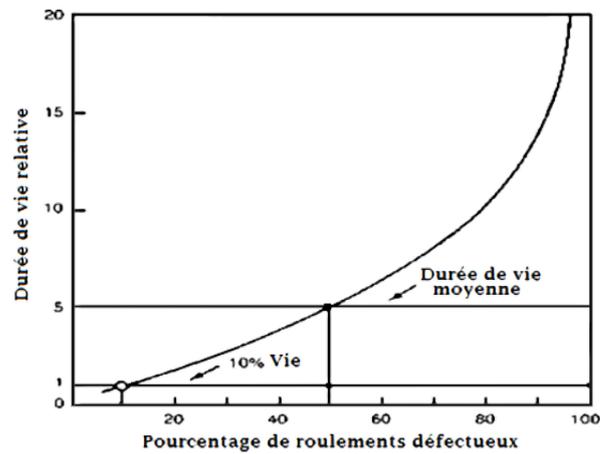


Figure 1.14: Courbe de dispersion de la durée de vie des roulements « MTBF »

Cause de défaillance	Roulements [%]	Paliers lisses [%]
Problèmes de fournisseur	30.1	23.4
Fonctionnement	14.4	10.7
Erreurs dans la conception / les applications	13.8	9.1
Mauvais matériau de construction	1.9	3.6
Problèmes induits par l'utilisateur, maintenance.	65.9	69.6
Défaillance de l'équipement de surveillance	37.4	39.1
Usure	28.5	30.5
Problèmes externes Lubrifiants contaminés	4.0	7.0
Défaillance du système d'alimentation en huile	4.0	7.0

Tableau 1.3: Défaillances roulements/paliers lisses

Le Tableau 1.4 résume les différents défauts de roulements avec les causes les plus probables (SKF Bearing Company - Engineering Data Manual, King of Prussia, Pennsylvania) [70]

La plupart des défaillances peuvent être attribuées à une ou plusieurs des causes suivantes:

1. Lieux d'appui défectueux sur les arbres et dans les logements.
2. Mauvais alignement.
3. Pratique inapproprié de montage.
4. Ajustement incorrect de l'arbre et du logement.
5. Lubrification Inadéquate.
6. Joint inefficace.
7. Vibration lorsque le roulement ne tourne pas.
8. Passage du courant électrique à travers le palier.

		Causes de défaillance												
		Fracture			Déformation			Usure			Erosion			
		Ecaillage	Fissures	Dimensions fermées	Déformation	Enroulements	Chargé inégale	Marquage des galets	Echauffement → Surchauffe	Usure	Usure abrasive / rayure / rainurage	Erosion	Cavitation	Corrosion
Assemblage et fabrication	Jeu Insuffisant			•					•					
	Palier mal alignée				•		•							
	Finition de surface rugueuse								•	•				
	Pores et cavités dans le palier métallique.	•	•											
Conditions de fonctionnements et conception	Conditions de fonctionnement											•	•	
	Surcharge/fatigue	•	•										•	
	Surcharge/vibration	•	•	•				•	•	•		•	•	
	Passage du courant électrique											•		•
	Mauvais choix du matériau de roulement.			•						•				
Lubrification	Contamination du lubrifiant			•		•		•	•	•				•
	Manque/Insuffisant de lubrifiant		•	•	•			•	•	•	•			
	Viscosité trop faible									•				
	Viscosité trop élevée									•				
	Mauvaise choix de lubrifiants							•						
	Détérioration du lubrifiant									•				•

Tableau 1.4: Défauts de roulements avec leurs causes (SKF)

1.3.2.1. Fréquences caractéristiques des roulements:

Les fréquences caractéristiques d'un roulement « Figure 1.15 » en fonctionnement normal sans glissement sont données par les formules du Tableau 1.5 [42, 74, 92].

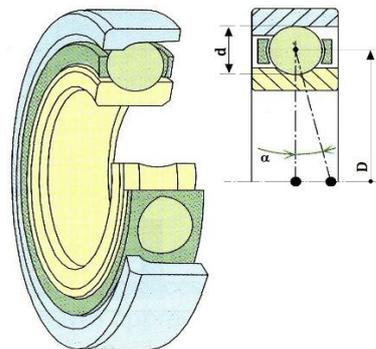


Figure 1.15: Caractéristiques géométriques d'un roulement

Fréquence de la cage	$f_c = \left(\frac{f_r}{2}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \cdot \cos \alpha\right]$
Fréquence de la bague extérieure	$f_{be} = Z \cdot \left(\frac{f_r}{2}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \cdot \cos \alpha\right]$
Fréquence de la bague intérieure	$f_{bi} = Z \cdot \left(\frac{f_r}{2}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{D}\right) \cdot \cos \alpha\right]$
Fréquence de l'éléments roulant	$f_{er} = f_r \cdot \left(\frac{d}{D}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{D}{d}\right)^2 \cdot \cos \alpha\right]$
α : Angle de contact, d [mm]: Diamètre de la bille, D [mm] : Diamètre moyen au centre de la bille, Z : Nombre de billes, f_r [Hz]: Fréquence de rotation, ($f_r = n/60$), n (tr/min) : vitesse d'arbre	

Tableau 1.5: Fréquences caractéristiques d'un roulement

1.3.2.2. Fréquences de modulation :

Les fréquences de modulations qui caractérisent la nature du défaut sont données par la Tableau 1.6 [74, 92].

N°	Type de défaut	f_m	Commentaire
1	Révolution autour de la bague extérieure (fixe)	f_r	
2	Tension radiale du roulement	$2^* f_r$	
3	Désalignement de la bague extérieure	$2^* f_{be}$	
4	Usure de la bague extérieure	f_{be}	
5	Fissures sur la bague extérieure	$k^* f_{be}$; $k=1,2,3...$	
6	Usure de la bague intérieure	$k^* f_r$; $k=1,2,3...$	Décroissance d'amplitude avec l'augmentation de k
7	Fissures sur la bague intérieure	$k^* f_{bi}$; $k=1,2,3...$	
8	Usure de la cage et des éléments roulants	f_c or $(f_r - f_c)$	
9	Des éclats sur des éléments roulants	$k^* f_{er}$; $k=1,2,3...$	
10	Défauts de plusieurs surfaces du roulement	$f_{be} + f_{bi}$ ou $f_{be} + f_r$ ou $(f_r - f_c)(N_b+1)$	Non : $f_{or} - f_r$ Non : $(f_{cage} - f_r)(N_b-1)$
11	Glissement de la bague dans son logement	$k^* f_r$; $k=1,2,3...$	Il n'y a pas de fréquences de modulation
12	Défauts de lubrification		Augmentation du niveau globale de vibration
f_m : Fréquences caractéristiques de modulation, f_r : Fréquence de rotation, f_c : Fréquence de la cage f_{be} : Fréquence de bague extérieure, f_{bi} : Fréquence de la bague intérieure, f_{er} : Fréquence de l'élément roulant N_b : Nombre de l'élément roulant "Bille ou Rouleau"			

Tableau 1.6: Fréquences de modulation des roulements

1.3.3. Les engrenages et leurs défaillances

1.3.3.1. Caractéristiques géométriques des roues dentées:

La roue dentée de la Figure 1.16 est un des deux éléments qui composent un système de transmission dit : engrenage, La roue qui a le moins de dents est appelée pignon, d'un point de vue du mouvement cinématique, les deux caractéristiques importantes sont le module m , le nombre de dents z et le rayon r , ce qui permet de définir, dans un engrenage, le rapport des vitesses et le rapport des efforts (démultiplication).

Les caractéristiques géométriques des roues dentées sont données par le Tableau 1.7 avec les formules valables pour une denture normalisée [87-89, 93].

Les caractéristiques d'un engrenage sont le :

- Module;
- Nombre de dents;
- Diamètre primitif voir Figure 1.16 ;
- Entraxe entre les deux roues voir Figure 1.16.

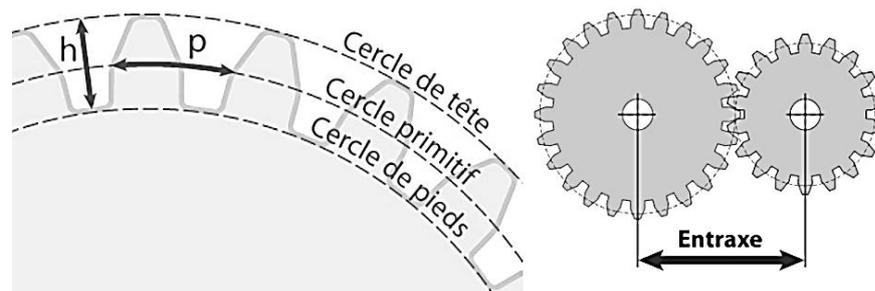


Figure 1.16: Géométrie d'une roue dentée

Désignation	Symbole	Relation
Module	m	-
Nombre de dents	z	-
Diamètre primitif	d_p	$d_p = m \cdot z$
Diamètre de tête	d_a	$d_a = d_p + 2 \cdot m$
Diamètre de pied	d_f	$d_f = d_p - 2,5 \cdot m$
Pas primitif	p	$p = \pi \cdot m$
Crête	h_a	$h_a = m$
Creux	h_f	$h_f = 1,25 \cdot m$
Hauteur de denture	$h = h_a + h_f$	$h = 2,25 \cdot m$
Largeur de dent	b	$b = k \cdot m$ $k =$ entre 6 et 10
Entraxe	a	$a = (m/2) \cdot (z_1 + z_2)$

Tableau 1.7: Caractéristiques géométriques d'une denture

1.3.3.2. Défaillance des engrenages

Les détériorations superficielles de dentures d'engrenages, qui se produisent au niveau des dentures d'engrenages ont différentes causes [94] :

- Usure
- Corrosion
- Surchauffe
- Etincelage
- Erosion par cavitation
- Fatigue de surface

Les différentes avaries liées à la corrosion sont représentées la Figure 1.17 :

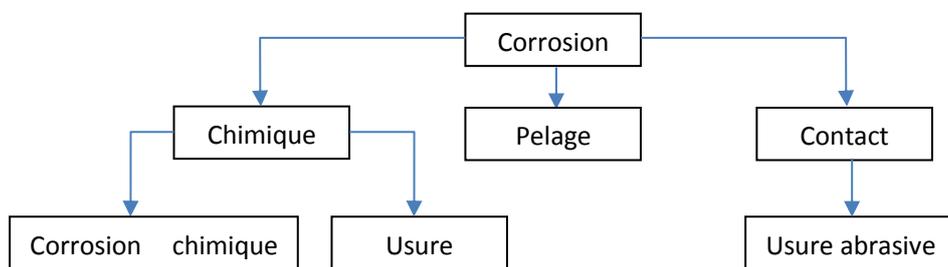


Figure 1.17: Avaries de corrosion de denture d'engrenages

Les différentes avaries de fatigue de surface de denture d'engrenage sont données par la Figure 1.18 :

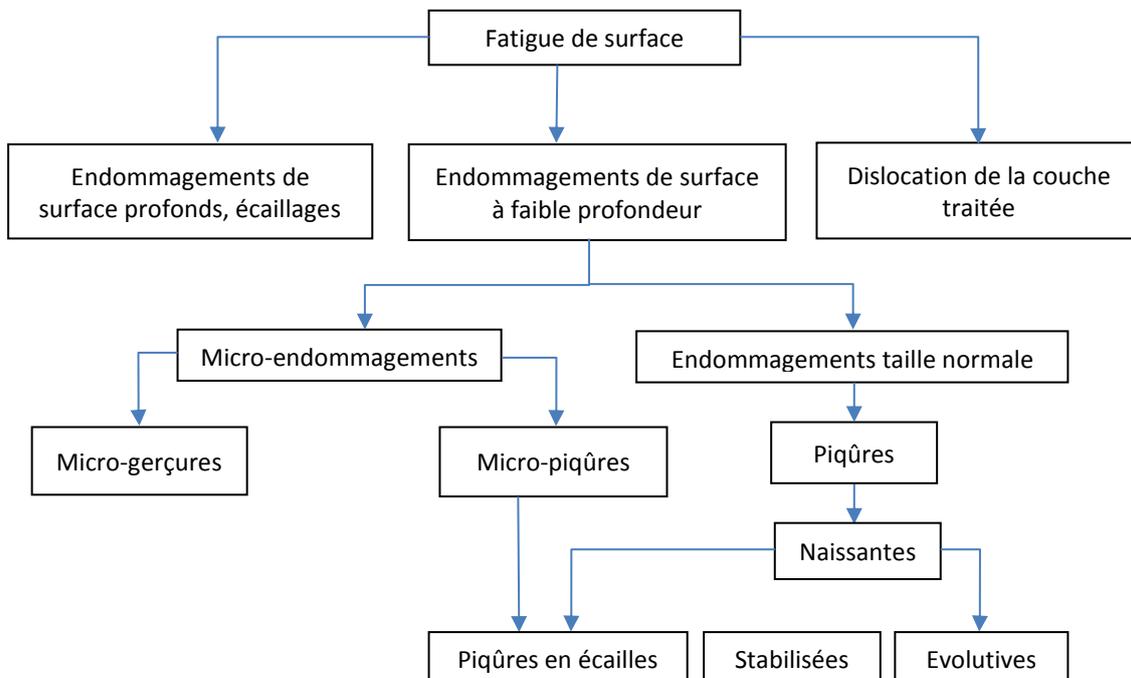


Figure 1.18: Avaries de fatigue de surface de denture d'engrenage

Les phénomènes à l'origine des différentes défaillances des dentures d'engrenages sont récapitulés dans le Tableau 1.8: des causes des avaries de denture (NA : non avarie)

Usure	abrasion à 2 corps	usure courante, NA	Contact par glissement métal sur métal.
		stries	Charge élevée.
	usure par adhésion	poli miroir, NA	Mise en fonctionnement des engrenages sous charge.
		Arrachements	Déformation du support des engrenages. Baisse de la viscosité ou insuffisance temporaire de lubrifiant. Surcharges occasionnelles imprévisibles et brutales. Passage d'un corps étranger.
		grippage à chaud	Pression élevée. Vitesse de glissement élevée. Surchauffe excessive. Rupture du film d'huile.
	usure à trois corps	grippage à froid	Pression élevée. Vitesse de glissement faible.
		griffures, sillons	Grosses particules de poussières. Particules métalliques. Parcelles de rouille. Sable de moulage.
	usure abrasive	usure abrasive	Fines particules abrasives dans le lubrifiant.
Usure par interférence		Mauvaise conception. Surcharges entraînant une flexion exagérée. Profil avec surépaisseur. Un ou plusieurs dents déformées, abîmées, ou fissurées.	
Corrosion	Corrosion chimique, rouille	Additif ou acides dans le lubrifiant réagissant en présence d'eau. Produits contaminants générant une composition défavorable. Association d'une teneur en eau inadmissible.	
	Pelage	Phénomènes d'oxydation produits au cours des traitements thermiques.	
	Corrosion par contact	Arrêts prolongés avec secousses et ou vibrations. Formation d'oxydes très abrasifs.	
Surchauffe	Surcharge. Survitesse. Lubrification insuffisante. Association des trois causes précédentes.		
Erosion par cavitation	Grande vitesse. Mouvement relatif entre les flancs conjugués dans direction \pm surfaces (vibrations de services). Présence d'eau ou de gaz dans le lubrifiant.		
Etincelage	Passage d'un courant électrique.		
Usure par fatigue	Endommagements de faible profondeur	micro-gerçures NA	Film du lubrifiant un peu faible. Rugosité trop importante.
		micro-piqûres	Charge trop élevée en surface.
		piqûres	Ecart de distorsion des dents sous charge. Ecart de profil des dents sous charge. Irrégularités locales de surface. Erreurs d'alignement des axes.
		piqûres en écailles	Défaut de portée. Bombé trop important. Excès de matière localisé sur la surface de la dent.
	Ecaillage	Pression superficielle supérieure à la limite d'endurance du matériau.	
	Dislocation de la couche traitée	Profondeur traitée insuffisante.	

Tableau 1.8: Récapitulatif des Causes des avaries des dentures des engrenages

1.3.4. Indicateurs scalaires de surveillance

Les différents indicateurs scalaires utilisés dans la surveillance sont présentés dans le Tableau 1.9, pour une série de données $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ [39, 74, 80, 95-97]

Indicateur	Expression	Fonction Matlab
Moyenne Mean	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	M = mean(x)
Ecart type Standard deviation	$S_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$	S = std(A)
Variance	$V = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$	V = var(x)
Covariance	$cov(x, y) = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}). (y_i - \bar{y})$	C = cov(x, y)
Coefficient d'asymétrie Skewness	$Sk = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n} \right) / \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \right)^3 \quad (1)$	y = skewness(x)
Coefficient d'aplatissement Kurtosis	$Ku = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{n} \right) / \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \right)^2 \quad (2)$	Ku = Kurtosis(x)
Valeur Crête à Crête Peak to Peak	$P2P = \max(x_i) - \min(x_i)$	$(1) \quad Sk = \frac{E(x-\bar{x})^3}{\sigma^3}$ $(2) \quad Ku = \frac{E(x-\bar{x})^4}{\sigma^4}$ $(3) \text{ RMS / documents ISO}$ « Annexe 82 » $(4) \text{ CF : Brüel \& Kjaer [98]}$ Note d'application N°: BO0210 «Annexe 82 »
La valeur efficace Root Mean Square ⁽³⁾	$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$	
Facteur de crête Crest Factor ⁽⁴⁾	$CF = \frac{\max(x_i)}{RMS}$	
Facteur d'impulsion Impulse Factor	$IF = \frac{\max(x_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i }$	
Facteur de forme Shape Factor	$SF = \frac{RMS}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i }$	

Tableau 1.9: Indicateurs Scalaires de surveillance

1.3.5. Indicateurs d'hypothèse test

1.3.5.1. Jarque-Bera Test

Le test de Jarque-Bera est un test d'hypothèse qui cherche à déterminer si les données suivent une loi normale. Comme pour chaque test d'hypothèse, il faut poser une hypothèse nulle à valider [99]:

H_0 : les données suivent une loi normale.

H_1 : les données ne suivent pas une loi normale.

La variable de Jarque-Bera s'écrit

$$JB = \frac{n - k}{6} \left(Sk^2 + \frac{(Ku - 3)^2}{4} \right)$$

Où n : nombre d'observations et k : nombre de variables explicatives si les données proviennent des résidus d'une régression linéaire. Sinon, k = 0.

Fonction Matlab : $JB = jbstest(x)$

$H_0 : Sk = 0$ et $Ku = 3$ sinon $H_1 : S \neq 0$ ou $Ku \neq 3$

1.3.5.2. Approche de Cornish-Fisher

L'approximation de Cornish-Fisher permet de transformer le quantile, ou une réalisation, d'une loi normale en une réalisation d'une loi dont l'asymétrie et le kurtosis en excès ne sont pas nuls [100].

On approche la réalisation Z de la loi voulue telle que :

$$F(Z) = N(z_c)$$

F : est une fonction de répartition de la loi Z , N est la fonction de répartition de la loi normale et z_c est un quantile ou une réalisation de la loi normale,

On a:

$$Z = z_c + (z_c^2 - 1) \cdot \frac{Sk}{6} + (z_c^3 - 3 \cdot z_c) \cdot \frac{Ku}{24} - (2z_c^3 - 5z_c) \cdot \frac{Sk^2}{36}$$

Pour que cette transformation marche, elle doit être bijective. Une condition nécessaire et suffisante

pour cela est que la dérivée $\frac{dZ}{dz_c}$ ne s'annule pas, ce qui se traduit par

$$\frac{Sk^2}{9} - 4 \left(\frac{Ku}{8} - \frac{Sk^2}{6} \right) \cdot \left(1 - \frac{Ku}{8} + \frac{5Sk^2}{36} \right) \leq 0$$

1.3.6. Niveau vibratoire

Le niveau vibratoire est exprimé en décibels « dB » et désigné par L , est défini par la relation suivante et prend des valeurs normalisées suivant des normes mondiales « Annexe 82 »:

$$L = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)$$

Cette définition s'applique à toutes les grandeurs physiques proportionnelles à la puissance, la notation L , provient de l'anglais "level".

Le niveau d'accélération en log se définit par :

$$L_a = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{a}{a_{ref}} \right)$$

Dans le cas des vibrations aléatoires, ce sont les énergies vibratoires qui s'ajoutent, donc :

$$L_a = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{a^2}{a_{ref}^2} \right) \rightarrow L_a = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{a}{a_{ref}} \right)$$

1.3.7. Méthodes des mesures vibratoires

Le contrôle des machines tournantes par analyse vibratoire est couramment utilisé pour la surveillance des composants mécaniques (roulements, engrenages ...). Il s'agit de détecter l'apparition d'un défaut mécanique sans avoir à démonter la machine mais en exploitant les signaux vibratoires issus des accéléromètres mis en place pour le diagnostic.

En présence d'un éventuel défaut sur un roulement, ce dernier va émettre une vibration qui sera captée par les accéléromètres. Cependant, cette source de vibration peut être atténuée et

mélangée avec des sources vibratoires dues aux autres organes de la machine et à l'arrivée, il est fort probable qu'on ne pourra jamais distinguer cette signature, donc on ne pourra pas détecter ce défaut. Pour résoudre ce problème, il faudrait placer un capteur le plus proche possible des différents composants mécaniques constituant la machine, chose qui est impossible vu le coût très élevé des capteurs ; de plus, il n'est pas toujours possible de placer un transducteur là où on le souhaite compte tenu de la complexité de conception de ces machines. D'une manière générale, il existe deux types des méthodes de mesures :

Mesures spécifiques, qui est une méthode plus précise en matière d'acquisition où la réponse sera moins influée par les autres modes oscillatoires excités et d'ici la signature sera plus exploitable sans complexité d'analyse et de filtrage, mais elle est aussi onéreuse et compliquée.

Mesures globales, qui est une méthode moins précise en matière d'acquisition où la réponse sera influée par les autres modes oscillatoires excités et qui sont propagés à travers la structure d'où la naissance d'autres phénomènes non souhaités tel que le bruit blanc. Cette méthode n'est pas onéreuse car un seul capteur peut être utilisé pour plusieurs sources et de ce fait l'obligation de catégoriser les signaux spécifiques à chaque défaut s'impose ce qui implique la difficulté de traitement des signaux de roulements à travers une bande large de fréquences.

Les signatures vibratoires sont fortement affectées par la structure et aussi par la base et ainsi un mauvais diagnostic peut être établi du moment qu'une étude vibratoire « fréquences et modes propres » et mécanique « dimensions, formes, contraintes, » approfondie doit être menée au préalable pour déterminer toutes les fréquences et les modes propres pour chaque élément constituant la structure et par conséquent, beaucoup d'hypothèses mécaniques de simplification [101] ne seront faites tel que l'application du théorème de superposition, l'unicité de degré de liberté, type d'amortissement [102] ou autres .

1.3.8. Conclusion

Pour établir un diagnostic correct, il est impératif de détecter le lieu du défaut en se référant aux données des tableaux des fréquences caractéristiques et de modulations présentés dans cette partie de chapitre et qui servent à la programmation d'un algorithme de détection basé sur des fréquences de références.

Les données collectées pour le diagnostic et la détection concernent plus particulièrement les roulements et les engrenages sans tenir compte des autres organes de transmission tels que les courroies et les chaînes métalliques.

1.4. Conclusion au chapitre

Dans ce chapitre, on a présenté au premier lieu les bases de la maintenance industrielle, afin de justifier l'utilisation de la maintenance préventive voir prédictive par analyse des vibrations et aussi l'aspect économique qu'elle occupe dans la vie d'une usine, on se basant sur le modèle économique de Pareto et les règles mondiales de concurrences à savoir : le temps et l'argent en agissant par des méthodes efficaces, rapides et non coûteuses.

En deuxième lieu, on a présenté les deux organes de transmissions les plus réponsus et aussi fragiles : les engrenages et les roulements et qui seront par la suite sujet d'expérimentation dans la partie pratique afin de collecter des signaux réels avec et sans défauts pour établir un diagnostic acceptable, fondé et surtout crédible basé sur des images vibratoires pré-établies élaborées par des firmes de renommé qui sont :

- Allianz Insurance de Munich, Allemagne
- SKF Bearing Company, King of Prussia, Pennsylvania
- VAST: Vibro Acoustic Systems and Technologies, Saint Petersburg, Russie

Ces images sont l'identité des défauts et qui seront une référence de comparaison avec les fréquences détectées.

Dans le chapitre suivant, on va présenter, une des méthodes pour la détection des défauts basée sur l'analyse séquentielle et plus particulièrement sur le test de Wald

2. Analyse séquentielle

2.1. Introduction

La nécessité de formuler et de tester certaines hypothèses sur la nature ou la valeur des paramètres inconnus du schéma stochastique étudié se présente à divers stades de l'estimation statistique. On peut avancer, par exemple, l'hypothèse: « les observations analysées sont extraites d'un mélange de deux populations générales normales » ou encore « le vecteur des valeurs moyennes $A = (a^{(1)}, a^{(1)}, \dots, a^{(p1)})'$ des observations étudiées est égal au vecteur nul $0 = (0, 0, \dots, 0)'$ », etc. On désignera les hypothèses par la lettre H. L'objectif principal, est de vérifier si l'hypothèse H ne contredit pas les données empiriques.

La comparaison de l'hypothèse émise aux données empiriques $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ est conduite à l'aide de tel ou tel test et s'appelle : test de l'hypothèse statistique.

Le résultat de cette comparaison peut être soit négatif (les données empiriques contredisent l'hypothèse avancée et il faut alors y renoncer), soit positif (les données empiriques confirment l'hypothèse émise et celle-ci peut alors être prise pour éventuelle solution). A noter que si le résultat est positif, cela ne veut encore pas dire que notre hypothèse est la meilleure et la seule possible: tout ce qu'on peut affirmer, c'est qu'elle ne contredit pas les données empiriques et il peut très bien exister d'autres hypothèses jouissant de cette propriété. De sorte qu'une hypothèse H même statistiquement vérifiée n'est pas un fait absolu acquis une fois pour toute, mais seulement une proposition vraisemblable ne contredisant pas l'expérience.

2.2. Principaux types d'hypothèses testées

2.2.1. Hypothèses relatives au type de loi de probabilité

Quand on traite les observations :

$$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n \quad 2.1$$

de la variable aléatoire étudiée ξ , il est très important de saisir le mécanisme de formation des valeurs empiriques X_i , c'est-à-dire de sélectionner et de justifier une certaine fonction de répartition modèle $F_{\text{mod}}(X)$ qui permette de décrire de façon adéquate la fonction de répartition $F_{\xi}(X)$. A ce stade de l'analyse, cela revient à éprouver des hypothèses du type :

$$H: F_{\xi}(X) \equiv F_{\text{mod}}(X) \quad 2.2$$

Où la fonction modèle hypothétique peut être définie soit de façon unique (auquel cas $F_{\xi}(X) = F_0(X)$), ou $F_0(X)$ est une fonction entièrement connue), soit comme une fonction d'une famille

paramétrique (auquel cas $F_{\text{mod}}(X) = F(X, \Theta)$, où Θ est un paramètre de dimension k inconnu) mais susceptible d'être estimé sur le vu de l'échantillon (2.1).

La vérification des hypothèses (2.2) est réalisée à l'aide des tests d'ajustement et se base sur les diverses mesures de différenciation entre la fonction de répartition empirique analysée $\hat{F}_{\xi}^{(n)}(X)$ et la fonction modèle hypothétique $F_{\text{mod}}(X)$.

2.2.2. Hypothèses d'homogénéité de deux ou plusieurs échantillons

Les plus typiques des problèmes de cette nature sont caractérisés par la situation suivante. Supposons qu'on dispose de l « tranches » de données empiriques de type (2.1):

$$\begin{aligned} X_{11}, X_{12}, X_{13}, \dots, X_{1n}; \\ X_{21}, X_{22}, X_{23}, \dots, X_{2n}; \\ \dots \dots \dots \\ X_{l1}, X_{l2}, X_{l3}, \dots, X_{ln}; \end{aligned} \quad 2.3$$

Ces tranches auraient pu se former de façon naturelle au cours d'un sondage (par exemple, elles auraient pu être enregistrées à des dates et en des lieux différents). En désignant par $F_j(X)$ la fonction de répartition des observations du $j^{\text{ème}}$ échantillon et en attribuant le même indice à toutes les caractéristiques empiriques et théoriques de cette loi (les moyennes $\hat{a}_j(n_j)$ et a_j ; les variances $\hat{\sigma}_j^2(n_j)$ et σ_j^2 , etc), on peut mettre les principales hypothèses d'homogénéité sous la forme :

$$H_F : F_1(X) \equiv F_2(X) \equiv \dots \equiv F_l(X) \quad 2.3.a$$

$$H_a : a_1 = a_2 = \dots = a_l \quad 2.3.b$$

$$H_{\sigma} : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_l^2 \quad 2.3.c$$

Si le résultat du test de ces hypothèses est positif, on dit que les caractéristiques empiriques correspondantes (par exemple, $\hat{a}_1(n_1)$, $\hat{a}_2(n_2)$, ..., $\hat{a}_l(n_l)$) sont non significativement différentes.

N.B : On doit signaler, le cas particulier des hypothèses (2.3.a) où le nombre des échantillons $l = 2$ et l'un des échantillons est composé d'un petit nombre d'observations (une, pour fixer les idées). Sous cette forme, tester des hypothèses (2.3.a) revient à tester l'anomalie d'une ou de plusieurs observations.

2.2.3. Hypothèses concernant les valeurs numériques des paramètres

Supposons, par exemple, que les observations (2.1) sont des valeurs d'un paramètre d'un article, obtenues par des mesures effectuées sur n articles tirés au hasard dans la production en série d'une machine et soit a_0 la valeur nominale de ce paramètre. Chaque valeur X_i peut naturellement différer de la valeur nominale a_0 . Il est évident que pour vérifier que cette machine est correctement réglée, il faut s'assurer que la valeur moyenne du paramètre des unités produites par cette machine correspond à la valeur nominale, c'est-à-dire éprouver une hypothèse du type

$$H: E\xi = a_0 \quad 2.4$$

Ce qui conduit à une hypothèse de cette nature si l'on tente de vérifier que le coefficient de corrélation empirique $\hat{r}(x^{(1)}, x^{(2)})$, construit sur l'ensemble des observations à deux dimensions $X_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)})$, $i = 1, 2, \dots, n$, diffère statistiquement de façon non significative du zéro. Compte tenu de la caractéristique théorique envisagée, cette hypothèse peut être mise sous la forme

$$H: r(x^{(1)}, x^{(2)}) = 0 \quad 2.4.1$$

Dans le cas général, les hypothèses de cette nature sont de la forme:

$$H_0: \Theta = \Delta_0 \quad 2.4.2$$

Où Θ est un paramètre dont dépend la loi étudiée, Δ_0 le domaine de ses valeurs hypothétiques concrètes, domaine qui peut très bien n'être composé que d'un point.

Dans le cas où le test de l'hypothèse $\beta_1 = 0$, qui est un des cas particuliers des hypothèses (2.4.2) et qui se ramènent au type (2.4.1) c'est-à-dire au test de la symétrie de la loi. Les hypothèses d'indépendance et de stationnarité des observations sont décrites dans l'œuvre de Aivazian [103, 104].

2.2.4. Hypothèses concernant le type de dépendance

Autant dans l'étude de la loi de probabilité des observations traitées il est important de choisir correctement le modèle de loi correspondant (2.11), autant dans l'étude de la dépendance statistique, par exemple de la composante $x^{(2)}$ par rapport à la composante $x^{(1)}$, soit $X = (x^{(1)}, x^{(2)})'$, il est important de tester l'hypothèse concernant la forme générale de cette dépendance. Par exemple, l'hypothèse que $x^{(2)}$ et $x^{(1)}$ sont reliées par une relation de régression linéaire [104], soit

$$H: E(x^{(2)} | x^{(1)} = x) = b_0 + b_1 x \quad 2.5$$

Où b_0 et b_1 sont des paramètres inconnus du modèle.

Les tests statistiques utilisés pour éprouver les hypothèses de type (2.5) sont souvent appelés tests d'adéquation [103].

2.2.5. Hypothèses concernant l'indépendance et la stationnarité

La question de savoir si l'on peut traiter des observations (2.1) comme indépendantes ou à la rigueur stationnaire, c'est-à-dire suivant la même loi tout au long du sondage, n'est pas dénuée de sens dans la mesure en effet où elle conditionne le choix de la meilleure méthode de traitement de ces observations. Les hypothèses correspondantes peuvent être formalisées en fonction des objectifs de l'analyse, par exemple comme suit:

$$H: E x_i = a = \text{const}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad 2.6$$

$$H: r(x_i, x_{i+1}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad 2.6.1$$

C'est-à-dire qu'à strictement parler des hypothèses de ce type peuvent être traitées comme un cas particulier d'hypothèses (2.4.2) [104].

2.3. Principe logique général d'un test statistique

Les tests statistiques diffèrent considérablement par leur finalité et le caractère des problèmes résolus. Mais ils sont tous construits suivant le même principe logique que l'on peut décrire de la manière suivante :

1. On avance une hypothèse H_0 .

2. On définit le seuil de signification α du test. En effet, toute décision statistique, c'est-à-dire toute décision prise sur la base d'un nombre fini d'observations est adoptée avec un certain risque d'erreur dans un sens comme dans l'autre. Dans un nombre α peu élevé de cas, l'hypothèse H_0 peut être rejetée alors qu'elle est vraie (on parle d'un risque ou d'une erreur de première espèce) et, inversement, dans un nombre β peu élevé de cas, elle peut être adoptée alors qu'elle est fautive, la vraie étant une hypothèse concurrente H_1 (on parle d'un risque ou d'une erreur de deuxième espèce). En fixant la taille de l'échantillon, on peut choisir à notre convenance la probabilité de l'un ou l'autre de ces risques. Si l'on peut accroître autant que l'on veut le volume de l'échantillon, on peut rendre arbitrairement petites les probabilités des risques α et β pour toute hypothèse concurrente H_1 . En particulier, si le volume de l'échantillon est fixe, on se donne généralement la probabilité α de rejet à tort de l'hypothèse H_0 , appelée souvent hypothèse de base ou nulle. Cette probabilité de rejet à tort de l'hypothèse de base s'appelle seuil de signification ou encore niveau de test.

Le choix de la valeur du seuil de signification α dépend de la comparaison des pertes subies en cas de décision erronée dans un sens ou dans l'autre: plus les pertes entraînées par le rejet à tort de H_0 sont lourdes et plus α doit être pris petit. Mais comme cette comparaison est dans la plupart des cas très difficile à réaliser (souvent, il est difficile de dire dans quel sens l'erreur est la plus dangereuse), on fait appel en général à certaines valeurs standards du seuil de signification. Ces valeurs sont:

$$\alpha = 0,1; 0,05; 0,025; 0,01; 0,005; 0,001.$$

La plus répandue de ces valeurs est la valeur $\alpha = 0,05$. Elle exprime qu'en moyenne dans 5 % des cas on rejette à tort l'hypothèse avancée.

3. Soit donnée une fonction des observations $\Psi^{(n)} = \Psi(X_1, \dots, X_n)$ (appelée statistique critique). Comme toute fonction des observations, la statistique critique $\Psi^{(n)}$ est une variable aléatoire qui, si H_0 est vraie, suit une loi de probabilité bien étudiée (tabulée) de densité $f_{\Psi^{(n)}}(u)$.

Le principe de construction de la statistique critique dit principe du rapport de vraisemblance repose sur la signification de cette statistique: en principe, elle mesure le désaccord entre les données empiriques (2.1) et l'hypothèse testée H_0 . Ainsi, dans les hypothèses envisagées au § 2.2.1, la statistique critique $\Psi^{(n)}$ mesure la différence entre la fonction de répartition empirique $\hat{F}^{(n)}(X)$ et la fonction modèle hypothétique $F_{\text{mod}}(X)$. Dans les hypothèses du § 2.2.2, la quantité $\Psi^{(n)}$ mesure l'écart entre les caractéristiques empiriques dans les divers échantillons; dans les hypothèses du §

2.2.3, enfin, elle rend compte de l'écart entre les caractéristiques empiriques et leurs valeurs théoriques, etc.

4. Dans les tables de la répartition de densité $f_{\Psi^{(n)}}(u)$ de la Figure 2.1 [103], on repère le point $\Psi_{\alpha/2}^{(\min)}$ de pourcentage $100\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$ et le point $\Psi_{\alpha/2}^{(\max)}$ de pourcentage $100\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ [104]. Ces points subdivisent le domaine des valeurs possibles de la variable aléatoire $\Psi^{(n)}$ en trois régions : la région (I) des valeurs invraisemblablement petites, la région (III) des valeurs invraisemblablement grandes et, enfin, la région (II) des valeurs vraisemblables ou naturelles (sachant que l'hypothèse H_0 est vraie). Si l'on craint que les erreurs qui entachent l'hypothèse avancée soient unilatérales, c'est-à-dire que les valeurs de la statistique critique sont seulement « trop grandes » ou seulement « trop petites », on ne cherchera qu'un seul point de pourcentage : soit le point $\Psi_{\alpha}^{(\min)}$ de pourcentage $100(1 - \alpha)$ qui partagera le domaine des valeurs de $\Psi^{(n)}$ en deux régions : une région de valeurs invraisemblablement petites et une région de valeurs vraisemblables; soit le point $\Psi_{\alpha}^{(\max)}$ de pourcentage 100α qui divisera le domaine des valeurs de $\Psi^{(n)}$ en deux régions : une région des valeurs invraisemblablement grandes et une région des valeurs vraisemblables.

5. Enfin, on porte les données empiriques X_1, \dots, X_n dans la fonction $\Psi^{(n)}$ et on calcule la valeur prise par $\Psi^{(n)}$. Si cette valeur appartient à la région des valeurs vraisemblables, l'hypothèse H_0 ne contredit pas les données empiriques.

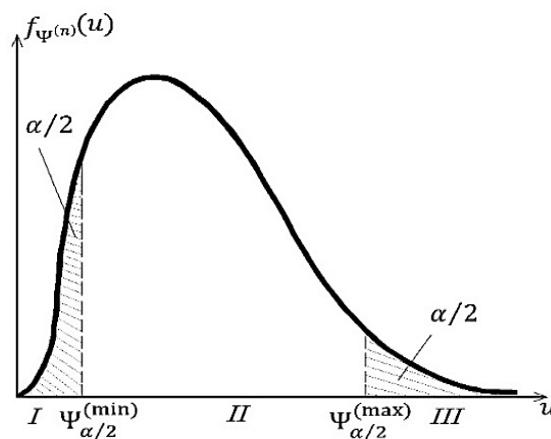


Figure 2.1: Représentation de la densité de la statistique critique Ψ_n

et mise en évidence des régions d'acceptation (II) et de rejet (I et III), sachant que H_0 est vraie

Dans le cas contraire, c'est-à-dire si $\Psi^{(n)}$ est trop petite ou trop grande, on conclut que $\Psi^{(n)}$ ne suit pas la loi de densité $f_{\Psi^{(n)}}(u)$ (il est aisé de comprendre que cette conclusion est établie avec une probabilité d'erreur égale à α), ce qui exprime que notre hypothèse H_0 est fautive et il faut donc y renoncer.

Donc, la décision suggérée par un test statistique peut être fautive aussi bien dans le cas où l'hypothèse H_0 est rejetée (avec une probabilité α) que dans le cas où elle est acceptée (avec une

probabilité β). Les probabilités α et β des décisions fausses s'appellent respectivement risque de première et de deuxième espèce, et la quantité $1 - \beta$, puissance du test. Il est évident que de deux tests caractérisés par un même risque de première espèce α , on préférera celui dont le risque de deuxième espèce β est plus petit (ou dont la puissance est la plus grande).

Si l'hypothèse H_0 consiste à conjecturer que la valeur d'un paramètre θ est très exactement égale à une valeur donnée θ_0 (§ 2.2.3), on dit alors qu'elle est simple. Dans tous les autres cas, elle est multiple.

2.4. Construction d'un test statistique

Voyons comment obtenir ces fonctions d'observations (les statistiques critiques $\Psi^{(n)}$) sur le vu des valeurs desquelles on décide si l'hypothèse testée correspond ou non aux valeurs empiriques (2.1).

2.4.1. Essence du principe du rapport de vraisemblance

Le principe général qui conduit à la construction des meilleurs tests (des plus puissants pour un seuil de signification donné), revient à tester l'hypothèse (simple) concernant la moyenne de la variable aléatoire normale $\ln \xi$:

$$H_0: \mathbf{E} \ln \xi = a_0$$

L'hypothèse concurrente étant :

$$H_1: \mathbf{E} \ln \xi = a_1$$

Dans le cas général, on se fait une idée de la vraisemblance des observations X_1, \dots, X_n (relativement à l'hypothèse testée et à l'hypothèse concurrente) en comparant les fonctions de vraisemblance respectives [104], plus exactement, en composant leur rapport

$$\Psi^{(n)} = \frac{L_{H_1}(X_1, \dots, X_n; \theta)}{L_{H_0}(X_1, \dots, X_n; \theta)} = \frac{L(X_1, \dots, X_n; \theta_1)}{L(X_1, \dots, X_n; \theta_0)} \quad 2.7$$

Où L_{H_1} et L_{H_0} sont les valeurs des fonctions de vraisemblance des observations X_1, \dots, X_n calculées sous la condition que soient vraies respectivement les hypothèses $H_1: \theta = \theta_1$ et $H_0: \theta = \theta_0$. Il est évident que plus les observations sont vraisemblables dans le cas de l'hypothèse H_0 , plus la fonction de vraisemblance L_{H_0} prend des valeurs élevées et plus la quantité $\Psi^{(n)}$ est petite. Si $f_{\Psi^{(n)}}(u)$ est la densité de probabilité de la statistique $\Psi^{(n)}$ sachant que l'hypothèse H_0 est vraie, la construction d'un test de l'hypothèse H_0 de niveau α donné revient à déterminer le point Ψ_α de pourcentage 100α de la loi de densité $f_{\Psi^{(n)}}(u)$ et à mettre en œuvre la régie suivante:

si $\Psi^{(n)} > \Psi_\alpha$ l'hypothèse H_0 est rejetée avec un risque α , puisque, conformément à la loi de densité $f_{\Psi^{(n)}}(u)$ et sous réserve que l'hypothèse H_0 soit vraie, l'événement $\{\Psi^{(n)} > \Psi_\alpha\}$ peut se réaliser avec la probabilité α , c'est-à-dire que :

$$\int_{\Psi_\alpha}^{\infty} f_{\Psi^{(n)}}(u) du = \alpha \quad 2.8$$

Si $\Psi^{(n)} < \Psi_\alpha$, l'hypothèse H_0 est acceptée.

Les tests basés sur les statistiques $\Psi^{(n)}$ de la forme (2.7) et sur la procédure (2.8) s'appellent tests du rapport de vraisemblance. Ces tests sont préférés aux autres pour leur réalisabilité et les propriétés suivantes (qui sont valables dans une classe assez vaste de situations, [105]).

1. Les tests du rapport de vraisemblance sont les plus puissants (lemme de Neyman-Pearson).

2. La densité $f_{\Psi^{(n)}}(u)$ de la loi de probabilité de la statistique critique $\Psi^{(n)}$ se calcule généralement sans peine à partir de la fonction de vraisemblance L de la variable aléatoire analysée.

La généralisation du problème de test de l'hypothèse concernant la moyenne d'une variable aléatoire normale ξ (sachant que la variance σ^2 est connue), donne :

$$\begin{aligned} L_{H_j} &= L(x_1, \dots, x_n; \theta_j) = L(x_1, \dots, x_n; a_j, \sigma^2) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \sigma^n} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (x_i - a_j)^2} \quad (j = 0, 1) \end{aligned}$$

de sorte que:

$$\begin{aligned} \Psi^{(n)} &= \frac{L_{H_1}}{L_{H_0}} = e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n [(x_i - a_1)^2 - (x_i - a_0)^2]} \\ &= e^{c \frac{(\bar{x} - a_0)\sqrt{n}}{\sigma} - \frac{1}{2}c^2} \end{aligned}$$

Où $c = \sqrt{n}(a_1 - a_0) \cdot \frac{1}{\sigma}$

Supposons pour fixer les idées que $a_1 > a_0$, et si on pose [104] :

$$\Psi_\alpha = e^{c u_{Q(\alpha)} - \frac{1}{2}c^2}$$

Où : $Q(\alpha) = 100.2\alpha \%$ et u_Q est le point de pourcentage 100Q de la loi normale réduite, l'inégalité

$$e^{c \frac{(\bar{x} - a_0)\sqrt{n}}{\sigma} - \frac{1}{2}c^2} > \Psi_\alpha$$

sera réalisée sur l'ensemble des échantillons (x_1, \dots, x_n) tels que $\sqrt{n}(\bar{x}(n) - a_0) \frac{1}{\sigma} > u_{Q(\alpha)}$, ou, ce qui revient au même,

$$\bar{x}(n) \geq a_0 + u_{Q(\alpha)} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Cette règle de test de l'hypothèse ne dépend pas de la valeur concurrente du paramètre a_1 , donc est la plus puissante (en tenant compte du lemme de Neyman-Pearson) pour toutes les valeurs concurrentes possibles du paramètre $a_1 > a_0$ on dit encore qu'elle est uniformément la plus puissante.

2.4.2. Test d'une hypothèse simple

Supposons qu'on sache que des observations X_1, \dots, X_n peuvent être traitées comme un échantillon indépendant prélevé dans une population générale dont la fonction de répartition appartient à une famille de fonctions de répartition $(X; \theta)$, où θ est un paramètre à k dimensions. On demande de tester l'hypothèse $\theta = \theta_0$ (hypothèse (2.4.2) du § 2.2.3). Considérons le test :

$$\tilde{\Psi}^{(n)} = -2\ln\{L(X_1, \dots, X_n; \theta_0)/L(X_1, \dots, X_n; \hat{\theta})\} \quad 2.9$$

Où $\hat{\theta}$ est une estimation du maximum de vraisemblance du paramètre θ sur le vu des observations X_1, \dots, X_n . Si l'on impose à la famille $F(X; \theta)$ et à la valeur θ_0 des conditions supplémentaires garantissant la réalisation des bonnes propriétés des estimations du maximum de vraisemblance, la variable $\tilde{\Psi}^{(n)}$ suivra asymptotiquement (pour $n \rightarrow \infty$) une loi du χ^2 (khi deux) à k degrés de liberté [104].

A titre d'exemple d'application du test $\tilde{\Psi}^{(n)}$, revenons au problème du test de l'hypothèse concernant la moyenne d'une population normale, envisagé § 2.4.1. Dans ces notations, en tenant compte du fait que l'estimation du maximum de vraisemblance du paramètre a_0 est $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, on obtient :

$$\tilde{\Psi}^{(n)} = 2 \left(\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - a_0)^2}{2\sigma^2} - \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \right) = \frac{n(\bar{x} - a_0)^2}{\sigma^2}$$

Comme \bar{x} est une variable aléatoire normale de moyenne a_0 et de variance $\frac{\sigma^2}{n}$, il s'ensuit que $\tilde{\Psi}^{(n)}$ est une variable du χ^2 à un degré de liberté.

A titre de deuxième exemple, considérons le test de l'hypothèse $H_0: p_i = p_{0i}, i = 1, 2, \dots, l$, concernant les valeurs des paramètres p_1, p_2, \dots, p_l de la loi polynomiale. Vu que les estimations du maximum de vraisemblance du paramètre p_i sont les rapport $v_i(n)/n$, il s'ensuit que la variable :

$$\tilde{\Psi}^{(n)} = 2 \sum_{i=1}^l v_i(n) (\ln v_i(n) - \ln n p_{0i})$$

Suit une loi asymptotique du χ^2 à $l - 1$ degrés de liberté. [104]

2.4.3. Test d'une hypothèse multiple

Considérons une modification du test (2.9) pour le cas où dans l'hypothèse sont concrétisés une partie seulement des paramètres. Supposons que $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_l)$ est le vecteur des paramètres inconnus de la loi et que l'hypothèse est:

$$H_{01}: \theta_j = \theta_{0j}, j = 1, \dots, r < l \quad 2.10$$

Il est commode de diviser le vecteur θ en deux parties: $\theta_1 = (\theta_1, \dots, \theta_r)$ et $\theta_2 = (\theta_{r+1}, \dots, \theta_l)$. Désignons par $\tilde{\theta}_2$ l'estimation du maximum de vraisemblance de θ_2 sur le vu de X_1, \dots, X_n sachant que $\theta_1 = \theta_{01}$ et par $(\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2)$ l'estimation du maximum de vraisemblance de (θ_1, θ_2) . Le test de l'hypothèse H_{01} est défini par la statistique :

$$\tilde{\Psi}^{(n)} = -2\ln\{L(X_1, \dots, X_n; \theta_{01}, \hat{\theta}_2)/L(X_1, \dots, X_n; \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2)\} \quad 2.11$$

On démontre que la quantité $\Psi^{(n)}$ suit asymptotiquement (lorsque $n \rightarrow \infty$) une loi du χ^2 à r degrés de liberté si sont remplies des conditions supplémentaires assurant la réalisation des bonnes propriétés des estimations du maximum de vraisemblance.

2.4.4. Critères de « qualité » d'un test statistique

Les critères définissant la précision d'un test statistique d'hypothèses simples ou multiples de type (2.4.2) sont:

$\alpha(\Theta)$ la probabilité de rejeter l'hypothèse de base H_0 sous réserve que la véritable valeur du paramètre « testé » soit Θ ; la quantité $1 - \alpha(\Theta)$ s'appelle caractéristique opérationnelle du test, quant à la valeur $\alpha(\Theta_0)$ dans le test de l'hypothèse simple $H_0: \Theta = \Theta_0$, ce n'est autre que le niveau de ce test (le risque de première espèce); $\beta(\Theta)$ la probabilité de rejeter l'hypothèse concurrente (de l'hypothèse de base) sous réserve que la véritable valeur du paramètre « testé » soit égale à Θ ; la quantité $1 - \beta(\Theta)$ s'appelle puissance (ou fonction de puissance) du test, quant à $\beta(\Theta_1)$, ce n'est autre que le risque de deuxième espèce dans le problème du test de l'hypothèse simple $H_0: \Theta = \Theta_0$ contre l'hypothèse concurrente $H_1: \Theta = \Theta_1$.

Discutons ces caractéristiques et les propriétés du test qui en dépendent.

Soient Γ_n le domaine des valeurs possibles de la statistique critique $\Psi^{(n)}$, $\Gamma_n^{H_0}$ et $\Gamma_n^{H_1}$ les régions, décrites au § 9.2, respectivement des valeurs « vraisemblables » et « invraisemblables » de $\Psi^{(n)}$ (sachant que l'hypothèse H_0 est vraie). Il est alors évident que :

$$\begin{cases} \alpha_n(\Theta) = P_{\Theta} \{ \Psi^{(n)} \in \Gamma_n^{H_1} \} = \int_{\Gamma_n^{H_1}} f_{\Psi^{(n)}}(u, \Theta) du \\ \beta_n(\Theta) = 1 - \alpha_n(\Theta) = P_{\Theta} \{ \Psi^{(n)} \in \Gamma_n^{H_0} \} = \int_{\Gamma_n^{H_0}} f_{\Psi^{(n)}}(u, \Theta) du \end{cases} \quad 2.12$$

Où $P_{\Theta} \{A\}$ et $f_{\Psi^{(n)}}(u, \Theta)$ sont respectivement la probabilité de l'événement A et la densité de probabilité de la statistique critique $\Psi^{(n)}$ calculée sous l'hypothèse que la véritable valeur du paramètre testé soit égale à Θ .

Dans le cas d'hypothèses paramétriques de la forme (2.4.2) au seuil de signification α_0 donné, le test $\{ \Psi^{(n)}, \Gamma_n^{H_0} \}$ est dit sans biais si:

$$\begin{cases} \alpha_n(\Theta) \leq \alpha_0 & \text{pour tous les } \Theta \in \Delta_0 \\ \alpha_n(\Theta) > \alpha_0 & \text{pour tous les } \Theta \notin \Delta_0 \end{cases}$$

Enfin, le test $\{ \Psi^{(n)}, \Gamma_n^{H_0} \}$ est dit convergent si : $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n(\Theta) = 1$ pour tous les $\Theta \notin \Delta_0$.

La dernière relation exprime, en particulier, que la puissance $1 - \beta_n(\Theta)$ du test convergent tend vers l'unité (lorsque $n \rightarrow \infty$) pour toute valeur Θ n'appartenant pas au domaine Δ_0 des valeurs hypothétiques (correspondant à l'hypothèse H_0) du paramètre.

Du système d'équation (2.12) il s'ensuit visiblement que pour toute taille n fixe de l'échantillon, la modification du test dans le sens d'une réduction du niveau α (c'est-à-dire la restriction du domaine $\Gamma_n^{H_1}$) est liée à un accroissement simultané du risque de deuxième espèce et, dans le cas général, à une réduction des valeurs de la puissance $1 - \beta(\Theta)$ (puisque dans ce cas la région $\Gamma_n^{H_0}$ de rejet de l'hypothèse concurrente H_1 s'élargit). Réciproquement: la modification d'un test (dans toute classe fixe de tests, y compris dans la classe des tests les plus puissants) dans le sens de l'accroissement de sa puissance est liée (pour n fixe) à une inévitable augmentation simultanée de son niveau.

Dans le même temps, en faisant croître indéfiniment la taille de l'échantillon (c'est-à-dire en faisant tendre $n \rightarrow \infty$), on peut faire prendre aux risques

$$\alpha_n^* = \begin{cases} \alpha_n(\Theta^*), & \text{où } \Theta^* \in \Delta_0^* \subset \Delta_0, \text{ ou} \\ \max_{\Theta \in \Delta_0} \alpha_n(\Theta) \end{cases}$$

$$\beta_n^* = \begin{cases} \beta_n(\Theta^{**}), & \text{où } \Theta^{**} \notin \Delta_0, \text{ ou} \\ \max_{\Theta \notin \Delta_0} \beta_n(\Theta) \end{cases}$$

des valeurs aussi petites que l'on veut.

Pour les échantillons de grande taille (c'est-à-dire asymptotiquement par rapport à $n \rightarrow \infty$), il existe des relations liant entre elles les caractéristiques α_n^* et β_n^* [106, 107]. Il faut se concentrer maintenant sur une relation utile qui permettra, en particulier, de déterminer la taille $n(\alpha, \beta; \rho)$ d'un échantillon dans un test du maximum de vraisemblance de Neyman-Pearson [108] entre deux hypothèses simples:

$$\begin{cases} H_0 & \text{L'échantillon est extrait d'une population de densité } f(x, \theta_0) \\ H_1 & \text{L'échantillon est extrait d'une population de densité } f(x, \theta_1) \end{cases} \quad 2.13$$

avec des risques de première et de deuxième espèces, inférieurs respectivement à des valeurs données α et β , la quantité $\rho = \rho(H_0, H_1)$ caractérise la « distance » entre les hypothèses H_0 et H_1 et est définie par la formule :

$$\rho(H_0, H_1) = \int \ln \frac{f(X; \theta_1)}{f(X; \theta_0)} [f(X; \theta_1) - f(X; \theta_0)] dX$$

Où l'intégration est étendue au domaine tout entier des valeurs possibles de la variable aléatoire X , $f(X; \theta)$ sa densité de probabilité. Il est prouvé que dans une classe assez vaste de cas, quand on procède à des tests entre des hypothèses simples voisines (c'est-à-dire pour de petites valeurs de ρ), on peut se servir de la formule (asymptotique) approchée [109].

$$n(\alpha, \beta; \rho) \approx \frac{(u_{1-\alpha} + u_{1-\beta})^2}{\rho(H_0, H_1)} \quad 2.14$$

dans laquelle u_q est comme toujours le quantile d'ordre q de la loi normale réduite [103, 110].

Remarque :

Il faut signaler l'apparition inévitable de deux effets néfastes à la théorie des tests d'hypothèses statistiques: les effets « trop petite taille » et « trop grande taille » de l'échantillon.

L'effet « trop petite taille » de l'échantillon consiste en ce qui suit: si le niveau α du test est donné et si le nombre n d'observations sur le vu desquelles est prise la décision est petit, la puissance du test, c'est-à-dire la probabilité de rejeter l'hypothèse de base H_0 à juste titre, est très petite (formule (2.14) donne une idée approximative de l'interdépendance des quantités α , β et n). Il existe deux remèdes à cette situation: soit augmenter la taille n de l'échantillon, soit augmenter un peu le niveau α , ce qui entrainera une diminution de β (c'est-à-dire un accroissement de la puissance $1 - \beta$).

Pour expliquer l'effet « trop grande taille » de l'échantillon, on fait appel à une réflexion de Berkson: « *Personne en réalité n'estime qu'une hypothèse se réalise exactement: nous ne faisons que construire un modèle abstrait d'événements réels qui dans une certaine mesure s'écarte nécessairement de la vérité. Mais nous constatons qu'un échantillon de très grande taille infirme dans ce cas presque sûrement (c'est-à-dire avec une probabilité qui tend vers l'unité lorsque n croît indéfiniment) (Ceci résultat de la propriété du test d'être sans biais) notre hypothèse pour tout niveau α donné* ». [111, 112]

On dirait un cercle vicieux: pour les échantillons de faible taille, les conclusions ne sont pas fiables statistiquement, pour les échantillons de trop grande taille, le résultat est connu sans ambiguïté à l'avance. L'effet des grands n est très influant lors qu'on tente au moyen d'un test de trouver une loi modèle $F_{\text{mod}}(x)$ convenable pour décrire la population générale étudiée et qui aboutissaient invariablement au résultat contraire (c'est-à-dire au rejet de l'hypothèse avancée).

Pour éviter l'effet des grands n , il faut relier les caractéristiques de précision du test (le niveau α et le risque de deuxième espèce β) à la taille n de l'échantillon: le gain en « sensibilité » du test, réalisé grâce à l'accroissement de n , doit être utilisé pour réduire aussi bien α que β . En particulier, si α diminue lorsque n croît, les petits écarts par rapport à H_0 ne conduiront déjà plus au rejet obligatoire de cette hypothèse: la probabilité de ce rejet dépendra de la « vitesse » de décroissance de α (n croît).

2.5. Procédure séquentielle de prise de décision

2.5.1. Procédure séquentielle d'observation

Si le nombre d'observations, sur le vu desquelles le statisticien est appelé à prendre une décision, n'est pas fixé à l'avance mais est tributaire des résultats enregistrés à chaque étape de l'expérience, on dit qu'on utilise une procédure séquentielle d'observations. Vu que les résultats des observations à chaque étape de l'expérience constituent un échantillon aléatoire de la population générale, donc, sont aléatoires, l'instant d'arrêt des observations (qui dépend de ces résultats) est aussi une variable aléatoire.

L'idée d'utiliser la procédure séquentielle d'observation est apparue pour la première fois au cours de l'établissement des plans économiques de contrôle statistique par échantillonnage de la qualité d'une production [113]. Il s'agissait de vérifier sur un échantillon que le pourcentage p de pièces défectueuses produites en série ne dépassait pas un certain niveau p_0 (le niveau limite tolérable). Les auteurs du travail cité ont proposé à cet effet une procédure de contrôle par un double échantillonnage. Dans une première étape, ils ont prélevé un échantillon de taille n_1 dont ils ont déterminé le pourcentage $\hat{p}_1(n_1)$ de pièces défectueuses. La décision de contrôler un deuxième échantillon se prend sur le vu du résultat obtenu: en gros, si le pourcentage $\hat{p}_1(n_1)$ de pièces défectueuses dans le premier échantillon est bien plus petit (ou bien plus grand) que le niveau limite p_0 , il n'est point besoin de considérer un deuxième échantillon et l'on accepte l'hypothèse $p \leq p_0$ (respectivement l'hypothèse concurrente $p > p_0$), si le pourcentage $\hat{p}_1(n_1)$ diffère peu du niveau p_0 (ou comme on dit encore se trouve dans la « région d'indifférence » ou « région d'indétermination »), on prend la décision de poursuivre les observations et, en particulier, de prélever un deuxième échantillon de taille n_2 .

Cette méthode fournit un gain appréciable (en moyenne) sur le nombre d'observations nécessaires pour tester les hypothèses à un niveau α et une puissance $1 - \beta$ donnés par rapport au test de Neyman-Pearson qui est le meilleur (le plus puissant, § 2.4.1) de tous les tests basés sur la procédure classique d'observation (c'est-à-dire sur des échantillons de taille n donnée à priori). Donc, la procédure séquentielle d'observation s'impose lorsque chaque observation est d'un coût élevé ou d'accès difficile et à condition qu'on peut mettre cette procédure en œuvre.

Aux caractéristiques $\alpha(\theta)$ et $\beta(\theta)$ de la qualité d'un test (§ 2.5) il faut ajouter dans le cas d'un test séquentiel la taille moyenne de l'échantillon $E_{\theta}v(\alpha, \beta)$ nécessaire pour vérifier les hypothèses de la forme (2.4.2) avec des caractéristiques (α, β) données.

2.5.2. Test séquentiel du rapport de vraisemblance et ses propriétés

La construction d'un test statistique dans le cas où la taille n de l'échantillon est fixée (§ 2.4.1) revient à partager le domaine des valeurs possibles de la statistique critique $\Psi^n = \Psi(X_1, \dots, X_n)$ en deux régions : la région des valeurs vraisemblables et la région des valeurs invraisemblables (sachant que l'hypothèse de base H_0 est vraie). Si une valeur donnée de $\Psi(X_1, \dots, X_n)$ tombe dans la région des valeurs invraisemblables, l'hypothèse de base est rejetée.

Les tests séquentiels, c'est-à-dire les tests basés sur une procédure séquentielle d'observation, sont construits sur le même principe à une distinction près: pour chaque valeur $v = 1, 2, \dots, n, n+1, \dots$ de la taille de l'échantillon, le domaine Γ_v des valeurs possibles de la statistique critique $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ est partagé en trois régions disjointes:

- 1- $\Gamma_v^{H_0}$ région des valeurs vraisemblables;
- 2- $\Gamma_v^{H_1}$ région des valeurs invraisemblables;
- 3- Γ_v^* région des valeurs douteuses. (sachant que H_0 est vraie)

$$\Gamma_v = \Gamma_v^{H_0} \cup \Gamma_v^{H_1} \cup \Gamma_v^*$$

Où: $v = 1, 2, \dots$

A chaque pas V de la procédure séquentielle d'observation, c'est-à-dire après avoir enregistré les observations $x_1, \dots, x_v, v=1, 2, \dots$ on prend une décision en se fondant sur la règle suivante qui définit le test de Wald :

- Si $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Gamma_v^{H_0}$ on accepte l'hypothèse H_0
- Si $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Gamma_v^{H_1}$ on accepte l'hypothèse H_1 , ou on rejette l'hypothèse H_0
- Si $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Gamma_v^*$ le problème reste ouvert jusqu'à la $v^{ième}$ observation.

Pour cette raison, la région Γ_v^* est appelée région d'indétermination ou région de poursuite des observations.

Donc, la concrétisation d'un test passe par la détermination :

- a) Du type de l'hypothèse ;
- b) De la méthode de construction de la statistique critique $\Psi(x_1, \dots, x_n)$
- c) De la méthode de construction des régions $\Gamma_v^{H_0}$, $\Gamma_v^{H_1}$ et Γ_v^*

en fonction des caractéristiques données du test.

Comme exemple de test séquentiel, considérons le test du rapport de vraisemblance de Wald [114] entre deux hypothèses simples de la forme (2.13).

La statistique critique de ce test est définie pour la suite d'observation indépendantes x_1, \dots, x_v par la relation :

$$\Psi^{(v)} = \ln \frac{f(x_1, \theta_1) \dots f(x_v, \theta_1)}{f(x_1, \theta_0) \dots f(x_v, \theta_0)} = \sum_{i=1}^v \ln \frac{f(x_i, \theta_1)}{f(x_i, \theta_0)} \tag{2.15}$$

Où: $v = 1, 2, \dots$

Les régions des valeurs vraisemblables $\Gamma_v^{H_0}$ et invraisemblables $\Gamma_v^{H_1}$ et douteuses Γ_v^* de la statistique $\Psi^{(v)}$, sachant que H_0 est vraie, sont définies approximativement par les relations [115]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_v^{H_0} = \left\{ \Psi : \Psi^{(v)} \leq \ln \frac{\beta}{1-\alpha} \right\} \\ \Gamma_v^{H_1} = \left\{ \Psi : \Psi^{(v)} \geq \ln \frac{1-\beta}{\alpha} \right\} \\ \Gamma_v^* = \left\{ \Psi : \ln \frac{\beta}{1-\alpha} \leq \Psi^{(v)} \leq \ln \frac{1-\beta}{\alpha} \right\} \end{array} \right. \tag{2.16}$$

Wald et Wolfowitz [114] ont prouvé l'optimalité de ce test séquentiel, plus exactement: de tous les tests entre les hypothèses (2.13) avec des risques de première et de deuxième espèce inférieurs à des valeurs respectives α et β données, le test (2.15), (2.16) implique le plus petit nombre moyen d'observations $E_{\theta_i} v(\alpha, \beta)$ que l'hypothèse $H_0 (i = 0)$ ou l'hypothèse $H_1 (i = 1)$ soit vraie. Wald a estimé [114] que son test était environ deux fois plus économique (quant au nombre d'observations) que le meilleur des tests classiques: le test de Neyman-Pearson. Mais, en 1959, S. Avariant a établi des formules asymptotiquement (par rapport au rapprochement indéfini des hypothèses testées) exactes pour $E_{\theta_i} v(\alpha, \beta)$ [109] :

$$E_{\theta_0} v(\alpha, \beta) = \frac{2\omega(\alpha, \beta)}{\rho(H_0, H_1)} ; \quad E_{\theta_1} v(\alpha, \beta) = \frac{2\omega(\beta, \alpha)}{\rho(H_0, H_1)} \quad 2.17$$

Où

$$\omega(x, y) = (1-x) \ln \left(\frac{1-x}{y} \right) + x \ln \left(\frac{x}{1-y} \right) \quad 2.18$$

et $\rho(H_0, H_1)$ est la « distance » entre les hypothèses testées (§ 2.5), qui ont permis, la formule (2.14) aidant, à comparer les bonnes propriétés des tests de Wald et de Neyman-Pearson :

$$\begin{aligned} \frac{E_{\theta_0} v(\alpha, \beta)}{n(\alpha, \beta; \rho)} &= \frac{\omega(\alpha, \beta)}{(u_{1-\alpha} + u_{1-\beta})^2} = \omega(\alpha, \beta) ; \\ \frac{E_{\theta_1} v(\alpha, \beta)}{n(\alpha, \beta; \rho)} &= \frac{\omega(\beta, \alpha)}{(u_{1-\alpha} + u_{1-\beta})^2} = \omega(\beta, \alpha) , \end{aligned} \quad 2.19$$

Le Tableau 2.1[104] représente les valeurs de la fonction $\omega(\alpha, \beta)$ correspondant aux risques de première et de deuxième espèce les plus souvent utilisés.

$\alpha \backslash \beta$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001	0,0005	0,0002	0,0001
0,2	0,587	0,605	0,616	0,628	0,635	0,640	0,646	0,650	0,653	0,658	0,660
0,1	0,508	0,534	0,555	0,575	0,587	0,597	0,609	0,610	0,623	0,631	0,637
0,05	0,434	0,466	0,489	0,514	0,529	0,543	0,558	0,567	0,577	0,587	0,594
0,02	0,354	0,388	0,415	0,443	0,460	0,475	0,493	0,504	0,515	0,527	0,536
0,01	0,307	0,342	0,369	0,398	0,416	0,432	0,450	0,462	0,473	0,487	0,496
0,005	0,269	0,304	0,331	0,360	0,379	0,395	0,414	0,426	0,438	0,452	0,586
0,002	0,230	0,264	0,298	0,320	0,338	0,355	0,374	0,386	0,398	0,412	0,422
0,001	0,207	0,237	0,266	0,295	0,313	0,329	0,348	0,361	0,373	0,387	0,397
0,0005	0,188	0,220	0,245	0,277	0,291	0,308	0,326	0,339	0,350	0,365	0,375
0,0002	0,167	0,198	0,223	0,250	0,267	0,283	0,302	0,314	0,326	0,340	0,349
0,0001	0,154	0,184	0,208	0,235	0,252	0,282	0,286	0,298	0,309	0,323	0,333

Tableau 2.1: Valeurs de la fonction $\omega(\alpha, \beta)$ correspondant aux risques α et β

On remarque que le gain en observations fourni par le test de Wald par rapport au test de Neyman-Pearson est de 2 à 3 fois supérieur et peut être bien plus élevé pour certaines combinaisons des risques (on démontre, en particulier que, $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \omega(\alpha, \beta) = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \omega(\beta, \alpha) = \frac{1}{4}$)

2.5.3. Test séquentiel généralisé entre hypothèses multiples

Le test de deux hypothèses multiples de la forme $H_0: \Theta \in \Delta_0$ et $H_1: \Theta \in \Delta_1$ où Θ est un paramètre (généralement, de dimension 1) dont dépend la loi de probabilité de la variable aléatoire étudiée, et Δ_0 et Δ_1 des régions disjointes de valeurs possibles de cette variable, se ramène à un test entre deux hypothèses simples de la forme (2.13), où Θ_0 et Θ_1 sont des points (« convenablement » choisis) respectivement de Δ_0 et Δ_1 .

Mais dans cette position du problème, le test de Wald ne jouit plus de ses bonnes propriétés, car la vraie valeur du paramètre testé peut être égale à une valeur « intermédiaire » Θ^* (comprise entre Θ_0 et Θ_1), et le nombre moyen des observations $E_{\Theta^*} \nu(\alpha, \beta)$ n'est minimal que si $\Theta = \Theta_0$ ou $\Theta = \Theta_1$.

Une autre méthode approchée de construction d'un test séquentiel généralisé optimal (TSGO) d'hypothèse de la forme (2.13) dans le cas où la vraie valeur du paramètre est susceptible d'être égale à Θ^* , où $\Theta^* \neq \Theta_0$ et $\Theta^* \neq \Theta_1$. L'optimalité de ce test traduit le fait que de tous les tests entre des hypothèses H_0 et H_1 de risques de première et de deuxième espèce respectivement inférieurs à des valeurs α et β données, il est celui qui donne lieu au plus petit nombre moyen d'observations dans la situation la « plus défavorable », c'est-à-dire à la plus petite valeur de $\max_{\Theta} E_{\Theta} \nu(\alpha, \beta)$. La statistique critique du TSGO est définie comme dans le test de Wald par la relation (2.15). Les régions d'acceptation de l'hypothèse H_0 (la région $\Gamma_{\nu}^{H_0}$), d'acceptation de l'hypothèse H_1 (la région $\Gamma_{\nu}^{H_1}$) et de poursuite des observations (la région Γ_{ν}^*) sont définies par les relations : [54, 104]

$$\begin{aligned} \Gamma_{\nu}^{H_0} &= \left\{ \Psi : \Psi^{(n)} \leq -c_0 \left[\frac{\nu_{\rho}(H_0, H_1)}{8 \cdot \ln \left(\frac{1}{\min(\alpha, \beta)} \right)} \right] \right\} \\ \Gamma_{\nu}^{H_1} &= \left\{ \Psi : \Psi^{(n)} \geq c_1 \left[1 - \frac{\nu_{\rho}(H_0, H_1)}{8 \cdot \ln \left(\frac{1}{\min(\alpha, \beta)} \right)} \right] \right\} \\ \Gamma_{\nu}^* &= \left\{ \Psi : -c_0 \left[\frac{\nu_{\rho}(H_0, H_1)}{8 \cdot \ln \left(\frac{1}{\min(\alpha, \beta)} \right)} \right] < \Psi^{(n)} < c_1 \left[1 - \frac{\nu_{\rho}(H_0, H_1)}{8 \cdot \ln \left(\frac{1}{\min(\alpha, \beta)} \right)} \right] \right\} \end{aligned} \quad 2.20$$

Où c_0 et c_1 sont des nombres strictement positifs approchés grossièrement par :

$$c_0 = 2 \cdot \ln \frac{1}{\beta} \quad \text{et} \quad c_1 = 2 \cdot \ln \frac{1}{\alpha} \quad 2.21$$

Si l'on considère les domaines $\Gamma_v^{H_i}$ et Γ_v^* dans le plan $(v, \Psi^{(v)})$, on constate que dans le test séquentiel de Wald leurs frontières sont définies par les droites :

$$\Psi^n = -\ln \frac{1-\alpha}{\beta} \quad \text{et} \quad \Psi^v = -\ln \frac{1-\beta}{\alpha} \quad 2.22$$

qui sont parallèle à l'axe horizontal, tandis que dans le TSGO, leurs frontières sont deux droites concourantes se coupant au point :

$$v^* = \frac{1}{\rho(H_0, H_1)} \cdot 8 \cdot \ln \frac{1}{\min(\alpha, \beta)} \quad 2.23$$

Ceci exprime, en particulier, que le TSGO est un test séquentiel tronqué, c'est-à-dire tel que le nombre v d'observations auquel il donne lieu est inférieur à un seuil v^* donné. Le TSGO est décrit en détail dans le travail de Wald et aussi d'Aïvazian [54, 109].

2.6. Elaboration d'une nouvelle méthode de détection

2.6.1. Introduction

Pour la détection et le diagnostic des défauts localisés dans un roulement, un model statistique basé sur le test de Wald est établi pour générer un signal dit hypothétique désigné par h-signal et qui prend un état zéro "0" dans l'absence de défaut et l'état un "1" si un pic de résonance causé par le défaut est présent, l'autocorrélation du signal hypothétique révèle la périodicité dans le signal.

L'originalité de cette méthode qu'elle est utilisée pour la première fois dans le domaine du traitement du signal et plus particulièrement dans le diagnostic des défauts dans les machines tournantes.

Cette méthode permet la détection des défauts sans tenir compte du nombre total d'observations et aussi du niveau du bruit.

2.6.2. Densité de probabilité des vibrations des roulements

Pour caractériser la vibration des roulements $x(t)$, qui est supposée comme un processus stochastique stationnaire, on utilise la fonction de densité de probabilité (PDF) qui à la limitée décrit le pourcentage en temps quand le signal aura une amplitude \mathcal{X} donnée.

Pour une amplitude \mathcal{X} , la FDP est estimée par : [5, 41, 42, 104, 116]

$$P(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P_r \{x \leq x(t) \leq (x + \Delta x)\}}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \sum_{i=1}^j \frac{\Delta t_i}{T} \quad 2.24$$

Où T est le temps d'observation total et Δt_i est la i^{th} durée pendant que $x(t)$ est à l'intérieur de l'intervalle $[x, x + \Delta x]$.

Pour une vibration sans défaut et qui représente une signature d'un fonctionnement sain, la distribution de l'amplitude peut être considérée comme un processus gaussien de variance bien définie σ_0^2 , cette variance est différente de la variance d'une signature avec un défaut localisé σ_1^2 représenté par Figure 2.2 [42] par conséquent la signature vibratoire du roulement défectueux sera composée de deux parties alternativement périodiques de distribution gaussienne avec des variances différentes. [42, 104, 117]

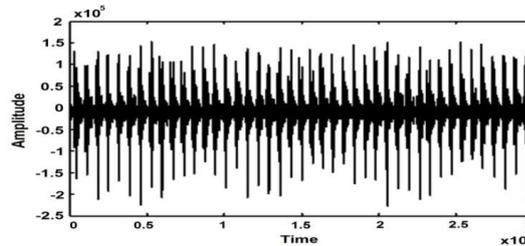


Figure 2.2: Signal réel de roulement avec un défaut localisé

2.6.3. Test Séquentiel (SPRT: Sequential Probability Rate Test)

Considérons que la vibration du roulement mesurée avec un défaut localisé commute entre deux distributions gaussiennes avec des variances différentes, dans ce cas, pour N observations x_1, x_2, \dots, x_N indépendantes et identiquement distribuées d'une vibration, alors les deux hypothèses qu'on peut établir sont : [42, 50, 51, 117, 118]

$$\begin{cases} H_0 : P(\underline{x}/H_0) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} \sigma_0^N} \exp\left\{-\sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{2\sigma_0^2}\right\} & 2.25.a \\ H_1 : P(\underline{x}/H_1) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} \sigma_1^N} \exp\left\{-\sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{2\sigma_1^2}\right\} & 2.25.b \end{cases} \quad 2.25$$

Où: $\underline{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ et $\sigma_0^2 < \sigma_1^2$.

Pour un signal vibratoire avec des conditions inconnues, certainement une des deux variances va se retenir hors de l'hypothèse test pour déterminer si H_1 se produit ou non à l'une des fréquences caractéristiques du roulement (bague intérieure, bague extérieure, éléments roulants et la cage).

Dans le cas d'un signal $x(t)$ d'un roulement sain, et pendant un temps Δt , toutes les mesures de M observations suivent une distribution gaussienne donnée par la relation (2.25.a), dans le cas d'un roulement défectueux, la distribution est donnée par (2.25.b) et en faisant varier le nombre d'observations M dans le temps Δt et dès qu'il est suffisamment grand, il est toujours possible de calculer la variance estimée σ_1^2 du signal vibratoire acquis avec un défaut dans les roulements, la variance σ_0^2 pour un roulement sain peut être calculée par:

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i^2 \quad 2.26$$

Et la variance :

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{M} \sum_1^M x_i^2 \quad 2.27$$

est considérée comme une variance estimée du roulement du roulement défectueux une telle estimation conduira à un test de probabilité de détection et de fausse alarme. [41, 42, 103, 104]

2.6.4. Test du Taux de Probabilité (TTP, PRT)

On supposant que la mesure parfaite de σ_1^2 existe, alors le test du taux de probabilité (TTP) ou le test du rapport de vraisemblance (PRT : Probability Ratio Test) pourra être exprimer comme suit : [41, 42, 119]

$$\begin{cases} \text{Si } \xi(\underline{x}) > \mu & \text{choisir } H_1 \\ \text{Si } \xi(\underline{x}) < \mu & \text{choisir } H_0 \end{cases} \quad 2.28$$

La relation (2.28) n'est valable que si on suppose que les mesures x_1, x_2, \dots, x_N sont indépendantes et identiquement distribuées entre eux.

Où $\xi(\underline{X})$ est le rapport de vraisemblance, qui est défini par: [42]

$$\xi(\underline{x}) = \frac{P(\underline{x}/H_1)}{P(\underline{x}/H_0)} = \frac{\sigma_1^N}{\sigma_0^N} \exp \left\{ \frac{(\sigma_1^2 - \sigma_0^2)}{2\sigma_0^2\sigma_1^2} \sum_{i=1}^N x_i^2 \right\} \quad 2.29$$

En accomplissant le logarithme naturel des deux parties, le test peut être simplifié en:

$$\begin{cases} \text{if } f(\underline{x}) > \gamma & \text{choisir } H_1 \\ \text{if } f(\underline{x}) < \gamma & \text{choisir } H_0 \end{cases} \quad 2.30$$

$$\text{Où:} \quad f(\underline{x}) = \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad 2.31$$

$$\text{Et} \quad \gamma = \frac{2\sigma_0^2\sigma_1^2}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} \ln \left\{ \frac{\sigma_1^N}{\sigma_0^N} \cdot \mu \right\} \quad 2.32$$

Alors la probabilité de fausse alarme (P_f) et la probabilité de détection (P_d) du TTP sont:

$$P_f = P(f(\underline{x}) > \gamma/H_0) = P(\sum x_i^2 > \gamma/H_0) = \int_{\sum x_i^2 > \gamma} P(\underline{x}/H_0) d\underline{x} \quad 2.33$$

$$P_d = P(f(\underline{x}) > \gamma/H_1) = P(\sum x_i^2 > \gamma/H_1) = \int_{\sum x_i^2 > \gamma} P(\underline{x}/H_1) d\underline{x} \quad 2.34$$

D'après les équations (2.25) et (2.33) que P_f est une fonction monotone décroissante de paramètre γ .

2.6.5. Expression de la probabilité de détection et de fausse alarme:

Par commodité, on reprend l'expression de la probabilité de fausse alarme de (2.33):

$$P_f = P(f(\underline{x}) > \gamma/H_0) = P(\sum x_i^2 > \gamma/H_0) = \int_{\sum x_i^2 > \gamma} P(\underline{x}/H_0) d\underline{x}$$

En transformant les coordonnées cartésiennes $\underline{x}[x_1, x_2, \dots, x_n]$ en coordonnées polaires sphériques généralisées $\underline{T}[Z, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N-1}]$ par:

$$\begin{cases} x_1 = Z \cos \theta_1 \\ x_2 = Z \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ x_3 = Z \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\ \dots \\ x_{N-1} = Z \sin \theta_1 \sin \theta_2 \dots \sin \theta_{N-2} \cos \theta_{N-1} \\ x_N = Z \sin \theta_1 \sin \theta_2 \dots \sin \theta_{N-2} \sin \theta_{N-1} \end{cases} \quad 2.35$$

Et remplacer l'expression de la probabilité de l'équation (2.25.a) dans (2.34) on obtient:

$$P_f = \prod_{i=1}^{N-2} \int_0^{\eta} d\theta_i \int_0^{2\pi} d\theta_{N-1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\gamma} (2\pi)^{N/2} \sigma_0^N} \exp\left(-\frac{Z^2}{2\sigma_0^2}\right) \cdot |J_N| \cdot dZ \quad 2.36$$

Où J_N est la matrice Jacobienne pour la transformation (2.35).

En posant S_i et C_i pour noter $\sin \theta_i$ et $\cos \theta_i$ respectivement et utilisant la définition:

$$J_N = \frac{dX}{dT} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial T_i} \end{pmatrix} \quad 2.37$$

On peut trouver les expressions suivantes pour la matrice et son déterminant:

$$J_N = \begin{bmatrix} & & & & & 0 \\ & & & & & \cdot \\ & & & & & \cdot \\ & & & & & \cdot \\ & & & & & 0 \\ & & & & & -ZS_1 \dots S_{N-2} S_{N-1} \\ S_1 \dots S_{N-1} & ZC_1 S_2 \dots S_{N-1} & \dots & ZS_1 \dots S_{N-3} C_{N-2} S_{N-1} & & ZS_1 \dots S_{N-2} S_{N-1} \end{bmatrix} \quad 2.38$$

$$|J_N| = ZS_1 \dots S_{N-2} C_{N-1} |J'_{N-1}| + ZS_1 \dots S_{N-2} S_{N-1} |J''_{N-1}|$$

$$|J_N| = ZS_1 \dots S_{N-2} |J_{N-1}| \quad 2.39$$

Où :

$$|J'_N| = \text{diag}(1, \dots, 1, C_N) \cdot J_N \quad 2.40$$

$$|J''_N| = \text{diag}(1, \dots, 1, S_N) \cdot J_N \quad 2.41$$

Le nouveau système de coordonnées est les coordonnées polaires pour $N=2$, et les coordonnées polaires sphériques pour $N=3$:

$$|J_2| = Z \quad 2.42$$

$$|J_3| = Z^2 \sin \theta_1 \quad 2.43$$

Alors le déterminant (2.39) peut être développé dans:

$$|J_N| = Z^{N-1} \sin^{N-2} \theta_1 \sin^{N-3} \theta_2 \dots \sin^{N-1-i} \theta_i \dots \sin^2 \theta_{N-3} \sin \theta$$

$$|J_N| = Z^{N-1} \prod_{i=1}^{N-2} \sin^{N-1-i} \theta_i \tag{2.44}$$

En substituant (2.44) dans (2.36), on aura:

$$P_f = \frac{1}{(2\pi)^{(N-2)/2} \sigma_0^N} \prod_{m=1}^{N-2} \left[\int_0^\pi \sin^m \theta d\theta \int_{\sqrt{\gamma}}^\infty Z^{N-1} \exp\left(-\frac{Z^2}{2\sigma_0^2}\right) dZ \right] \tag{2.45}$$

On peut voir de cette expression que le seuil γ pour le test (2.30) apparait uniquement dans le deuxième intégrale de l'expression (2.45), qui sera évalué par parties, et qui peut être exprimé sous la forme itérative suivante:

$$I_N = \int_{\sqrt{\gamma}}^\infty Z^{N-1} \exp\left(-\frac{Z^2}{2\sigma_0^2}\right) dZ$$

$$I_N = \sigma_0^2 \gamma^{(N-2)/2} \exp\left(-\frac{\gamma}{2\sigma_0^2}\right) + (N-2)\sigma_0^2 \cdot I_{N-2} \tag{2.46}$$

Ainsi pour N paire:

$$I_N = \left[\gamma^{\binom{N-2}{2}} + (N-2)\sigma_0^2 \gamma^{\binom{N-4}{2}} + (N-2)(N-4)\sigma_0^4 \gamma^{\binom{N-6}{2}} + \dots + (N-2)(N-4)\dots 4\sigma_0^{(N-4)} \gamma + (N-2)(N-4)\dots 2\sigma_0^{(N-2)} \right] I_2 \tag{2.47}$$

Pour N impair:

$$I_N = \left[\gamma^{\binom{N-2}{2}} + (N-2)\sigma_0^2 \gamma^{\binom{N-4}{2}} + (N-2)(N-4)\sigma_0^4 \gamma^{\binom{N-6}{2}} + \dots + (N-2)(N-4)\dots 3\sigma_0^{N-3} \gamma^{(1/2)} \dots I_2 + (N-2)(N-4)\dots 3\sigma_0^{(N-2)} \right] I_1 \tag{2.48}$$

Où :

$$I_1 = \int_{\sqrt{\gamma}}^\infty \exp\left(-\frac{Z^2}{2\sigma_0^2}\right) dZ \tag{2.49}$$

$$I_2 = \int_{\sqrt{\gamma}}^\infty Z \exp\left(-\frac{Z^2}{2\sigma_0^2}\right) dZ = \sigma_0^2 \exp\left(-\frac{\gamma}{2\sigma_0^2}\right) \tag{2.50}$$

D'autre part, on peut noter:

$$S_m = \int_0^\pi \sin^m \theta \cdot d\theta = \frac{m-1}{m} S_{m-2} \tag{2.51}$$

$$S_m = \begin{cases} \frac{(m-1)(m-3)\dots 1}{m(m-2)\dots 2} & \text{si : } m \text{ est impair} \\ \frac{(m-1)(m-3)\dots 2}{m(m-2)\dots 3} & \text{si : } m \text{ est pair} \end{cases} \tag{2.52}$$

Et: $S_0 = \pi$ 2.53

Et $S_1 = 2$ 2.54

Donc on peut écrire la première partie de l'expression (2.45) comme une constante sous la forme suivante:

$$C_N = \frac{1}{(2\pi)^{(N-2)/2} \sigma_0^N} \prod_{m=1}^{N-2} S_m \quad 2.55$$

Par conséquent, on peut exprimer la probabilité de fausse alarme comme une fonction explicite de seuil γ :

$$P_f = C_N J_N(\gamma) \quad 2.56$$

Pour $N=2$:

La probabilité de fausse alarme est:

$$P_f = \exp\left(-\frac{\gamma}{2\sigma_0^2}\right) \quad \text{ou encore:} \quad P_f = e^{-\gamma/2\sigma_0^2} \quad 2.57$$

Et la probabilité de détection est:

$$P_d = \exp\left(-\frac{\gamma}{2\sigma_1^2}\right) \quad \text{ou encore:} \quad P_d = e^{-\gamma/2\sigma_1^2} \quad 2.58$$

Avec:

σ_0^2 : est une variance mesurée pendant un fonctionnement sain

σ_1^2 : Variance mesurée pendant un fonctionnement quelconque

γ : Le seuil du test

Le seuil du test γ est déterminé par:

$$\gamma = -2\sigma_0^2 \ln(P_f) \quad 2.59$$

Finalement, en combinant (2.57) avec (2.58) pour exprimer P_d en fonction de P_f , on aura comme limite supérieure de la fonction de puissance [74, 120, 121]:

$$P_d = P_f \left(\frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} \right) \quad 2.60$$

Etant donnée la probabilité de fausse alarme P_f déterminée par l'équation (2.33), et qui correspond au seuil γ du test défini par l'équation (2.59) d'une part, et accordant de l'autre part à la théorie des hypothèses test, des hypothèses du type (2.25) utilisant ce seuil donnera le maximum de la fonction de puissance P_d qui sera déterminée par l'équation (2.34) (son intégrale (2.60) donne la limite supérieure), qui est définie comme la probabilité de détection de paramètre σ_1^2 inconnu (la variance σ_1^2 est un paramètre estimé dans une durée du signal fixée au préalable). Ainsi le test uniforme le plus puissant (test UPP) existe dans le sens du critère Neyman-Pearson [117, 120-123],

qui maximise P_d (2.60) pour donner P_f parce que l'optimal du test de taux de probabilité (TTP) (2.30) pour chaque $\sigma_1^2 > \sigma_0^2$ pourra être complètement défini en dehors de la connaissance de la vraie variance σ_1^2 du signal défaut.

Finalement, le test UPP est défini par le système (2.30) et construit par les équations (2.28), (2.29), avec un seuil γ déterminé par la probabilité de fausse alarme préétablie (α):

$$P_f(\gamma) = \alpha \quad 2.61$$

Où : α est le seuil de signification.

2.6.6. Elaboration du Test Séquentiel de Wald (TSW)

Contrairement au test classique de choix simple, on n'est pas obligé de faire un choix entre les deux hypothèses H_0 et H_1 , par conséquent on a affaire à un autre type de test. La construction de ce test dans le cas où la taille des observations est fixe revient à partager le domaine des valeurs possibles de la statistique critique : [42, 114, 116, 124-126]

$$\Psi^{(n)} = \Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad 2.62$$

en deux régions : La région des valeurs vraisemblables, et la région des valeurs invraisemblables, sachant que l'hypothèse de base H_0 est vraie et si une valeur donnée de $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ tombe dans la région de valeurs invraisemblables, l'hypothèse de base est rejetée.

Le test séquentiel, c'est-à-dire le test basé sur une procédure séquentielle d'observation, est construit comme suit:

Pour chaque valeur de:

$$\nu = 1, 2, \dots, n, n+1 \quad 2.63$$

le domaine Γ_ν des valeurs possibles de la statistique critique $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ est partagé en trois régions disjointes:

- 1- $\Gamma_\nu^{H_0}$ région des valeurs vraisemblables;
- 2- $\Gamma_\nu^{H_1}$ région des valeurs invraisemblables;
- 3- Γ_ν^* région des valeurs douteuses. (sachant que H_0 est vraie)

$$\Gamma_\nu = \Gamma_\nu^{H_0} \cup \Gamma_\nu^{H_1} \cup \Gamma_\nu^* \quad 2.64$$

Où: $\nu = 1, 2, \dots$

A chaque pas v de la procédure séquentielle d'observation, c'est-à-dire après avoir enregistré les observations $x_1, \dots, x_v, v = 1, 2, \dots$ on prend une décision en se fondant sur la règle suivante qui définit le test de Wald :

Si $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Gamma_v^{H_0}$ on accepte H_0

Si $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Gamma_v^{H_1}$ on accepte H_1

Si $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Gamma_v^*$ le problème reste ouvert jusqu'à la $v^{i\text{ème}}$ observation.

Pour cette raison, la région Γ_v^* est appelée région d'indétermination ou région de poursuite des observations.

Pour l'établissement du test de vraisemblance de Wald, on considère deux hypothèses simples de la forme suivante : [42, 48, 50, 54, 114]

$$\begin{cases} H_0 & \text{L'échantillon est extrait d'une population de densité } f(x, \theta_0) \\ H_1 & \text{L'échantillon est extrait d'une population de densité } f(x, \theta_1) \end{cases} \quad 2.65$$

La statistique critique $\Psi^{(v)}$ de ce test est définie par la relation : [114],[50],[119]

$$\Psi^{(v)} = \ln \frac{f(x_1, \theta_1) \dots f(x_v, \theta_1)}{f(x_1, \theta_0) \dots f(x_v, \theta_0)} = \sum_{i=1}^v \ln \frac{f(x_i, \theta_1)}{f(x_i, \theta_0)} \quad 2.66$$

Où : $f(x_i, \theta_0) = P(\underline{X} / H_0)$ avec $\theta_0 = \sigma_0^2$

Et : $f(x_i, \theta_1) = P(\underline{X} / H_1)$ avec $\theta_1 = \sigma_1^2$

$P(\underline{X} / H_0)$ et $P(\underline{X} / H_1)$ pourront être tirées de l'équation (2.25). Ainsi, en établissant le rapport de vraisemblance, la statistique critique aura comme expression:

$$\Psi^{(v)} = \ln \left\{ \frac{e^{-\left[\frac{\sum_{i=1}^v x_i^2}{2\sigma_1^2} \right]} (2\pi)^{\frac{v}{2}} \sigma_1^v}{e^{-\left[\frac{\sum_{i=1}^v x_i^2}{2\sigma_0^2} \right]} (2\pi)^{\frac{v}{2}} \sigma_0^v} \right\} \quad 2.67$$

Après la simplification de l'équation (2.67) et l'arrangement du terme logarithmique, on obtient:

$$\Psi^{(v)} = \left[\frac{\sigma_1^2 - \sigma_0^2}{2\sigma_0^2 \sigma_1^2} \right] \sum_{i=1}^v x_i^2 + \frac{v}{2} \ln \left\{ \frac{\sigma_1^2}{\sigma_0^2} \right\} \quad 2.68$$

Les trois régions sont approximativement définies par les relations (2.63), (2.64), (2.65) et (2.68) qui définissent complètement le test de Wald (TW) (qui est déjà montré par la relation (2.16)) : [42, 50, 104, 109, 114, 118]

$$(TSW) \quad \begin{cases} \Gamma_{\nu}^{H_0} = \left\{ \Psi : \Psi^{(\nu)} \leq \ln \frac{\beta}{1-\alpha} \right\} \\ \Gamma_{\nu}^{H_1} = \left\{ \Psi : \Psi^{(\nu)} \leq \ln \frac{1-\beta}{\alpha} \right\} \\ \Gamma_{\nu}^* = \left\{ \Psi : \ln \frac{\beta}{1-\alpha} \leq \Psi^{(\nu)} \leq \ln \frac{1-\beta}{\alpha} \right\} \end{cases} \quad 2.69$$

Le test (2.69) est le plus optimal de tous les tests (test de Neyman-Pearson) entre les hypothèses (2.65) avec des seuils de premier et de deuxième espèce inférieure à des valeurs respectives α et β données par le Tableau 2.1 [104].

2.6.7. Détection des défauts de roulements

2.6.7.1. Procédure de détection

- 1- On prend la vibration discrète pour M échantillons, qui est plus grand que la grandeur de la période caractéristique du défaut.
- 2- Sélectionner une fenêtre de grandeur N pour le test.
- 3- Estimer la variance σ_0^2 en utilisant l'équation (2.26).
- 4- Avancer au choix α et β .
- 5- Positionner la fenêtre au début de l'enregistrement de la vibration.
- 6- Calculer $\Psi^{(N)}$ en utilisant l'équation (2.68).
- 7- Définir les intervalles des trois régions, par les bornes

$$a = \ln \frac{\beta}{1-\alpha} \quad \text{et} \quad b = \ln \frac{1-\beta}{\alpha}.$$

- 8- Faire le test en utilisant l'équation (2.69).
- 9- Générer un signal hypothétique, défini par :

$$h(i) = \begin{cases} 0 & \text{if } H_0 \text{ is true } (\Psi \leq a) \\ 1 & \text{if } H_1 \text{ is true } (\Psi \geq b) \end{cases}$$

Si $a \leq \Psi \leq b$ continuer à poursuivre les données, on ouvrant une autre fenêtre (ici, on ne prend pas de décision mais seulement on augmente la taille de la fenêtre).

Après la génération du signal hypothétique, si un défaut est présent, on aura un vecteur de données composé de deux valeurs 0 et 1, si le 1 apparaît périodiquement avec une période que celle de la fréquence caractéristique du défaut, alors le roulement est considéré comme défectueux.

En comparant la fréquence détectée avec les fréquences caractéristiques des roulements (fréquences de la cage, des éléments roulants, de la bague intérieure et de la bague extérieure), il serait très facile de localiser le défaut et pour établir le diagnostic, on doit comparer la fréquence détectée et ses multiples avec celle des défauts les plus connus.

2.6.7.2. Plan du test

Sur la base de la procédure de détection, un plan de test peut être établi, ce plan est illustré par le schéma de procédure représenté par la Figure 2.3 [42].

Pour que l'expérience soit valide, on choisit N comme une petite fraction de la période caractéristique du défaut, soit le cinquième de la période [41, 42].

En examinant l'étape (10) dans la procédure de détection pour montrer s'il existe une périodicité, on utilise l'auto-corrélation du signal. Sachant qu'un pic dans la fonction d'auto-corrélation révèle la périodicité du signal et la valeur du temps de ce pic donnera la période T_d du défaut. Par conséquent, On peut déterminer la fréquence du défaut f_d , et en comparant la fréquence détectée aux fréquences caractéristiques du roulement considéré, on peut établir le diagnostic.

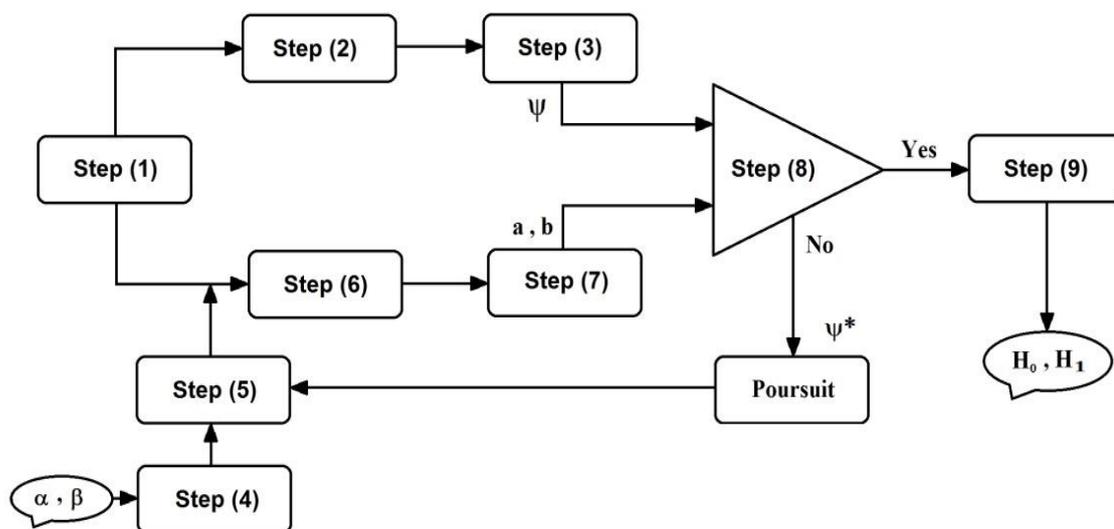


Figure 2.3: Plan du test (TSW)

2.7. Conclusion

De ce chapitre, on peut conclure que :

1. La procédure de confrontation de l'hypothèse avancée sur la nature ou la valeur des paramètres inconnus du système stochastique envisagé, aux résultats des observations par tel ou tel test s'appelle test statistique de cette hypothèse.
2. Les hypothèses peuvent porter sur la forme générale de la loi de probabilité de la variable aléatoire étudiée :

- L'indépendance et la stationnarité de la série d'observations.
 - La forme générale de l'interdépendance des composantes de la variable aléatoire multidimensionnelle étudiée;
 - L'homogénéité de deux ou plusieurs échantillons;
 - Les valeurs numériques des paramètres de la population générale étudiée;
3. Le principe de construction d'un test statistique est le suivant:
- a) On définit le type de l'hypothèse de base;
 - b) on propose et on justifie la forme de la fonction d'observations (la statistique critique $\Psi^{(n)}$) sur le vu des valeurs de laquelle on prend la décision finale;
 - c) on indique une méthode de définition, dans le domaine des valeurs possibles de la statistique critique $\Psi^{(n)}$, de la région $\Gamma_n^{H_1}$ de rejet de l'hypothèse de base H_0 , telle que soit satisfaite la condition portant sur la valeur du risque de l'hypothèse H_0 (c'est-à-dire du niveau α du test).
4. La « qualité » d'un test se juge à son niveau, sa puissance $1 - \beta$, sa propriété d'être sans biais et sa convergence. Si un test est convergent, on peut rendre les erreurs de première et de deuxième espèce (α et β) aussi petites que l'on veut uniquement en faisant croître le nombre n des observations, sur le vu desquelles on prend la décision. Si le nombre n des observations est fixe, seule l'une des erreurs α et β peut être rendue aussi petite que l'on veut, l'autre étant amenée à croître inévitablement.
5. Lorsque la taille n de l'échantillon est fixée, on peut, en plus de la procédure classique d'observation, utiliser une procédure séquentielle, dans laquelle à chaque observation on prend l'une des trois décisions suivantes: « accepter l'hypothèse H_0 », « rejeter l'hypothèse H_0 », « ne pas prendre de décision et poursuivre les observations ». Ceci étant, la prise de décision dépend des résultats des observations précédentes, et le nombre ν des observations effectuées avant la prise de décision est une variable aléatoire.
6. Les tests séquentiels optimaux du rapport de vraisemblance (le test de Wald, le test séquentiel généralisé, etc.) sont les plus économiques quant au nombre d'observations nécessaires pour vérifier l'hypothèse de base avec une précision (α , β) donnée. Les recherches ont montré que les tests séquentiels permettent de réduire de deux, trois et même quatre fois le nombre d'observation nécessaires par rapport aux tests optimaux classiques.

3. Séparation aveugle de sources

3.1. Introduction

La séparation de sources concerne les techniques de traitement du signal mises en œuvre pour retrouver plusieurs composantes élémentaires (les sources) à partir de combinaisons linéaires de ces sources reçues sur plusieurs capteurs [127].

C'est maintenant, un problème très général qui se manifeste dans plusieurs domaines et dans plusieurs applications. En acoustique sous-marine, l'antenne du sonar reçoit simultanément les signaux acoustiques émis par plusieurs bâtiments, perturbés par le bruit acoustique ambiant et par les bruits de cavitation produit par le bâtiment récepteur ; en prospection sismique les échos renvoyés par les surfaces de séparation entre les couches du sous-sol peuvent interférer entre elles ; aussi les entreprises de gestion des eaux peuvent s'en servir pour améliorer les systèmes de surveillance des barrages, contrôler leur déplacement qui est dû à des facteurs tels que le climat, la hauteur d'eau, le vieillissement et ainsi mettre en évidence les différents paramètres influençant les déplacements dudit barrage.

Tout le problème de la séparation Figure 3.1 consiste à concevoir des méthodes capables de retrouver les p sources inconnues observées au travers de q mélanges inconnus des p sources. Ces q mélanges sont obtenus par un réseau de q capteurs. Les p sources sont notés $x_i(t)$, avec $1 < i < p$ et elles sont regroupées en un vecteur $x(t)$. Soit $y(t)$ le vecteur d'observation dont les composantes sont $y_i(t)$, avec $1 < i < q$.

La séparation consiste à estimer le système A de Figure 3.1, telle que les composantes de :

$$y(t) = A.x(t) \quad 3.1$$

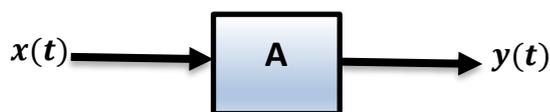


Figure 3.1 : Modèle SAS

soient des sources inconnues, et ceci afin de pouvoir restituer les signaux primitifs à partir des signaux composites.

3.2. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales est une méthode d'analyse statistique. C'est une transformation linéaire qui a été largement utilisée dans la compression et l'analyse de données.

En effet lorsqu'il y a une corrélation entre les m variables descriptives d'une distribution de données, la dimension de l'espace des données excède le nombre n de variables caractéristiques nécessaires pour décrire ces données. La transformation est destinée à réduire la dimension de la

représentation des données tout en préservant au mieux l'information qu'elles véhiculent. Elle est basé sur une représentation statistique de la population aléatoire x , où :

$$x = (x_1, \dots, x_m)^T \quad 3.2$$

La moyenne de cette population est donnée par :

$$\mu_x = E\{x\} \quad 3.3$$

La matrice de covariance des mêmes données [7] :

$$C_x = E\{(x - \mu_x) \cdot (x - \mu_x)^T\} \quad 3.4$$

Les composantes de C_x sont dénotées par C_{ij} , elles représentent la covariance entre les valeurs aléatoire de x_i et x_j . La composante C_{ii} est la variance de la composante x_i . La variance d'une composante renseigne sur la répartition de cette composante par rapport à la valeur moyenne.

Si deux composantes x_i et x_j sont décorréélées, alors leur covariance est nulle ($C_{ij} = C_{ji} = 0$). La matrice de covariance est par définition toujours symétrique. Pour un vecteur échantillon x_1, \dots, x_m , on peut calculer la moyenne ainsi que la covariance.

Pour une matrice symétrique telle que la matrice de covariance, on peut calculer l'orthogonalisation en trouvant simplement les valeurs propres λ_i et les vecteurs propres e_i . Les vecteurs propres e_i et les valeurs propres correspondantes sont les solution de l'équation de :

$$C_x \cdot e_i = \lambda_i \cdot e_i \quad \text{avec : } i = 1, \dots, n \quad 3.5$$

Pour simplifier, on suppose que les λ_i , sont distinctes. Ces valeurs peuvent être trouvées, en cherchant les solutions de l'équation caractéristique :

$$|C_x - \lambda \cdot I| = 0 \quad 3.6$$

Où, I est la matrice identité, du même ordre que C_x . Si le vecteur de données à n composantes, l'équation caractéristique sera du $n^{\text{ième}}$ ordre. Ceci se résout facilement si n est petit. Trouver les valeurs propres et les vecteurs propres est une tâche non triviale et plusieurs méthodes existent.

L'ordonnancement des vecteurs propres dépend de l'ordre des valeurs propres (par ordre décroissant), on peut créer un ordonnancement orthogonal avec comme premier vecteur propre, celui qui a les données contenant la plus grande variance.

Avec cette méthode, on trouve les directions des données qui ont la plus grande quantité d'énergie significative.

Supposons qu'on a un échantillon de données, auquel on a déterminé la matrice de covariance ainsi que la moyenne. Les colonnes de la matrice de A sont constituées des vecteurs propres de la matrice de covariance. Par transformation du vecteur de données x , on obtient :

$$y = A(x - \mu_x) \quad 3.6$$

Lequel, est un point dans le système de coordonnées orthogonales défini par les vecteurs propres. Les composantes de y peuvent être vues comme des coordonnées d'une base orthogonale.

$$x = A^T \cdot y + \mu_x \quad 3.7$$

En utilisant la propriété d'une matrice orthogonale $A^{-1} = A^T$. Avec A^T qui correspond à la transposition de la matrice A . Le vecteur original x est projeté sur l'axe de coordonnée définie par l'orthogonal de base. Le vecteur original est reconstruit par une combinaison linéaire des vecteurs orthogonaux de base.

A la place d'utiliser toutes les données de la matrice de covariance, on peut représenter des périodes de quelques données. Si on dénote la matrice des K premiers vecteurs propres par A_K , on peut créer une transformation similaire telle que :

$$y = A_K(x - \mu_x) \quad 3.8$$

et

$$x = A_K^T \cdot y + \mu_x \quad 3.9$$

Ceci signifie qu'on peut projeter le vecteur original de données sur les axes de coordonnées de même dimension que K et transformer le vecteur par une combinaison linéaire des vecteurs de bases. On a deux choix contradictoires : L'un est de simplifier le problème, en réduisant les dimensions de la représentation, l'autre est de préserver autant que possible le contenu de l'information originale. L'analyse en composantes principales offre la manière qui convient pour contrôler le compromis, garder les informations et simplifier le problème.

3.3. Blanchiment de données

Le blanchiment revient en fait à effectuer une opération (une standardisation) sur des variables aléatoire scalaires. Cette opération peut aussi être définie dans le cas de données multi-variables, pour des vecteurs à valeurs réelles ou complexes [127].

Soit x un vecteur aléatoire de moyenne μ_x et de matrice de covariance C , strictement définie positive ($C = k_{xii}$ pour les valeurs réelles et $C = k_{xii}$ pour les valeurs complexes). La standardisation est la transformation affine qui associe à x un vecteur aléatoire centré dont la matrice de covariance est l'identité I . Le vecteur aléatoire standardisé est :

$$\hat{x} = W(x - \mu_x) \quad 3.10$$

La matrice W est la solution de la relation :

$$W \cdot C \cdot W^T = I \quad 3.11$$

La matrice W , qui diagonalise la matrice de covariance de x , n'est pas unique.

Par convention on choisit :

$$W = \Delta^{-\frac{1}{2}} \cdot U^T \quad 3.12$$

Δ étant la matrice diagonale des valeurs propres de C et U la matrice unitaire dont les colonnes sont les vecteurs propres normalisés de C .

Le vecteur \hat{x} est défini à une matrice multiplicative près de la forme ΔP , où Δ est la diagonale et constituée d'éléments de module 1, et P est la matrice de permutation, On range souvent les valeurs propres dans l'ordre de leurs valeurs décroissantes.

3.4. Fonction contraste

Les fonctions contrastes permettent d'estimer les ICs et peuvent être utilisées pour dériver un local [11], Ceci est d'autant plus intéressant, car les fonctions à l'ordre 4 se développent rapidement ce qui les rend assez sensibles aux fuyards. En utilisant des fonctions contrastes qui croient plus lentement que les fonctions à l'ordre 4, on obtient des algorithmes plus robustes contre les fuyards.

La notion de fonction contraste peut être vue comme une mesure d'indépendance qui constitue un critère de séparation dans la mesure où sa maximisation résout le problème de séparation. Elle est définie de la façon suivante: Une fonction contraste $J(\cdot)$ est une application dans \mathbb{R}^N , ne dépendant que de la loi de probabilité de y , telle que :

- $\forall P$ matrice de permutation $J(P_y) = J(y)$.
- $\forall P$ matrice diagonale inversible $J(D_y) = J(y)$
- $\forall a$ vecteur de composantes indépendantes, $\forall S, J(x) \geq J(S_x)$
- $J(S_x) = J(x) \Leftrightarrow S = D \cdot P$

Les deux premiers points de définition signifient que l'on ne discrimine pas une solution parmi l'ensemble des solutions possibles et que l'on impose donc un contraste indépendant des indéterminations inhérentes à la séparation. Le troisième point indique qu'il s'agit de maximiser la fonction tandis que le dernier impose que tous les maxima globaux soient des solutions de séparation. On montre alors que la fonction :

$$I_2(y) = \sum_{i=1}^N C_p^2 \cdot y_i, \quad p \geq 3 \quad 3.13$$

Où $C_p \cdot y_i$ est l'auto cumulants d'ordre p de la variable aléatoire réelle y_i , est un contraste pour l'ensemble des vecteurs aléatoires blancs, ayant au plus une composante de cumulants d'ordre p nul.

Un vecteur aléatoire est dit blanc, si et seulement si $Eyy^A = I$. Il est montré que la fonction :

$$I_{(p,q)}(y) = \sum_{i=1}^N |C_{p,q} \cdot y_i|, \quad p + q \geq 3 \quad 3.14$$

Où $C_{p,q} \cdot y_i = \text{Cum}(y_i, \dots, y_N, y_i^*, \dots, y_N^*)$ est le cumulants d'ordre (p, q) de la variable aléatoire complexe y_i , est un contraste pour l'ensemble des vecteurs aléatoires blancs ayant au plus une composante de cumulants d'ordre (p, q) nulle. Il est aussi montré que la fonction :

$$J_{(p,p)}(y) = \varepsilon_p \cdot \sum_{i=1}^N C_{p,p} \cdot y_i, \quad p \geq 2 \quad 3.15$$

Où $\forall i, \varepsilon_p = \text{sign}(C_{p,p}, x_i)$ est un contraste pour l'ensemble des vecteurs aléatoires blancs ayant des composantes de cumulants d'ordre (p, p) non nulles. On ne considère que ce dernier contraste où $p = 2$ dans la suite. La séparation de source correspond maintenant à l'optimisation du critère :

$$\max \varepsilon_p \sum_{i=1}^N C_{2,y_i}, p \geq 3 \text{ sous la contrainte } Eyy^A = I \quad 3.16$$

3.5. La méthode à point fixe

Un point fixe se détermine lorsque l'équation vaut $g(x) = x$ [12].

Exemples:

- La fonction $g(x) = x$,

$g(x)$ définie entre $0 < x < 1$, a des points fixes pour chaque valeurs de x compris dans l'intervalle $[0,1]$.

- La fonction $g(x) = x - \sin \pi x$,

$g(x)$ représentée par la Figure 3.2, a deux points fixes compris dans l'intervalle $[0,1]$, pour $x = 0$ et $x = 1$

```

Step 1: Initialiser  $i = 1$ 
Step 2: Tant que  $i \leq N_0$  faire Step 3 to 6
Step 3: Affecter  $p = g(p_0)$ 
Step 4: Si  $|p - p_0| < TOL$ 
Output( $p$ ), Stop
Step 5: incrémenter  $i = i + 1$ 
Step 6: affecter  $p_0 = p$ 
Step 7: Output
( Traitement interrompu après,  $N_0 = N_0$ ), Stop

```

Algorithme

Pour trouver la solution à $g(p) = p$

Paramètres d'entrée :

initialisation de p_0 ; tolérance **TOL**; nombre maximal d'itération N_0

Paramètres de sortie :

solution approximée de p ou message d'erreur

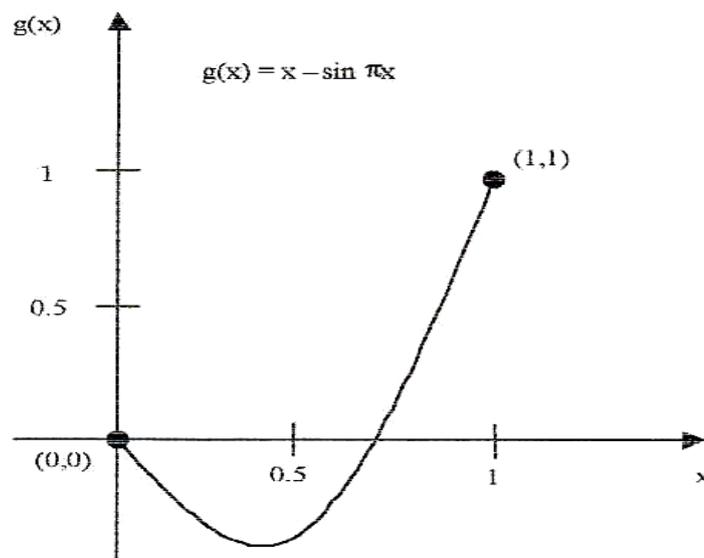


Figure 3.2: Variation de $g(x)=x-\sin(\pi \cdot x)$

3.6. Analyse en composantes indépendantes

L'Analyse en Composantes Indépendantes ICA [127-129] est une technique du traitement du signal dont le but est d'exprimer un ensemble de variables aléatoires sous la forme de combinaisons linéaires des variables des composantes statistiquement indépendantes.

La simplicité de l'ACI « Figure 3.3 » est, qu'on observe m qui est une variable aléatoire (scalaire) v_1, v_2, \dots, v_m lequel est assuré être une combinaison linéaire de n composantes indépendantes inconnues, appelées s_1, s_2, \dots, s_n . Ces composantes indépendantes s_i sont assurées être statistiquement et mutuellement indépendantes et à moyenne nulle [128-131]. Disposons les variables observées v_j dans un vecteur $v = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T$ et les composantes indépendantes s_i dans un vecteur s respectivement, donc la relation linéaire est donnée par :

$$v = A \cdot s \quad 3.17$$

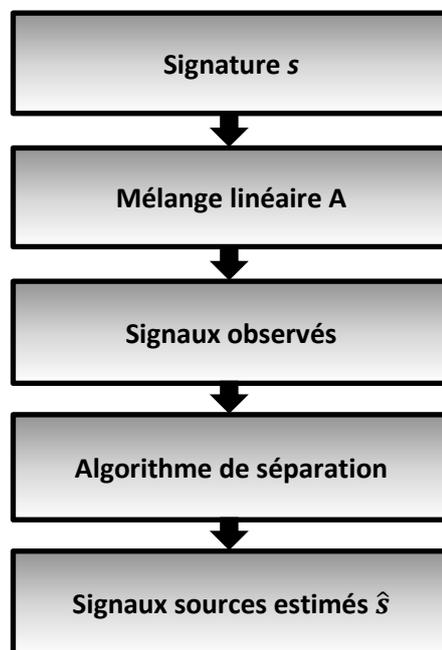


Figure 3.3: Synoptique d'Analyse en Composantes Indépendantes

Ici, A est une matrice inconnue, de taille $m \times n$ à colonnes pleines, appelée matrice de mélange. Le problème de l'Analyse en Composantes Indépendantes est alors d'estimer les composantes originales s_i à partir des mélanges v_j ce qui revient à estimer la matrice de mélange A .

Les deux restrictions fondamentales du modèle sont :

- On peut seulement estimer les composantes indépendantes s_i non gaussienne (excepter si une des CIs est une gaussienne),
- On doit avoir au moins plusieurs observations du mélange linéaire c'est-à-dire : $m \geq n$.

La supposition de la moyenne nulle des CIs, n'est pas une restriction. En effet, on peut toujours faire une soustraction de la moyenne au vecteur aléatoire y .

Pour la commodité mathématique, on définit ici que les composantes indépendantes si ont une variance unitaire. Cela rend les composantes indépendantes (non gaussiennes) uniques, jusqu'à leurs signes. Notez qu'aucun ordre n'est défini entre les composants indépendants.

De plus, les conséquences de l'indétermination de perturbation (inversion des signaux les uns par rapport aux autres) et de signe (opposition ou non des signaux restitués par rapport aux signaux d'origine) seront ignorées.

3.7. Applications de l'ACIs

Dans la séparation aveugle de sources, on observe les valeurs de v correspondant à la réalisation du signal temporel discret $v(t)$, $t = 1, 2, \dots$ de dimension m , donc les composantes $s_i(t)$ sont appelées signaux sources, qui sont généralement des signaux originaux non corrompus ou des signaux de bruits [129, 132].

Il est aussi possible d'appliquer l'ICA pour l'extraction des caractéristiques [133, 134]. Dans ce cas, les colonnes de la matrice A représentent les caractéristiques, et le signal s_i représente l'amplitude de la $i^{\text{ème}}$ caractéristique des données observées v .

Le problème de l'estimation de la matrice A dans l'équation 3.17 peut être quelque peu simplifié en effectuant un balayage préliminaire ou un pré-blanchiment des données v [128, 132, 135]. Le vecteur observé v est transformé linéairement en un vecteur $x = M \cdot v$ de sorte que ses éléments x_i sont mutuellement non corrélés, et ont une variance unitaire.

Ainsi, la matrice de corrélation de x est égale à l'unité:

$$E\{x \cdot x^T\} = I \quad 3.18$$

Cette transformation est toujours possible et peut être accomplie par une analyse classique en composantes principales. En même temps, la dimensionnalité des données doit être réduite de sorte que la dimension du vecteur de données transformé x soit égale à n , le nombre de composantes indépendantes. Cela a également pour effet de réduire le bruit.

Après la transformation, on aura :

$$x = M \cdot v = M \cdot A \cdot s = B \cdot s \quad 3.19$$

Où $B = M \cdot A$ est une matrice orthogonale à cause des suppositions sur les composantes s_i :

elle contient $B \cdot E\{ss^T\} \cdot B^T = B \cdot B^T = I$.

Donc le problème de trouver la matrice arbitraire complète A est réduit en un problème simple, de trouver la matrice orthogonale B , ce qui donne alors :

$$s = B^T \cdot x \quad 3.20$$

Si la $i^{\text{ème}}$ colonne de B est notée b_i , alors la $i^{\text{ème}}$ composante indépendante peut être calculée à partir du x observé comme :

$$s_i = (b_i)^T \cdot x \quad 3.21$$

3.8. Types d'algorithmes d'ACI

Les algorithmes pour l'analyse en composantes indépendantes « ACI » peuvent être globalement divisés en deux catégories.

- Les algorithmes de la première catégorie [128, 136-138], reposent sur des calculs par lots qui minimisent ou maximisent certaines fonctions de critère pertinentes « fonction contraste basé sur le cumulants du plus grand ordre ». Le problème avec ces algorithmes est qu'ils nécessitent des opérations matricielles ou tensorielles très complexes.
- La deuxième catégorie contient des algorithmes adaptatifs souvent basés sur des méthodes de gradient stochastique, qui peuvent avoir des implémentations dans des réseaux de neurones [129, 135, 139-143]. Le principal problème de cette catégorie est la lenteur de la convergence, le fait que la convergence dépend essentiellement du bon choix des paramètres du taux d'apprentissage.

3.9. Kurtosis comme Fonction Contraste

Le Kurtosis ou le cumulants du quatrième ordre est défini comme une variable aléatoire à moyenne nulle v tel que :

$$\text{kurt}(v) = E\{v^4\} - 3. (E\{v^2\})^2 \quad 3.22$$

Où E représente l'espérance mathématique.

Pour une variable aléatoire gaussienne, le Kurtosis est nul, pour les densités prépondérantes à zéro, il est positif, et pour les densités plus plates, il est négatif. Notez que pour deux variables aléatoires indépendantes v_1 et v_2 et pour un scalaire α , il a comme propriété :

$$\text{kurt}(v_1 + v_2) = \text{kurt}(v_1) + \text{kurt}(v_2) \quad 3.23$$

Et
$$\text{kurt}(\alpha \cdot v_1) = \alpha^4 \cdot \text{kurt}(v_1) \quad 3.24$$

On cherche une combinaison linéaire des observations x_i , de type $w^T \cdot x$, de telle sorte qu'elle présente un Kurtosis maximal ou minimal et que la norme de w est limitée, supposée égale à 1 « $\|w\| = 1$ » .

Et, on utilise la matrice orthogonale B du mélange en définissant : $z = B^T \cdot w$, puis aussi $\|z\| = 1$ et en se basant sur l'équation 3.19 et les propriétés du Kurtosis, on aura :

$$\text{kurt}(w^T \cdot x) = \text{kurt}(w^T \cdot B \cdot s) = \text{kurt}(z^T \cdot s) = \sum_{i=1}^n z_i^4 \cdot \text{kurt}(s_i) \quad 3.25$$

Sous la contrainte $\|w\| = \|z\| = 1$, la fonction de l'équation 3.25 a un nombre de minima et maxima locaux.

Pour simplifier, on suppose que le mélange contient au moins une composante indépendante dont le Kurtosis est négatif et un autre de Kurtosis positif.

Puis, comme il a été montré par Delfosse [140], les points extrémaux de l'équation 3.25 sont des vecteurs de base canoniques $z = \pm e_j$ c'est-à-dire que les vecteurs des composantes sont toutes nulles sauf une composante égale à ± 1 . Les vecteurs de poids correspondants sont $w = B.z = B.e_j = b_j$ (peut-être avec un signe moins), c'est-à-dire les colonnes de la matrice de mélange orthogonale B . Ainsi en minimisant ou maximisant le Kurtosis dans l'équation 3.25 sous la contrainte donnée, les colonnes de la matrice de mélange sont obtenues comme des solutions pour w , et la combinaison linéaire elle-même sera l'une des composantes indépendantes:

$$w^T \cdot x = (b_j)^T \cdot x = s_j \quad 3.26$$

L'équation 3.25 montre également que les composantes gaussiennes ne peuvent pas être estimées de cette manière, car leurs $kurt(s_j)$ est nul.

Pour minimiser ou maximiser $kurt(w^T \cdot x)$, un algorithme neuronal basé sur la descente du gradient peut être utilisé [140, 141]. Alors w est interprété comme le vecteur de poids d'un neurone avec le vecteur d'entrée x . La fonction objective peut être simplifiée :

$$kurt(w^T \cdot x) = E\{(w^T \cdot x)^4\} - 3. [E\{(w^T \cdot x)^2\}]^2 = E\{(w^T \cdot x)^4\} - 3. \|w\|^4 \quad 3.27$$

De plus, la contrainte $\|w\| = 1$ doit être prise en compte, par un terme additif [141], alors la fonction objective finale est :

$$J(w) = E\{(w^T \cdot x)^4\} - 3. \|w\|^4 + F(\|w\|^2) \quad 3.28$$

où F est un terme additif dû à la contrainte ; dans les travaux de recherches, plusieurs formes de terme additif ont été suggérés « le deuxième terme de J était également inclus dans le terme additif [141] ». Dans ce qui suit, la forme exacte de F n'est pas importante. En dénotant par $x(t)$ la séquence d'observations, par $\mu(t)$ la séquence du taux d'apprentissage et par f la dérivée de $F/2$, l'algorithme d'apprentissage aura alors la forme suivante :

$$w(t+1) = w(t) \pm \mu(t)[x(t) \cdot (w(t)^T \cdot x(t))^3 - 3. \|w(t)\|^2 \cdot w(t) + f(\|w(t)\|^2) \cdot w(t)] \quad 3.29$$

Les deux premiers termes entre parenthèses sont obtenus à partir du gradient de $kurt(w^T \cdot x)$ lorsque des valeurs instantanées sont utilisées à la place de l'espérance. Le troisième terme entre parenthèses est obtenu à partir du gradient de $F(\|w\|^2)$; et tant qu'elle est une fonction de $\|w\|^2$ seulement, son gradient a la forme scalaire $\times w$. Un signe positif devant les parenthèses correspond aux maxima locaux et un signe négatif correspond aux minima locaux.

La convergence de ce type d'algorithme peut être prouvée en utilisant les principes d'approximation stochastique [130].

L'avantage de telles règles d'apprentissage neurales est que les entrées $x(t)$ peuvent être utilisées dans l'algorithme à la fois, permettant ainsi adaptation rapide dans un environnement non stationnaire. Un compromis résultant est que la convergence est lente et dépend d'un bon choix du taux d'apprentissage séquence $\mu(t)$. Un mauvais choix du taux d'apprentissage peut, en pratique,

détruire la convergence. Par conséquent, certaines façons de rendre l'apprentissage radicalement plus rapide et plus fiable peut être nécessaire. Les algorithmes d'itération à point-fixe sont une telle alternative [130].

Les points fixes w de la règle d'apprentissage de l'équation 3.29 sont obtenus en assimilant la variation du poids à 0:

$$E\{x \cdot (w^T \cdot x)^3\} - 3 \cdot \|w\|^2 \cdot w + f(\|w\|^2) \cdot w = 0 \quad 3.30$$

L'indexation temporel t a été supprimé. Une itération déterministe pourrait être formée à partir de l'équation 3.30 par des algorithmes numériques standard pour résoudre une telle équation. Une itération très rapide sera obtenue, si l'équation 3.30 prend la forme suivante [130] :

$$w = \text{scalaire} \times (E\{x \cdot (w^T \cdot x)^3\} - 3 \cdot \|w\|^2 \cdot w) \quad 3.31$$

3.10. Algorithme à Point Fixe utilisant le kurtosis

On va introduire le principe de l'itération à point fixe utilisant la classique fonction contraste ainsi que le Kurtosis. Ainsi, on exploite une famille de nouveaux algorithmes pour améliorer le calcul nécessaire pour estimer l'ACI, par conséquent, on introduit une famille de fonctions contrastes qui sont liées à l'estimation des CI. Ensuite, on va montrer comment l'algorithme à point fixe peut être généraliser pour trouver l'extrême qui convient aux fonctions contrastes.

L'algorithme généralisé à point fixe a beaucoup d'avantages :

- Il est facile à implémenter et à faire fonctionner. En effet, il n'y a pas de paramètre à initialiser et il n'exige pas de blanchiment de données.
- Il converge rapidement, ce qui peut être prouvé analytiquement.

En choisissant convenablement la fonction contraste, l'algorithme généralisé à point fixe est beaucoup plus robuste contre les fuyards que la majorité des algorithmes d'ACI proposés dans la littérature, lesquels sont souvent fondés sur une estimation du quatrième ordre

3.11. Dérivation de l'Algorithme à Point Fixe

Pour trouver le maximum du kurtosis de l'algorithme, il suffit de dériver son expression, et la dérivée du kurtosis de $w^T \cdot x$, avec w comme variable est :

$$\nabla_w \text{kurt}(w^T \cdot x) = 4[E\{x \cdot (w^T \cdot x)^3\} - 3 \cdot C \cdot w \cdot E\{(w^T \cdot x)^2\}] \quad 3.32$$

Où $C = E\{xx^T\}$ est la covariance des données.

L'optimisation du kurtosis avec la contrainte $E\{(w \cdot x)^2\} = w^T \cdot C \cdot w = 1$. Avec la condition classique de Kuhn-Tucker, on trouve comme extremum :

$$\begin{aligned} \lambda \cdot \nabla_w E\{(w^T \cdot x)^2\} &= \nabla_w \text{kurt}(w^T \cdot x) \\ 2 \cdot \lambda \cdot C \cdot w &= 4[E\{x \cdot (w^T \cdot x)^3\} - 3 \cdot C \cdot w \cdot E\{(w^T \cdot x)^2\}] \\ w &= \frac{2}{\lambda} [C^{-1} \cdot E\{x \cdot (w^T \cdot x)^3\} - 3 \cdot w] \end{aligned} \quad 3.33$$

Où λ est le coefficient de Lagrange. Cette clarté suggère un algorithme à point fixe dans lequel le vecteur $w(k-1)$ est actualisé au $k^{\text{ième}}$ passage tel que :

$$w^*(k) = C^{-1} \cdot E \left\{ x \cdot (w(k-1)^T \cdot x)^3 \right\} - \lambda \cdot (k-1) \quad 3.34$$

$$w(k) = \frac{w^*(k)}{\sqrt{w^*(k)^T \cdot C \cdot w^*(k)}} \quad 3.35$$

Où l'optimisation des signaux utilise un grand nombre d'échantillons de données. Si la matrice C n'est pas singulière, la dimension des données doit être réduite en utilisant l'analyse en composantes principales.

3.12. Généralisation des algorithmes à point fixe

Actuellement la recherche d'extrema locaux peut être effectuée par différentes méthodes de manière stochastique par la descente du gradient, ou bien en utilisant une approche neuronale adaptative basée sur le kurtosis. Une autre méthode consiste à utiliser la méthode à point fixe qui s'avère fiable et simple à utiliser pour trouver un extremum.

3.13. Evaluation d'une composante indépendante

Pour tirer des avantages de l'algorithme à point fixe, il faut noter que lorsque :

$$E\{(w^T \cdot x)^2\} = w^T \cdot C \cdot w = 1 \quad 3.36$$

le gradient de $J_G(w^T \cdot x)$ est égal à :

$$\nabla_w J_G(w^T \cdot x) = E\{x \cdot g(w^T \cdot x)\} - E\{x \cdot g'(y) \cdot C \cdot w\} \quad 3.37$$

Où $g = G'$ est la dérivée de G avec g' est la dérivée de g . Maintenant, on utilise la même démarche que dans la partie traitant du « Kurtosis comme Fonction Contraste » c'est-à-dire on utilise la condition de Kuhn-Tucker pour obtenir une généralisation de l'algorithme à point fixe.

$$w^*(k) = C^{-1} \cdot E\{x \cdot g(w(k-1)^T \cdot x)^3\} - E\{g'(w(k-1)^T \cdot x)\} \cdot w(k-1) \quad 3.38$$

Où g représente la non-linéarité qui peut être choisie de façon aléatoire, mais doit cependant être suffisamment régulière. On remarque que v a été remplacé par $w^T \cdot x$ afin d'accroître la convergence, ce changement n'affecte en rien la condition de Kuhn-Tucker.

3.14. Evaluation de plusieurs composantes indépendantes

Pour estimer plusieurs ICs, on doit exécuter l'équation 3.33 de Kuhn-Tucker en utilisant plusieurs vecteurs w_1, \dots, w_N et pour empêcher les différents vecteurs de converger vers le même extremum, on doit décorrélérer la combinaison linéaire $w_1^T \cdot x, \dots, w_N^T \cdot x$ à chaque itération de l'algorithme, et aussi on doit être sûr qu'ils sont re-normalisés et à variance unitaire ; c'est la méthode la plus directe pour parvenir à la méthode par déflation, basé sur le schéma de « Gram-Schmidt-like ».

Cette méthode permet d'estimer les ICs les uns après les autres et quand on doit estimer p composantes indépendantes (ICs), où p vecteurs w_1, \dots, w_N , on utilise l'équation de Kuhn-Tucker à laquelle on retranche à chaque itération la projection des p vecteurs. Après on re-normalise le tout.

$$w_{p+1}(k) = w(k-1) - \sum_{j=1}^p w_{p+1}(k)^T \cdot C \cdot w_j \cdot w_j$$

$$w_{p+1}(k) = \frac{w_{p+1}(k)}{\sqrt{w_{p+1}(k)^T \cdot C \cdot w_{p+1}(k)}} \quad 3.39$$

Une approche par déflation est donc une version par parallèle utilisant une orthogonalisation de Gram-Schmidt et les vecteurs sont donc estimés séquentiellement.

3.15. Choix de la non-linéarité

Les trois non-linéarités utilisées sont:

- Tangente hyperbolique « tanh » : $G_1(u) = \tanh(u) \Rightarrow g'_1(u) = \cosh^{-2}\{u\}$ 3.40

- Gaussienne « gaus » : $G_2(u) = u \cdot \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \Rightarrow g'_2(u) = (1 - u^2) \cdot \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)$ 3.41

- Puissance cubique « pow3 »: 'pow3' $G_3(u) = u^3 \Rightarrow g'_3(u) = 3 \cdot u^2$ 3.42

3.16. FastICA

FastICA est un algorithme à point fixe destiné à calculer l'extremum de la fonction kurtosis d'une densité de probabilité. Le kurtosis est le cumulante du 4^{ème} ordre, défini pour une variable aléatoire (v) à moyenne nulle, tel que :

$$\text{kurt}(v) = E\{v^4\} - 3 \cdot (E\{v^2\})^2 \quad 3.43$$

Le kurtosis est une fonction de contraste pour l'analyse en composantes indépendantes. Considérons la combinaison linéaire $W^T \cdot x$ des signaux mélangés et observés x , où W est soumis à la contrainte $E\{(W^T \cdot x)^2\} = 1$, lorsque la combinaison linéaire est égale au signe près à une des composantes indépendantes, le kurtosis de $W^T \cdot x$ est localement minimisé ou maximisé.

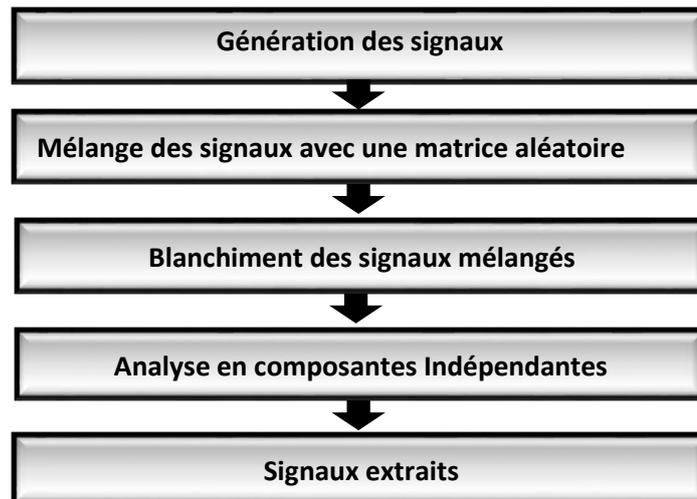
Cette propriété est utilisée par FastICA pour calculer les composantes indépendantes et ainsi obtenir la séparation des signaux sources.

Deux versions de FastICA ont été implémentées, la première utilise une approche par déflation, méthode qui traite les signaux l'un après l'autre, la deuxième est une approche symétrique, dans ce cas on traite tous les signaux en même temps. Les deux approches ont des résultats similaires.

3.17. Organigramme fonctionnel-FastICA

Les signaux qui seront injectés dans l'algorithme pour la séparation, sont des indépendants les uns par rapport aux autres et qui sont choisis de façon aléatoire. Dans le cas de la simulation réel, on choisit trois signaux issu d'un même banc d'essai et qui représentent les signaux d'engrenages et de roulements.

Les signaux mélangés résultent du mélange des signaux sources par une matrice de mélange aléatoire. L'analyse en composantes principales permet de compresser les données, ou encore d'extraire un signal parasite tel que le bruit. Le blanchiment est une opération qui revient à effectuer une standardisation des données. Cela se traduit par une variance nulle de ces données ainsi qu'une matrice de covariance qui est la matrice identité. L'analyse en composantes indépendantes basée sur l'algorithme FastICA de la Figure 3.4, permet de restituer les composantes indépendantes, en l'occurrence des signaux sources.



Algorithme : L'algorithme de calcul peut être comme suivant:

Step 1 : Si cela est nécessaire, réduire la taille des données afin que la matrice de covariance ne soit pas singulière.

Step 2 : Initialiser les N vecteurs, $W_1(0), \dots, W_N(0)$ avec des valeurs aléatoires, puis décorréler et normaliser les. Initialiser la variable k à 1.

Step 3 : Pour toutes les valeurs de $W_i(k-1)$, avec $i = 1, \dots, N$, faire une itération à point fixe en Choissant auparavant la linéarité.

Step 4 : Décorréler et normaliser les vecteurs ainsi obtenus $W_i(k)$ en se servant de l'expression :

$$w_{p+1}(k) = w_{p+1}(k) \cdot [w_{p+1}(k)^T \cdot C \cdot w_{p+1}(k)]^{-\frac{1}{2}}$$

Step 5 : Incrémenter la variable k ($k = k + 1$), jusqu'à ce que l'expression $\sum |1 - W_i(k-1)^T \cdot W_i(k)|$ soit suffisamment petite.

3.18. Objectif de l'algorithme

Le principal objectif de l'algorithme, est la convergence rapide et cela est montré dans plusieurs travaux [130, 131] , pour cela, il faut choisir judicieusement la non-linéarité (gaussienne, tangente-hyperbolique et puissance cubique). Dans le présent travail, on va opter plus tard dans la partie validation expérimentale de l'algorithme, pour la non-linéarité gaussienne [130, 131] qui sera appliquée par l'algorithme FastICA pour la séparation de sources aveugles sur cinq groupes de signaux réels, chaque groupe contient trois signaux d'engrenages et de roulements et qui seront choisis aléatoirement.

3.19. Conclusion

On a présenté une version généralisée des algorithmes à point fixe appliqués à l'analyse en composantes indépendantes. Ces algorithmes ont comme particularités :

- Absence de paramètres à configurer. En effet, les seuls éléments à configurer sont les choix de la non-linéarité (tangente-hyperbolique, puissance cubique et la gaussienne).
- D'être simples à implémenter.
- De ne pas nécessiter de pré-blanchiment des données.
- Leur convergence peut être prouvée analytiquement.
- D'être plus robustes contre les fuyards que les classiques algorithmes habituellement rencontrés en ICA.

4. Expérimentations et traitements des résultats

4.1. Introduction

Dans cette partie, on va présenter deux banc d'expérimentation des roulements et engrenages, le premier celui de EDF de Chatou, implanté au laboratoire GIPSA-lab, Grenoble Images Parole Signal Automatique laboratoire, INP-Grenoble, le second est celui de EUROCOPTER implanté au Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures LaMCoS, INSA Lyon.

Pour le premier banc, on a fait l'expérience sur des roulements et engrenages, sous différents régimes de fonctionnements charges et vitesses variables, pour cela on a mesuré tous les signaux : les températures du liquide de refroidissement, les courants et les tensions d'alimentation, les couples d'entrée et de sortie de la boîte de vitesse et aussi les accélérations et qu'on va les exploiter pour donner des éclaircissements sur le comportement dynamique des roulements.

Pour le second banc, on a fait l'expérience sur des roulements à billes et à rouleaux NU et NJ et engrenages à dentures droites sous deux charges 60 N.m et 120 N.m et trois vitesses 1300, 2300 et 4300 tr/min avec l'introduction volontaire des défauts, la méthodologie d'expérimentation a été basée sur les tables orthogonales de TAGUCHI.

Après l'acquisition des données nécessaires ; on va les traiter et exploiter pour la validation expérimentale des algorithmes de détection, et aussi pour examiner l'influence de la vitesse et de la charge sur le comportement dynamique des roulements.

4.2. Banc d'essai Gipsa-lab

4.2.1. Présentation du banc et fonctionnement

En vue de déceler les défauts de fonctionnement sur les engrenages et les machines tournantes, le banc d'essais EDF a été remis en service. Ce banc fourni par le centre EDF de Chatou (voir synoptique), se compose des éléments suivants [144]:

1. Un moteur asynchrone d'entraînement.
2. Un dispositif de mesure de vitesse sur l'arbre de sortie du moteur.
3. Un limiteur de couple.
4. Un accouplement souple.
5. Une boîte d'engrenages multiplicatrice (57/15).
6. Un accouplement souple.
7. Un couplemètre avec prise de mesure de vitesse de sortie.
8. Un accouplement souple.
9. Un moteur de charge avec dynamo tachymétrique.

De plus un système de lubrification sous pression avec échangeur de température huile-eau maintient les engrenages dans de bonnes conditions de fonctionnement.

Quatre armoires électriques sont installées ;

- Armoire générale pour répartition électrique sur les moteurs d'entraînement et de charge ainsi que leur protection.
- Armoire moteur pour commander et protéger le moteur d'entraînement.
- Armoire de charge pour commander et fournir les alimentations du moteur de charge, avec réinjection secteur du courant d'induit.
- Armoire variateur de vitesse.

Une baie de mesures permet la surveillance des 5 températures, des vitesses d'entrée et de sortie de la boîte d'engrenages, du courant consommé sur une phase du moteur d'entraînement, du couple en sortie du boîtier multiplicateur.

Le boîtier d'engrenages comporte huit (08) accéléromètres pouvant être répartis sur douze (12) points de mesure orthogonaux, correspondant aux quatre (04) paliers des deux arbres. Leurs signaux sont amenés sur des préamplis adaptés montés dans la baie de mesures.

Ils sont enregistrés, ainsi que les paramètres précédents sur une chaîne d'acquisition Racal Storeplex Delta.

Pour leur traitement, un transfert numérique sur PC avec démultiplexage permet d'avoir accès directement aux « n » données acquises.

Remarque :

1. La charge du boîtier d'engrenages multiplicateur est commandée par un « potentiomètre de couple » situé sur la baie de mesures. (Couple maximal = 184 mN)
2. L'enregistrement, pour un suivi continu de la tension du réseau est assuré par une sonde différentielle atténuatrice.
3. Le moteur d'entraînement peut fonctionner à différentes vitesses grâce au variateur de vitesse ALTIVAR 66 modèle ATV-66D79N4F de TELEMECANIQUE.
4. Les codeurs optiques sont utilisés pour un positionnement angulaire plus précis.
5. En plus du couple d'engrenages (roue dentée/pignon arbré) usé, fourni avec le banc, on dispose aussi de deux couples d'engrenages neufs, l'un en acier mi-dure, l'autre en acier cémenté trempé.



Figure 4.1: Banc côté entraînement

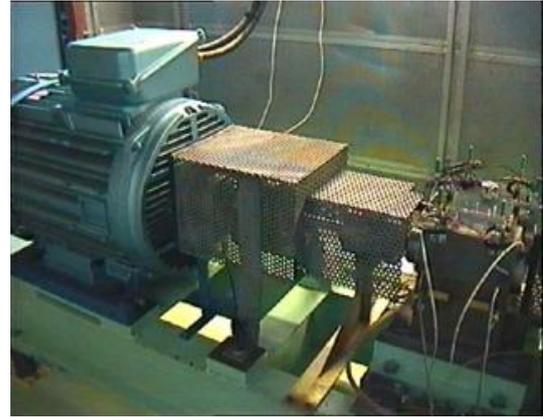


Figure 4.2: Banc coté charge



Figure 4.3: Armoire Moteur et Générale



Figure 4.4: Armoire de charge



Figure 4.5: Baie de mesures



Figure 4.6: Vue d'ensemble

4.2.2. Synoptique du banc d'essais

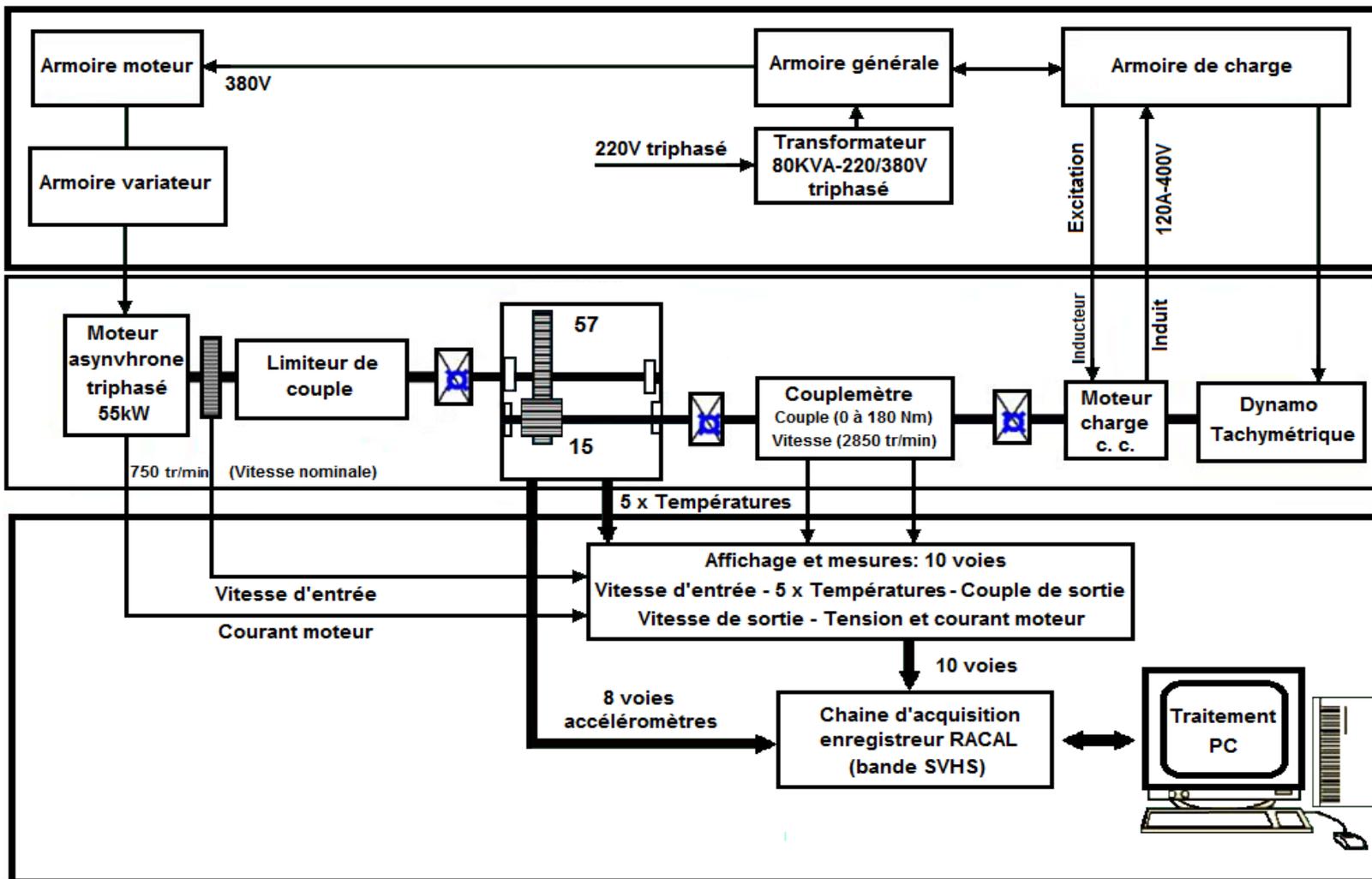


Figure 4.7: Synoptique du banc d'essais

4.2.2.1. Principe de fonctionnement et caractéristiques

Le moteur asynchrone entraîne le multiplicateur par l'intermédiaire d'un limiteur de couple à friction. Ce dernier a pour but d'éviter que le couple de démarrage dépasse une valeur limite fixée à $1.5.C_n$ (C_n = couple nominal du moteur asynchrone).

Le multiplicateur contient un engrenage (à denture droite) dont le rapport est de 3,8. Compte-tenu de la valeur de la puissance imposée (50kW) l'engrenage sera déterminé en appliquant les critères suivants :

- Coefficient de sécurité à la rupture des dents : environ de 1,5 à 2 pour le couple maximum du banc,
- Ecaillage sur la denture, survenant après un temps de fonctionnement inférieur à 400 heures,
- Nombres de dents premiers entre eux ($Z_1= 15$ dents et $Z_2 = 57$ dents),

Une prédétermination de l'engrenage avait conduit au choix d'un entraxe de 90 mm (correspondant à une puissance transmise de 50 kW) qui impose l'utilisation de paliers à roulements pour le guidage en rotation de l'arbre [144].

4.2.2.2. Spécifications particulières

Afin de réaliser l'instrumentation [144], liée aux méthodes de surveillance et d'inspection qui seront testées sur l'engrenage en fonctionnement, des emplacements pour la fixation des capteurs (accéléromètres) ont été prévus sur chacun des paliers supportant les deux arbres.

Les points de mesure, au nombre de trois par palier, ont été définis de telle sorte que les directions de mesure soient orthogonales entre elles (direction radiale horizontale, radiale verticale et axiale). Aussi, le nombre d'interface et l'épaisseur de métal entre l'emplacement du capteur et le palier par lequel transite l'information vibratoire ont été minimisés.

Le montage d'essai a été prévu pour permettre l'enregistrement des divers paramètres de fonctionnement tels que le couple de mise en charge, la vitesse de sortie, les températures au niveau des paliers et de l'huile de refroidissement dans le carter. Le couvercle supérieur du carter a été réalisé pour permettre son ouverture aisée et rapide afin de faciliter les observations journalières des dentures.

4.2.3. Description des éléments du Banc

4.2.3.1. Moteur d'entraînement

Le moteur d'entraînement utilisé dans la Figure 4.1 est montré par Figure 4.8

Marque : **LEROY SOMER**

Type : **P280S** t/amb : **40°C**

Tension : **380V/660V** P : **55 KW**

Polarité : **8** Classe : **B**

Fréquence : **50 [Hz]** Fixation : **B3**

Vitesse de rotation : **750 [tr/min]**

Graissage des roulements : **45 g /7600 h**



Figure 4.8: Moteur LEROY SOMER

Les opérations d'entretien du moteur sont décrites sur la notice LEROY SOMER n° B 101 – 209

4.2.3.2. Limiteur de couple

Le limiteur de couple de la Figure 4.9 est de type STROMAG « SPE 70 N », Il est monté boulonné sur le plateau d'accouplement du moteur. Il permet de limiter les efforts trop importants qui pourraient survenir lors des démarrages du banc [144].

Ce limiteur fonctionne par glissement de disques au-delà d'un certain couple. Le réglage de couple de patinage s'effectue par l'intermédiaire des vis comprimant les ressorts en appui sur les disques. Les documents joints ci-après exposent les procédures de réglage et de maintenance préconisées par le constructeur.

Un diagramme donne les valeurs des nombres de tours de vis de réglage à réaliser en fonction du couple désiré.

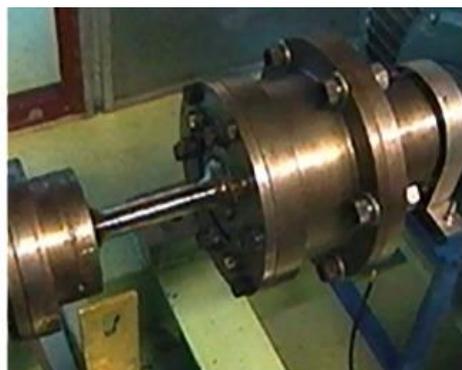
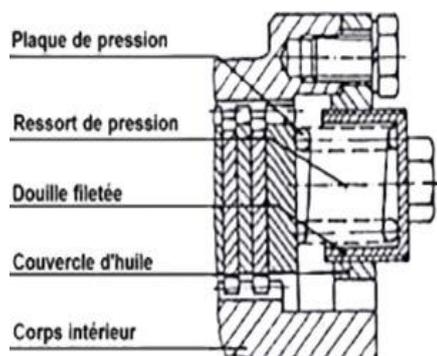


Figure 4.9: Limiteur de couple STROMAG

4.2.3.3. Multiplicateur

Le multiplicateur (boîte d'engrenages) de la Figure 4.10 se compose d'un carter en fonte de deux parties reposant sur une plaque de base. Deux (02) orifices permettent le passage des injecteurs servant à la lubrification et au refroidissement des engrenages. Des emplacements avec taraudages

ont été prévus pour le montage des accéléromètres. La partie supérieure du carter se démonte à l'aide de deux (02) tiges filetées pour permettre le changement de l'engrenage. Un capot en plexiglas à ouverture rapide permet le contrôle visuel de la denture. Les chapeaux des roulements ont été percés pour permettre leur lubrification. Un perçage au droit de chaque roulement a été fait pour permettre le montage d'une sonde platine pour contrôler la température des paliers en fonctionnement. Les faces intérieures des carters ont été revêtues d'une peinture époxy. La fixation du carter sur le châssis est assurée par quatre (04) boulons M20 [144].

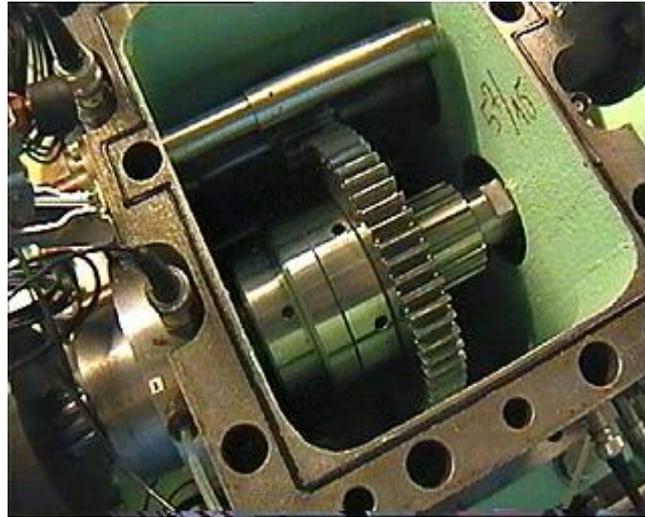


Figure 4.10: Multiplicateur (Boite d'engrenages)

4.2.3.3.1. Les arbres des petites et grandes vitesses

Les deux arbres des petites vitesses et des grandes vitesses avec l'engrenage et leurs roulements sont représentés par la Figure 4.11 et désignés respectivement par : PV et GV, les calculs en flexion-torsion des arbres, et le dimensionnement des roulements ont été effectués en utilisant le logiciel CETIM-CA.RO. L aussi les calculs des roues dentées et de l'engrènement ont été réalisés en utilisant me logiciel CETIM-CADOR.



Figure 4.11: Arbres d'entrée et de sortie avec engrenages et leurs roulements

A la suite des calculs, on a fait les choix suivants avec les durées de vie données ci-après :

- Arbre PV matière : 30CND8 avec un diamètre minimum de 24 mm
 - Roulement du palier n°1 type 20208 TN9, durée de vie 19797 heures /SKF 2206 CC.
 - Roulement du palier n°2 type NU 206 ECP, durée de vie 34589 heures/ SKF 2206 CC.
- Arbre GV matière 17CND6 avec un diamètre minimum de 23 mm
 - Roulement du palier n°3 type 22206, durée de vie 10124 heures/RSR 6208
 - Roulement du palier n°4 type 22206, durée de vie 40023 heures/NSK 6206
- Engrenage :

Le pignon à 15 dents avec un diamètre extérieur de 44.5 mm

La roue à 57 dents avec un diamètre extérieur de 145.5 mm

Les termes pignon et roue ont été inversés dans la partie calcul du fait que l'ensemble travaille en multiplicateur.

Le rapport de multiplication est donc de 3,8.

Les vitesses de rotation sont :

arbre PV 750 [tr/min]

arbre GV 2850 [tr/min]

Le couple d'entrée maximal donné par le moteur est de 700[Nm],

Le couple de sortie correspondant est de $700/3,8 = 184$ [Nm]

Si on désire obtenir une durée de vie de 400 heures, les calculs à la rupture donnent un couple admissible de 804 [Nm] à l'entrée et 213 [Nm] à la sortie et pour les calculs à la pression superficielle, 541 [Nm] à l'entrée et 122 [Nm] à la sortie.

Compte-tenu du couple maximal disponible à l'entrée de 700[Nm], il n'y aura donc pas de risque de rupture de denture avant 400 heures de fonctionnement et on peut obtenir un début d'écaillage après 400 heures de rotation en freinant avec un couple de 122[Nm].

Si on désire obtenir un écaillage avant 400 heures le couple de sortie devra être tel que :

$$122 \text{ [Nm]} < C < 184 \text{ [Nm]}$$

La courbe de la Figure 4.12 donne à titre indicatif la relation entre le couple et le nombre de cycles d'apparition de l'écaillage [144].

4.2.3.3.2. Engrenage d'essai réalisé pour exigences spéciales

Pour effectuer les différents essais (exigences spéciales d'EDF), un arbre PV, un arbre GV et une roue en acier traité, sont montés initialement dans le carter. L'utilisation des éléments jusqu'au couple maximal disponible par le moteur. Le calcul a été effectué pour une durée de vie de 5000 heures. Les caractéristiques géométriques des arbres et de l'engrenage restent les mêmes sauf la largeur de denture de la roue qui passe de 20mm à 80 mm. Les matériaux de l'engrenage sont différents :

- 42CD4 au lieu de 16MC5 pour la roue.
- 30CND8 au lieu de 17 CND6 pour le pignon arbré.

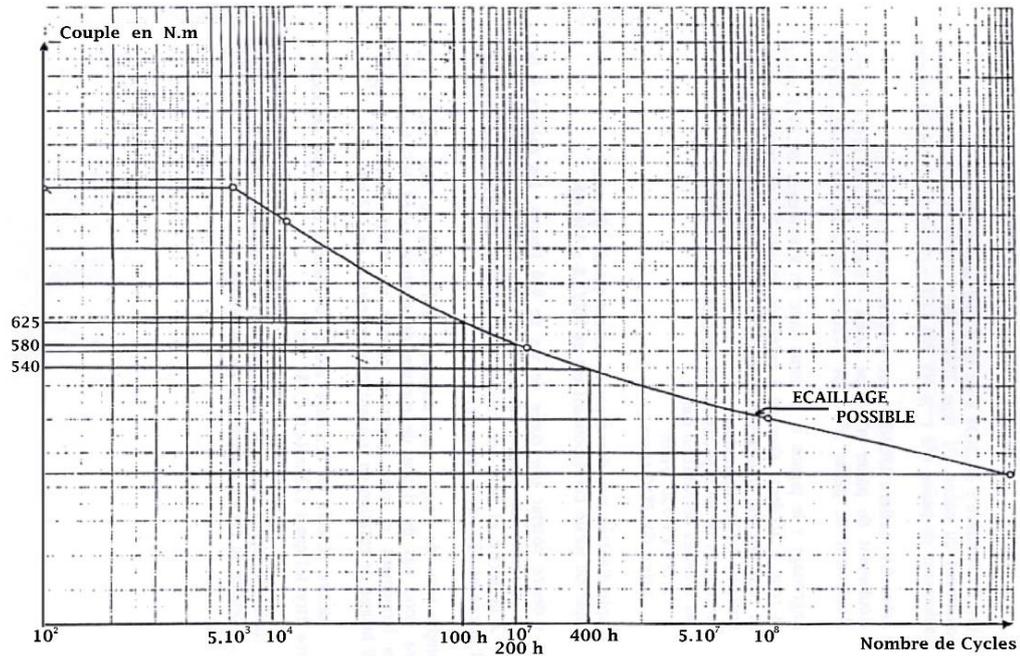


Figure 4.12: Relation entre le couple et le nombre de cycles d'apparition de l'écaillage

4.2.3.3.3. Engrenage d'essai standard

Cet engrenage a été prévu en acier cémenté, trempé, rectifié.

- Trois roues PV en 16MC5
- Un (01) arbre PV en 30CND8
- Un (01) arbre GV en 17CND6

Les éléments sont fabriqués par la société COMELOR-LUKFIN France dont la qualité est respectée et selon les normes avec :

- Certificat matières sur coulées et de traitement thermique
- Certificat de contrôle de denture avec diagrammes pour chaque série de roues PV correspondant à un arbre GV,

4.2.3.3.4. Le châssis

Il se compose de 3 parties :

- La première est un bâti de base mécano-soudé dont les parties inférieures et supérieures ont été usinées.
- La deuxième comporte deux cales destinées à parfaire l'alignement d'un multiplicateur.
- La troisième est une rehausse mécano-soudée destinée à mettre à hauteur l'axe de la dynamo frein.

4.2.3.4. Pièces de liaison

Elles sont constituées de deux accouplements :

Le premier entre le moteur d'entraînement et le multiplicateur est du type accouplement à denture. D'un côté, il est intégré dans le limiteur du couple, il remplace l'accouplement du type TSKS 110 prévu initialement. Seuls les plateaux de cet accouplement sont conservés et la pièce d'espacement a été remplacée par un arbre torsible,

Le second accouplement qui se situe entre le multiplicateur et la dynamo frein est du type TSKS 0060. Il assure les liaisons de chaque côté du couplemètre TG 20. C'est un accouplement métallique flexible en deux (02) parties basé sur l'utilisation de lamelles métalliques flexibles, minces, dont le nombre et les dimensions sont fonction des couples à transmettre.

Les plateaux recevant les accouplements sont montés sur leurs arbres par clavetage normalisé côtés moteur et frein et par cannelures normalisées (calculs par logiciel CETIM-ECAM LYON) du côté du multiplicateur.

4.2.3.4.1. Accouplements

Le couplemètre a été intercalé entre l'arbre de sortie du multiplicateur et de la dynamo frein. La liaison a été réalisée en utilisant deux demi accouplements METASTREAM de la Figure 4.13, dont le schéma descriptif est montré par la Figure 4.14.

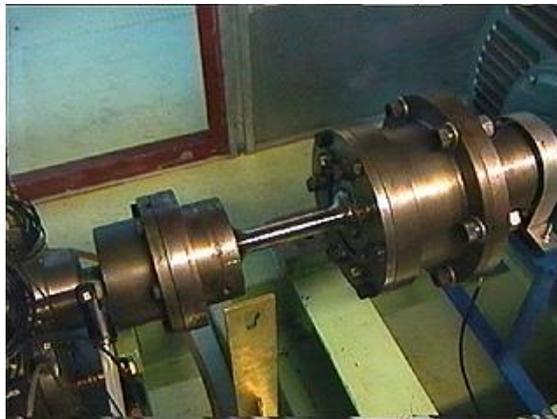


Figure 4.13: Accouplement Metastream

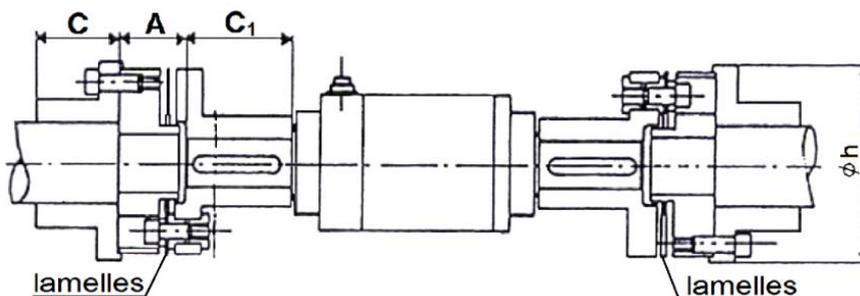


Figure 4.14: Schéma descriptif du couplemètre Metastream

Pour chaque essai, il faut vérifier l'état des lamelles des deux (02) demi-accouplements et le serrage de tous les boulons de fixation, aussi la présence de traces de la corrosion du contact « fretting corrosion » sur les accouplements sera considérée comme une anomalie et ils devront être démontés et retournés chez le fabricant pour réparation.

4.2.3.4.2. Couplèmetre

Le couplèmetre TG 20 « VIBRO-METER » de la Figure 4.15 monté entre les accouplements Figure 4.16 assure la mesure du couple de transmission pour les grandes et petites vitesses dont le principe de fonctionnement est basé sur une roue polaire Figure 4.17.

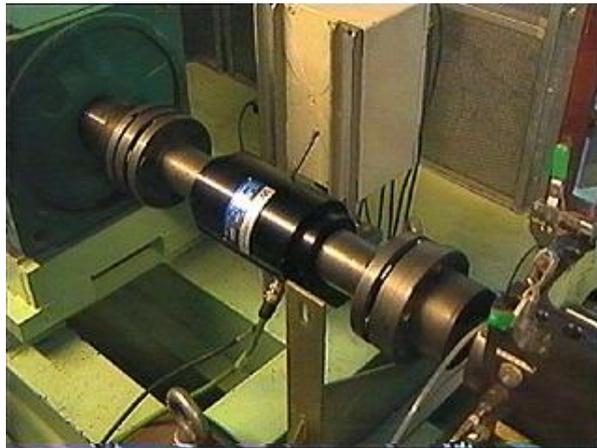


Figure 4.15: Couplèmetre TG20

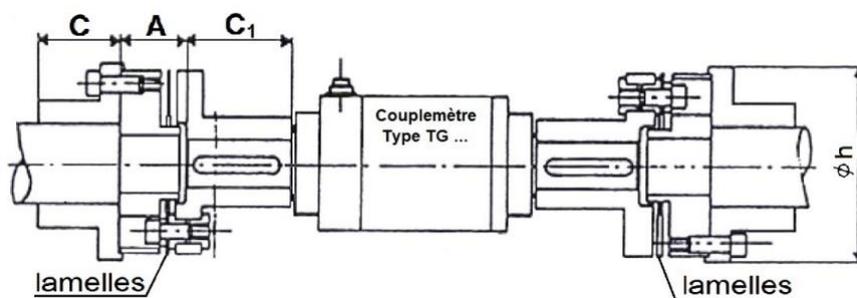


Figure 4.16: Emplacement du Couplèmetre TG20

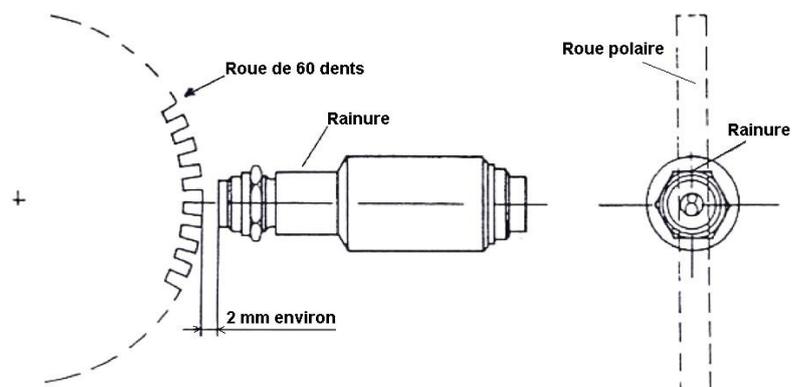


Figure 4.17: Principe du Couplèmetre TG "Roue-Capteur"

4.2.3.5. Moteur de charge-Tachymètre et armoire de commande

Les caractéristiques du moteur de charge-tachymètre de la Figure 4.18 et l'armoire de commande de la Figure 4.19 sont :

Marque ; LEROY SOMER

Moteur type LSK 160 M07 400/190V 1640 TR

Puissance 54,3 KW à 1640 tr/mn

Ventilation forcée type SS avec filtre. Protection IP23

Variateur à thyristors type 3.150 380 V, 1.5 50 HZ en armoire 2T8802 010 0001 655184 avec disjoncteur ultra rapide.

Les roulements du moteur sont graissés à vie (20 000 heures).



Figure 4.18: Moteur Charge-Tachymètre



Figure 4.19: Armoire de commande du Moteur

4.2.3.6. Variateur de vitesse « ALTIVAR 66 »

Pour assurer la variation et la régulation de la vitesse pour les différents essais, un variateur de type ALTIVAR 66 Figure 4.20 est utilisé.

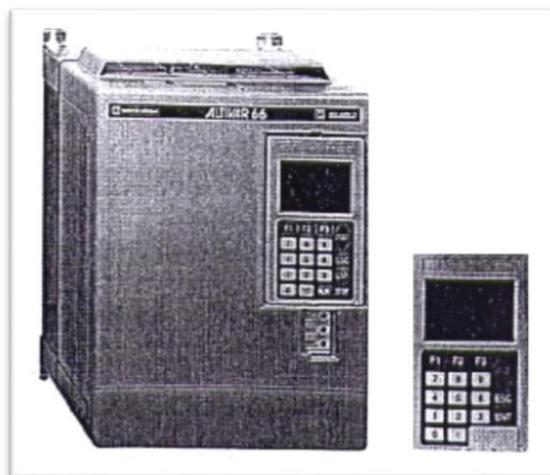


Figure 4.20: ALTIVAR 66

4.2.3.7. Groupe de lubrification

La fonction de ce groupe hydraulique de la Figure 4.21 est de permettre le graissage et le refroidissement des engrenages ainsi que celui des roulements.

Il se compose :

- D'une cuve d'environ 50 l revêtue d'une peinture époxy ;
- D'une pompe à engrenages débit 8,2 l/mn pression maximale 25 bar ;
- D'une valve de débit permettant le réglage du débit d'huile ;
- D'une valve de pression assurant la sécurité des éléments du groupe ;
- D'un échangeur huile-eau avec vanne thermostatique réglable de 50 à 100°C ;
- D'un distributeur alimentant les injecteurs et les roulements ;
- D'un régulateur magnétique à flotteur sphérique déclenchant l'arrêt du banc en cas de baisse trop importante du niveau d'huile de la cuve ;
- D'une sonde de température d'un manomètre de pression.

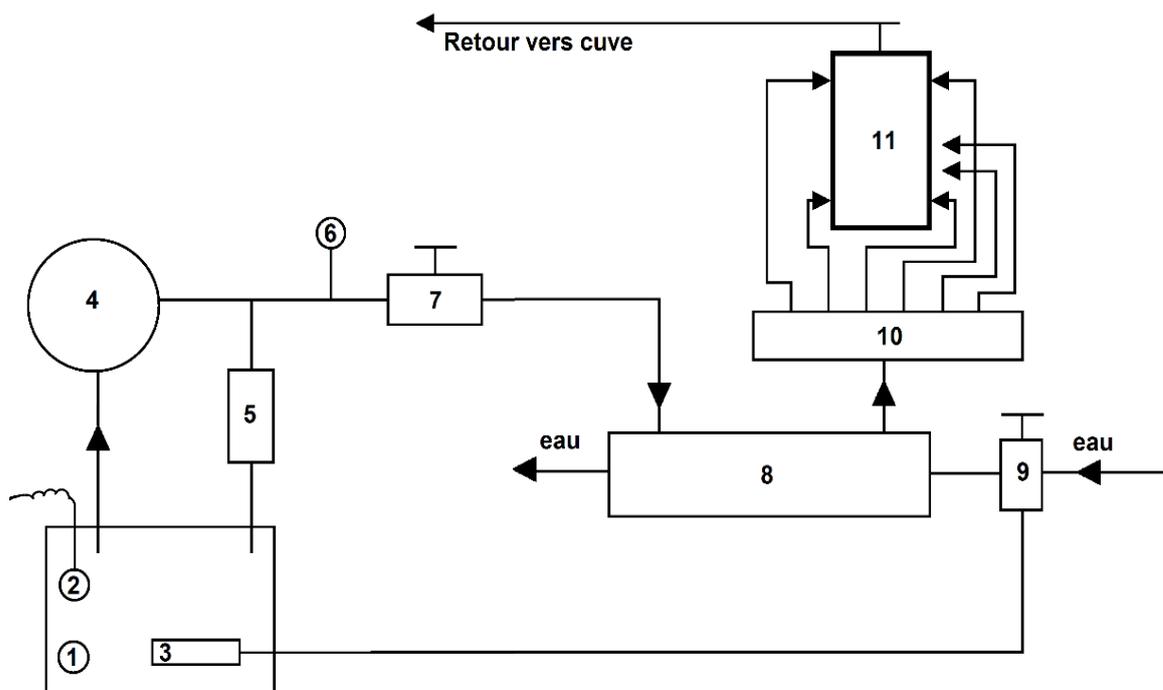


Figure 4.21: Groupe de lubrification

1	Cuve	4	Pompe	7	Valve débit	10	Distributeur
2	Niveau	5	Valve pression	8	Echangeur	11	Multiplicateur
3	Boite	6	Manomètre	9	Vanne Thermostatique		

Ce groupe à huile est indépendant de l'ensemble châssis. Les liaisons avec le multiplicateur sont assurées par des tuyauteries souples.

4.2.4. Mesures et Acquisitions

4.2.4.1. Accéléromètres et préamplis Brüel et Kjaer

4.2.4.1.1. Accéléromètres B&K :

La disposition des accéléromètres Brüel & Kjaer (B&K) de série 1368633 est donnée par la Figure 4.22, la réponse en fréquence de ces accéléromètres est représentée par la Figure 4.23 [145].

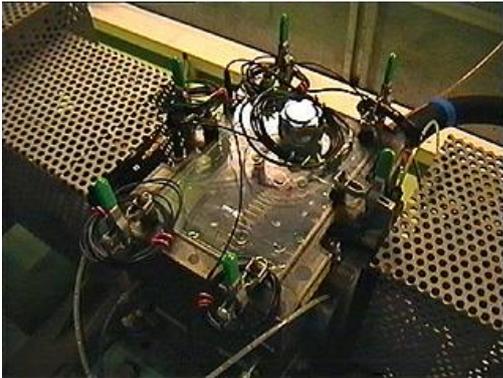


Figure 4.22: Accéléromètres B&K

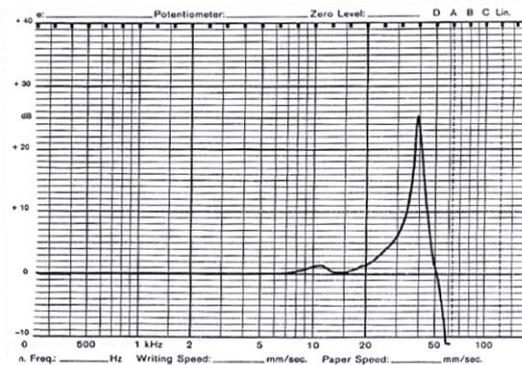


Figure 4.23: Courbe de réponse des accéléromètres

Caractéristiques des accéléromètres :

- Fréquence de résonance: 12KHz
- Accéléromètre Type 4361
- Élément sensible Piézo-électrique PZ23

La Baie de mesures est représentée par la Figure 4.5.

4.2.4.1.2. Amplificateur de charge B&K

Caractéristiques de l'amplificateur de charge type 2651:

- Grande gamme de fréquence de 0,003 Hz à 200 kHz.
- Choix de sensibilités de sortie de 0,1 : 1 et 10 mV/pC.
- Intégrateur incorporé convertissant le signal d'accélération en vitesse.
- Modes d'entrée normale ou flottante.
- Limites de fréquence inférieure commutables.

Applications:

- Applications générales en mesures de vibrations et de chocs avec des accéléromètres Uni-Gain.
- Systèmes de mesure multivoies et boucles d'asservissement des essais de vibrations.
- Préamplificateur pour Têtes d'impédance et Transducteurs de force piézoélectriques.

4.2.4.2. Mesure du couple et des vitesses

Les matériels employés sont de marque « VIBROMETER » (Suisse).

Le rack de mesures relatives à ces deux types de grandeurs comporte les tiroirs suivants:

- ACP 006 : "Contrôle Panel": Alimentation de l'ensemble des tiroirs.
- ICT 610 : Conditionneur de couple.
- PDG 762 : Affichage numérique de la valeur du couple (enNm).
- PDC 753 : Conditionneur et Afficheur numérique de la vitesse.
 - Un pour la Vitesse d'entrée.
 - Un pour la Vitesse de sortie de la boîte d'engrenages.

En plus de l'affichage, ces données sont envoyées sur la chaîne d'acquisition Storeplex pour que l'on ait un contrôle en continu de ces grandeurs.

Voici leurs constantes :

- 1 mV/min pour les vitesses.
- 25 mV/Nm pour le couple.

4.2.4.3. Chaîne d'Acquisition Racal Storeplex Delta

Toutes les valeurs mesurées par les huit (08) accéléromètres ainsi que les :

- Cinq (05) températures.
- Deux (02) vitesses d'entrée et de sortie de la boîte.
- Couple de sortie de boîte.
- Intensité consommée par phase du moteur asynchrone d'entraînement.
- La tension d'alimentation du moteur d'entraînement (380 V AC)

sont enregistrées dans la chaîne d'acquisition Storeplex Delta de la Figure 4.24.

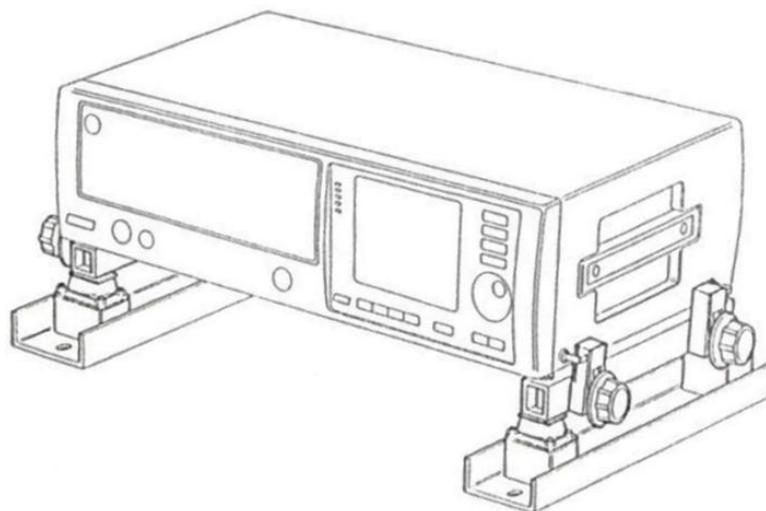


Figure 4.24: Racal Storeplex Delta

4.2.4.4. Caractéristique du banc GOTIX

Les caractéristiques du banc GOTIX sont données par le Tableau 4.1

Moteur asynchrone	Nombre de paires de pôles	p = 4						
	Fréquence du stator	f	50 Hz	60 Hz	25 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz
	Vitesse asynchrone	$N_s = f/p$ tr/s	12.5 750 rpm	15 900 rpm	6.25 375 rpm	2.5 150 rpm	1.25 75 rpm	0.5 30 rpm
	Erreur/Glisement	g	1.47 %	3 %	0.27 %	0.67 %		0.67 %
	Vitesse du rotor	$N = N_s(1 - g)$	739 tr/mn	874 tr/mn	374 tr/mn	149 tr/mn		28 tr/mn
	Couple maximal	Dépend du débit, qui est proportionnel à $1 / f$						
Altivar 66	Fréquence de commutation	f'		4 kHz ou 10 kHz				
	Indice de modulation	$m = f' / f$						
Train d'engrenage	Roue 57 dents	Roue motrice Vitesse = N_s Sans charge	12.5 rps 750 rpm 80 ms/r	15 rps 900 rpm 67 ms/r	6.25 rps 375 rpm 160 ms/r	2.5 rps 150 rpm 400 ms/r	1.25 rps 75 rpm 800 ms/r	0.5 rps 30 rpm 2 s/r
		Charge = 43 Nm	12.46 rps 748 rpm	15 rps 900 rpm	6.25 rps 375 rpm	2.5 rps 150 rpm	1.25 rps 75 rpm	0.5 rps 30 rpm
		Charge = 86 Nm	12.43 rps 746 rpm	15 rps 900 rpm	6.25 rps 375 rpm	2.5 rps 150 rpm	1.25 rps 75 rpm	0.5 rps 30 rpm
		Charge = 172 Nm	12.32 rps 39 rpm	14.56 rps 874 rpm	6.23 rps 374 rpm	2.5 rps 149 rpm	1.25 rps 75 rpm	0.46 rps 28 rpm
	Pignon 15 dents	Vitesse= $N_s * (57/15)$ $= 3.8 * N_s$ Charge = 172 Nm	47.5 rps 2850 rpm 21 ms/r	57 rps 3420 rpm 17.5 ms/r	23.75 rps 1425 rpm 42 ms/r	9.5 rps 570 rpm 105 ms/r	4.75 rps 285 rpm 210 ms/r	1.9 rps 115 rpm 526 ms/r
			47.4 rps 2845 rpm	57 rps 3418 rpm	23.68 rps 1421 rpm	9.46 rps 568 rpm	4.72 rps 283 rpm	1.9 rps 114 rpm
Fréquence de maillage	$F_{mes} = 57 * N_s$ $= 15 * (3.8 * N_s)$	712.5 Hz 702 Hz (Chargé)	855 Hz 830 Hz (*)	356.25 Hz 355.3 Hz (*)	142.5 Hz 141.55 Hz (*)	71.25 Hz	28.5 Hz 26.6 Hz (*)	
Période	$T_{eng} = 1/F_{eng}$	1.4 ms	1.17 ms	2.8 ms	7 ms	14 ms	35 ms	
Acquisition	Nombre de points pour le temps d'acquisition =	T_{mes}	35	30	70	175	350	875
		T_{pignon}	525	437	1 052	2 630	5 263	13 157
		T_{roue}	2 000	1 670	4 000	10 000	20 000	50 000

Tableau 4.1: Caractéristiques du banc GOTIX

4.2.4.5. Analyseur Racal

Les fichiers de données sont écrits avec des nombres entiers de 16 bits, et la configuration par défaut de l'analyseur Racal est donnée par le Tableau 4.2.

Référence	Canal	Entrée [V]	Bande passante [kHz]
CH1	-1- Accéléromètre 1 : 24RV	5	11.4
CH2	-2- Accéléromètre 2 : 24RH	5	11.4
CH3	-3- Accéléromètre 3 : 22RV	5	11.4
CH4	-4- Accéléromètre 4 : 22RH	5	11.4
CH5	-5- Accéléromètre 5 : 21RV	5	11.4
CH6	-6- Accéléromètre 6 : 21RH	5	11.4
CH7	-7- Couple	5	11.4
CH8	-8- Vitesse d'entrée	5	11.4
CH9	-9- Vitesse de Sortie	5	11.4
CH10	-10- Courant en phase U1	0.5	11.4
CH11	-11- Courant en phase V1	0.5	11.4
CH12	-12- Courant en phase W1	0.5	11.4
CH13	-13- Tension en phase U1	5	11.4
CH14	-14- Tension en phase V1	5	11.4
CH15	-15- Tension en phase W1	5	11.4
CH16	-16- Encodeur 1 (arbre d'entrée)	10	45.5
CH17	-17- Top tour encodeur 1	10	45.5
CH18	-18- Encodeur 2 (arbre de sortie)	10	45.5
CH19	-19- Top tour encodeur 2	10	45.5
CH20	-20- Température dans le logement 2	0.5	11.4

Tableau 4.2: Configuration par défaut de l'analyseur Racal

Important : Channel 10 est enregistrée identiquement deux fois « 10b = copie de 10 pour vérification de synchronisation » (fichiers *. E10 et *. E10b) dans chaque dossier dans chaque dossier lié à une charge. Ceci est imposé par le démultiplexage qui a suivi l'acquisition. Le programme de transfert / démultiplexage ne peut pas traiter plus de 14 canaux. Ainsi, il était obligatoire de procéder en deux étapes. Canal 10, La voie 10, doublé, permet de ré-échantillonner jusqu'à un échantillon si nécessaire.

4.2.4.6. Description de l'acquisition

Six accéléromètres B&K 4391 sont placés sur la boîte de vitesses par paires correspondant à deux axes orthogonaux, un RV référencé verticalement, l'autre RH à référence horizontale, ces paires d'accéléromètres sont montrées par la Figure 4.25, et placées sur les différents arbres de la boîte de

vitesse et les caractéristiques géométriques des éléments de transmission sont données par la Figure 4.26 et les dimensions du banc sont représentées par la Figure 4.27. Ils sont enregistrés sur les chaînes 1 à 6 « STOREPLEX » sur les voies respectives 1 à 6 par le préamplificateur B&K 2651.

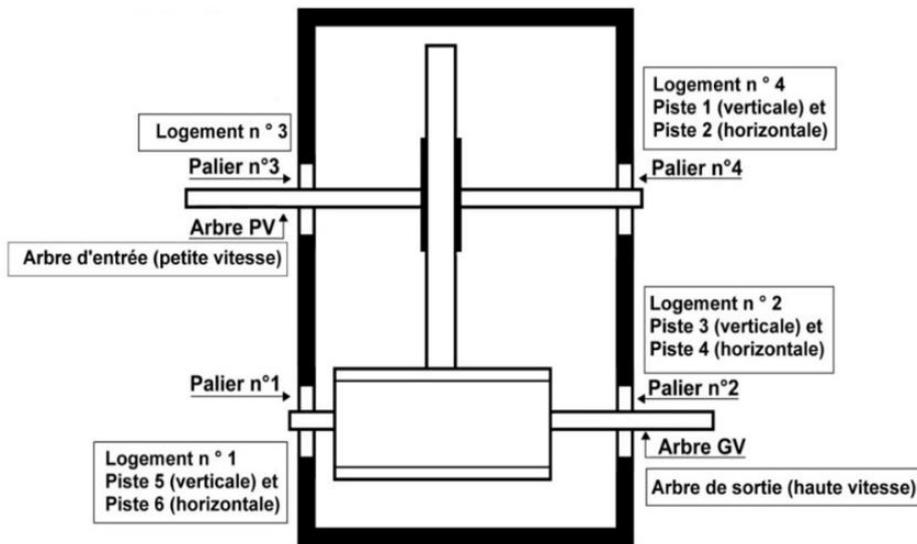


Figure 4.25: Disposition des accéléromètres RV-RH

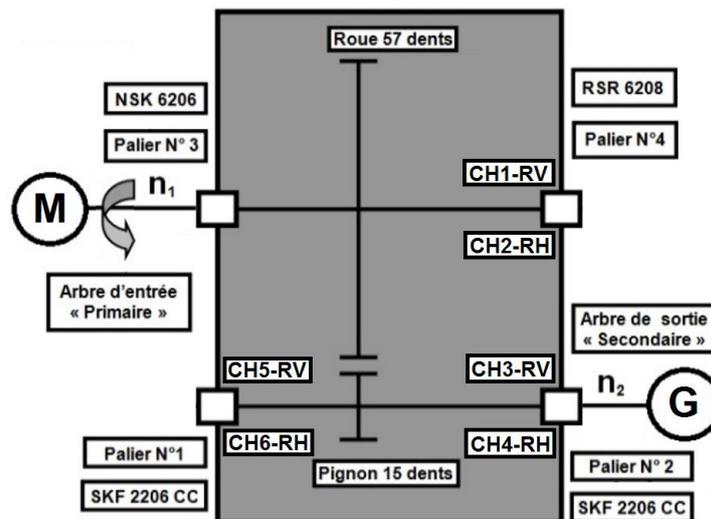


Figure 4.26: Caractéristiques des roulements et engrenages du banc Gotix

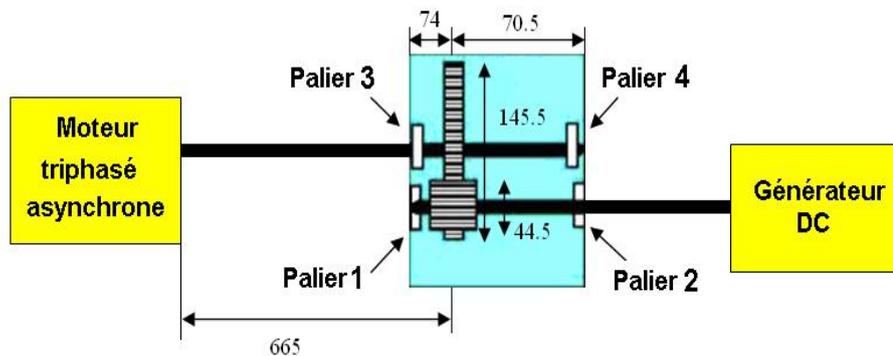


Figure 4.27: Dimensions du banc Gotix

a- Conditions de fonctionnement :

	Compteur	Date
Début de l'expérience	3790	20 octobre 2004
Fin de l'expérience	3800	21 octobre 2004

b- Alimentation

- Type: secteur ou onduleur
- Réglage de la fréquence: fixe ou variable

c- Train d'engrenage

- Acier trempé ou acier doux
- Géométrie des dents: parallèle, hélicoïdale
- Taux de réduction: $57/15 = 3.8$

d- Charge

- Réglage du couple de chargement: fixe ou variable

e- Acquisition : Chaîne RACAL

Les différentes mesures et leurs correspondances sont données par le Tableau 4.3.

Capteur	Nombre	Position	Canal	Fréquence d'échantillonnage	Durée
Accéléromètre	6	Schéma	Canaux 1 to 6	25 KHz	80 s
Couplemètre	1	Arbre secondaire	Canal 7	25 KHz	80 s
Tachymètre	2	Arbre primaire Arbre secondaire	Canal 8 Canal 9	25 KHz	80 s
Pince	3	Phase U Phase V phase W	Canal 10 Canal 11 Canal 12	25 KHz	80 s
Voltmètre	3	Phase U Phase V phase W	Canal 13 Canal 14 Canal 15	25 KHz	80 s
Encodeur	2	Arbre primaire Arbre secondaire	Canal 16 Canal 18	100 kHz	80 s
Top Tour	2	Arbre primaire Arbre secondaire	Canal 17 Canal 19	100 kHz	80 s
Thermomètre	1	2ème logement	Canal 20	25 KHz	80 s

Tableau 4.3: Différentes mesures et leurs correspondances

4.2.4.7. Configuration de la chaîne Racal

Correspondance entre les indications du compteur horaire et les durées d'essais en charge :

- Début des essais : $h=0$ pour 2785 heures au compteur.
- Fonctionnement avec couple de charge de 172Nm. ($I/\text{phase}=130\text{A}$ en tête armoire moteur).
- Changement charge : $h=350$ pour 3135 heures au compteur.
- Fonctionnement avec couple de charge de 145 Nm. ($I/\text{phase}=115\text{A}$ en tête armoire moteur).
- Rupture arbre primaire : $h= 700$ pour 3485 heures au compteur.
- Reprise des essais en charge : à 3489 heures au compteur : 1^{er} enregistrement/charge au couple de 145 Nm.

Acquisitions sur Banc d'essais pour engrenages :

- Compteur Horaire du Banc : 2763,9 heures/ 57,5 h. au départ du cycle d'essais.
- Train d'engrenages cémenté-trempé neuf :
 - Roue 57 dents N° 257838-1
 - Pignon 15 dents N° 257840-1
- Sens de fonctionnement : marche AVANT.
- Vitesse nominale du Moteur : Secteur à $f = 50\text{Hz}$.
- Acquisition sur les 20 voies, avec charge de 150 Nm environ, correspondant à un courant d'alimentation de 120 A par phase du moteur d'entraînement.
- Fréquence d'échantillonnage de 25kHz, sauf sur les 4 voies de signaux des codeurs optiques, échantillonnés à 100 kHz (CH 16 à19).
- Répartition des 20 voies démultiplexées selon le Tableau 4.2.
- Positionnement des 6 Accéléromètres sur le boîtier d'engrenages d'après le Tableau 4.3.
- Durée des Acquisitions : # 80 secondes soit 2×10^6 points de mesure par voie, (8×10^6 mesures par voie pour les codeurs optiques).
- Les Fichiers de Données sont écrits en Entiers sur 16 Bits et enregistrées sur des cassettes VHS.

4.2.4.8. Fiches d'acquisitions

Fiche Acquisition

Essai CREA-2004

Les 29-30/11/2004

CD CREA2004-1

	F1	F2	F3	F4
Nom du dossier résultats	Crea-1	Crea-2	Crea-3	Crea-4
Date d'acquisition	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04
Stocké sur CD	Crea2004-1	Crea2004-1	Crea2004-1	Crea2004-1
Type essai	secteur	secteur	secteur	secteur
Fréquence de travail	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50Hz
Charge	A vide	En charge	En charge	En charge
Charge Arbre secondaire	non	48 Nm	93 Nm	140 Nm
Intensité tableau <small>(x√(3) pour avoir lenroulement Mot)</small>	# 32 A	# 33.5 A	# 40.5 A	# 50.3 A
Ecart de temps	17 ^h 05' 15'' à 17 ^h 7' 00''	17 ^h 08' 5'' à 17 ^h 10' 00''	17 ^h 11' 10'' à 17 ^h 12'50''	17 ^h 13' 50'' à 17 ^h 15'35
Ecart en trames/storplex acquises	2450 trames	2330 trames	# 2400 trames	# 2400 trames
Ecart en trames D/T= démultiplexage/transfert	2000 trames (100-2099)	2000	2000	2000
Repérage ACQ	File5/record 397	File5/record 398	File5/record 399	File5/record 400
Remarques	Essai avec sondes 1/1000 ^e pour les 3 courant	Essai avec sondes 1/1000 ^e	Essai avec sondes 1/1000 ^e	Essai avec sondes 1/1000 ^e

Tableau 4.4: Fiche d'acquisition crea2004-1

Fiche Acquisition

Essai CREA-2004

Les 29-30/11/2004

CD CREA2004-2

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Nom du dossier résultats	Crea-5	Crea-6	Crea-7	Crea-8	Crea-9	Crea-10	Crea-11	Crea-12
Date d'acquisition	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04
Stocké sur CD	Crea2004-2	Crea2004-2	Crea2004-2	Crea2004-2	Crea2004-2	Crea2004-2	Crea2004-2	Crea2004-2
Type essai	variateur	variateur	variateur	variateur	variateur	variateur	variateur	variateur
Fréquence de travail	0.5 Hz	0.5 Hz	1 Hz	1.5 Hz	2 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz
Charge	En charge	En charge	En charge	En charge	En charge	En charge	En charge	En charge
Charge Arbre secondaire	90 N.m	100 Nm	# 150 Nm	# 200 Nm	# 225 Nm	# 232 N.m	# 234 N.m	# 250 N.m
Intensité tableau (x√(3) pour avoir lenroulement Mot)	# 16 A	?	?	# 40 A	# 42 A	# 42 A	?	# 48 A
Ecart de temps	17 ^h 36' 16'' à 17 ^h 37' 26''	17 ^h 38'35'' à 17 ^h 39' 18''	17 ^h 44' 36'' à 17 ^h 45'06''	17 ^h 47' 12'' à 17 ^h 48'15''	17 ^h 50' 20'' à 17 ^h 51'30''	17 ^h 55' 14'' à 17 ^h 55'52''	17 ^h 57' 32'' à 17 ^h 58'38''	18 ^h 01' 00'' à 17 ^h 02'00''
Ecart en trames/storplex acquises	1697 trames	970 trames	718 trames	1437 trames	1725 trames	755 trames	1506 trames	1474 trames
Ecart en trames D/T= démultiplexage/transfert	1450 trames (100-1549)	750 (100-849)	500 (100-599)	1200(100-1299)	1600(100-1699)	600(100-699)	1300 (100-1399)	1300 (100-1399)
Repérage ACQ	File5/record 401	File5/record 402	File5/record 403	File5/record 404	File5/record 405	File5/record 406	File5/record 407	File5/record 408
Remarques	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage avec variateur et rotor bloqué	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage avec variateur et rotor bloqué	Essai avec sondes 1/1000 ^e	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ 1 ^{er} Démarrage avec variateur et rotor bloqué 3/ 2 ^{ème} Démarrages successifs (à 160 trames et 862 trames)	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ 1 ^{er} Démarrage avec rotor non complètement bloqué 3/ 2 ^{ème} Démarrage avec rotor bloqué (1100 trames)	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage avec variateur, rotor non bloqué	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage avec variateur, rotor non bloqué	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage avec variateur, rotor non bloqué

Tableau 4.5: Fiche d'acquisition crea2004-2

Fiche Acquisition

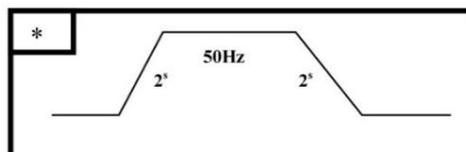
Essai CREA-2004

Les 29-30/11/2004

CD CREA2004-3

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Nom du dossier résultats	Crea-13	Crea-14	Crea-15	Crea-16	Crea-17	Crea-18	Crea-19
Date d'acquisition	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04
Stocké sur CD	Crea2004-3	Crea2004-3	Crea2004-3	Crea2004-3	Crea2004-3	Crea2004-3	Crea2004-3
Type essai	variateur	variateur	variateur	variateur	variateur	variateur	variateur
Fréquence de travail	30 Hz	40 Hz	50 Hz	30 Hz	20 Hz	10 Hz	5 Hz
Charge	En charge	En charge	En charge	En charge	En charge	En charge	En charge
Charge Arbre secondaire	# 240 N.m	# 190 Nm	# 120 Nm	# 187 Nm	# 145 Nm	# 140 N.m	# 136 N.m
Intensité tableau (x√(3) pour avoir l'enroulement Mot)	# 47 A	# 38 A	# 27 A	# 37.5 A	# 31 A	# 29.4 A	# 28 A
Ecart de temps	18 ^h 03' 30'' à 18 ^h 04' 30''	18 ^h 07' 10'' à 18 ^h 09' 23''	18 ^h 11' 15'' à 18 ^h 12' 15''	18 ^h 13' 06'' à 18 ^h 13' 44''	18 ^h 15' 12'' à 18 ^h 15' 47''	18 ^h 16' 37'' à 18 ^h 17' 13''	18 ^h 17' 56'' à 18 ^h 18' 30''
Ecart en trames/storplex acquises	1403 trames	3270 trames	1400 trames	1005 trames	878 trames	971 trames	719 trames
Ecart en trames D/T= démultiplexage/transfert	1200 trames (100-1299)	3000 (100-3099)	1200 (100-1299)	800(100-899)	650(100-749)	750(100-849)	500 (100-599)
Repérage ACQ	File5/record 409	File5/record 410	File5/record 411	File5/record 412	File5/record 413	File5/record 414	File5/record 415
Remarques	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage variateur et rotor non bloqué 3/ 2 ^{ème} Démarrage (# 780 trames)	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage avec variateur et rotor bloqué 3/ 2 ^{ème} Démarrage à ≈ 2000 trames (C #150N.m)	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage variateur et rotor non bloqué	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage variateur et rotor non bloqué	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage variateur et rotor non bloqué	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage avec variateur , rotor non bloqué	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage avec variateur , rotor non bloqué

Tableau 4.6: Fiche d'acquisition crea2004-3



Fiche Acquisition

Essai CREA-2004

Les29-30/11/2004

CD CREA2004-4

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Nom du dossier résultats	Crea-20	Crea-21	Crea-22	Crea-23	Crea-24	Crea-25	Crea-26	Crea-27	Crea-28	Crea-29
Date d'acquisition	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04	20/10/04	21/10/04	21/10/04	21/10/04
Stocké sur CD	Crea2004-4	Crea2004-4	Crea2004-4							
Type essai	variateur	Variateur	variateur							
Fréquence de travail	5 Hz	10 Hz	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	50 Hz	50Hz
Charge	A Vide	En charge	En charge							
Charge Arbre secondaire	/	/	/	/	/	/	/	/	143 N.m	# 100 N.m
Intensité tableau (x√(3) pour avoir l'enroulement Mot)	/	/	/	# 19.3 A	/	/	/	/	/	/
Ecart de temps	18 ^h 22' 00'' à 18 ^h 22' 42''	18 ^h 23' 58'' à 18 ^h 24' 30''	18 ^h 25' 02'' à 18 ^h 25' 31''	18 ^h 26' 00'' à 18 ^h 26' 40''	18 ^h 27' 27'' à 18 ^h 28' 03''	18 ^h 28' 40'' à 18 ^h 29' 15''	18 ^h 33' 12'' à 18 ^h 34' 05''	10 ^h 34' 30'' à 10 ^h 34' 48''	10 ^h 36' 30'' à 10 ^h 36' 50''	10 ^h 38' 10'' à 10 ^h 38' 30''
Ecart en trames/storplex acquises	900 trames	645 trames	612 trames	899 trames	860 trames	791 trames	825 trames	355 trames	394 trames	431 trames
Ecart en trames D/T- démultiplexage/transfert	700 trames (100-799)	450 (100-549)	400 (100-499)	700(100-799)	650(100-749)	600(100-6999)	600 (100-699)	150 (100-249)	200 (100-299)	230 (100-329)
Repérage ACQ	File5/record 416	File5/record 417	File5/record 418	File5/record 419	File5/record 420	File5/record 421	File5/record 422	File5/record 423	File5/record 424	File5/record 425
Remarques	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage variateur avec 2 ^s accélération et 2 ^s de décélération voir (*)	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Démarrage variateur avec accélération de 0Hz à 50Hz sur 2 ^s et décélération, 50Hz à 0Hz de 2 ^s	1/Essai avec 3 sondes de courant à 1/1000 ^e 2/ Montée en régime sur 2 ^s et décélération sur 2 ^s						

Tableau 4.7: Fiche d'acquisition crea2004-3

4.3. Banc d'essai LaMCoS

4.3.1. Présentation du banc expérimental

Le laboratoire LaMCoS a travaillé pendant plusieurs années sur le comportement dynamique des transmissions de puissance à engrenages. En 1987, EUROCOPTER fournit un banc d'essais pour l'étude de l'influence des caractéristiques de denture sur le bruit et les vibrations, Les caractéristiques analysées sont [94]:

- La géométrie des dentures,
- Les corrections de dentures,
- Et les conditions de montage (désalignement, variation d'entraxe...).

Les travaux ne portant uniquement que sur le comportement dynamique des engrenages, il a été conçu avec les critères suivants :

- Banc d'essais constitué d'un train simple,
- Facilité de montage et démontage des deux roues d'engrenages,
- Architecture permettant une isolation de l'engrenage du reste du système (roulements, carter),
- Conditions de fonctionnement représentatives d'une transmission de puissance utilisée dans les hélicoptères.

4.3.2. Caractéristiques du Banc d'essai LaMCoS

Le Banc est constitué d'un châssis en béton armé, isolé du sol par des plots amortissants. Les deux lignes d'arbres ayant chacune un diamètre de 60 mm et une longueur de 680 mm sont montées en boucle ouverte et fixées sur ce châssis par l'intermédiaire de quatre paliers à roulement de rigidité moyenne de $3 \cdot 10^7$ daN/m représenté par la Figure 4.28. Les paliers situés à proximité du couple d'engrenages d'essais comportent des roulements à billes de type 6012 alors que les paliers extérieurs sont munis de roulements à rouleaux de type Nu 1013. Les lignes d'arbre sont liées en rotation par les engrenages d'essais.

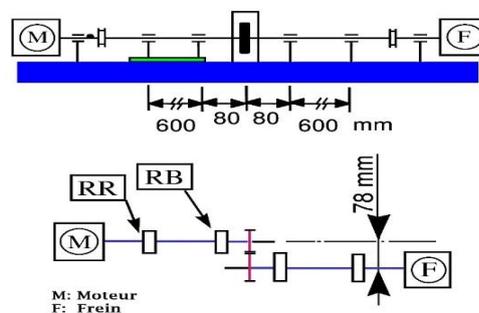


Figure 4.28: Architecture du banc d'essai

RB : Roulement à billes RR : Roulement à rouleaux

Un support intermédiaire, constitué d'une plaque montée sous les paliers et entre le socle, permet d'effectuer des désalignements d'arbres dans deux plans perpendiculaires (possibilité d'introduction des défauts de déviation et inclinaison).

La vitesse et le couple appliqués sont mesurés par l'intermédiaire d'un dispositif électronique comportant un moteur et une génératrice-frein, ainsi qu'une armoire de commande. Les vitesses de rotation des arbres peuvent atteindre 6000 tr/min. La puissance délivrée par les moteurs électriques est de 120 kW, ce qui permet d'obtenir des couples de fonctionnement de 15 daN. m.

La zone active du dispositif d'engrènement est délimitée par un boîtier à huile métallique qui confine la lubrification par jet d'huile sur les engrenages. Ce boîtier ne joue en aucun cas le rôle d'un carter au sens de « liaison entre les différents organes actifs », il remplit uniquement la fonction de « réceptacle de liquide de lubrification » et est montré par la Figure 4.28.

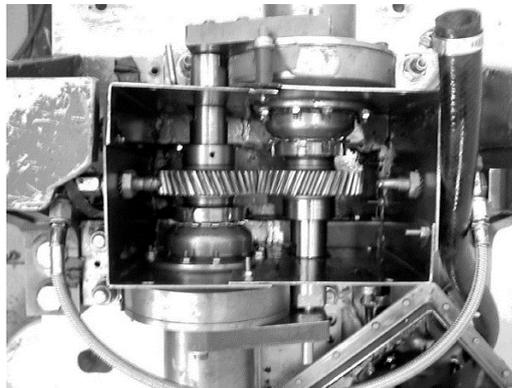


Figure 4.29: Vue de dessus de la transmission de puissance

Le comportement dynamique du système peut être étudié à l'aide de mesure d'accélération, d'erreur de transmission et de bruit.

Les accélérations sont mesurées à l'aide d'accéléromètres piézo-électriques de type ENDEVCO 224C dont la fréquence de résonance est de 32 kHz. Le montage des accéléromètres se fait par un collage de petites pastilles en Duralumin, sur lesquelles viennent se visser les accéléromètres.

Deux codeurs optiques sont montés en bout de chaque arbre. Ils permettent d'une part de connaître la position et les variations de position angulaire de chaque engrenage en fonction du temps et cela en cours de fonctionnement. Les signaux délivrés par ce type de capteur, sous forme de créneaux, sont particulièrement bien adaptés à la méthode de mesure de l'erreur de transmission cinématique mise au point sur ce banc.

L'ensemble des signaux et des mesures sont enregistrés sous leurs formes temporelles grâce à une carte d'acquisition de type RTI 860.

Les défauts ont été reproduits artificiellement par enlèvement de matière. Cette méthode d'obtention a été privilégiée par rapport à une méthode d'obtention par fonctionnement du système jusqu'à usure réelle pour trois raisons essentielles :

- **Temps imparti aux expérimentations** : le banc d'essais était alors sollicité pour les travaux relatifs à la détermination des paramètres de conception et pour les travaux de recherche de signatures de défauts d'engrenages. Chaque campagne d'essais ne pouvait durer qu'un temps relativement court, sans modifier les conditions d'expérimentation d'une campagne à une autre.
- **Limitations des dégradations** : seuls les défauts d'engrenages devaient être isolés. Un fonctionnement du système jusqu'à usure et détérioration totale des engrenages peut également s'accompagner de l'apparition de défauts sur d'autres organes mécaniques, notamment les roulements. L'analyse vibratoire présente alors des contributions des deux dégradations, ce dont il était impératif de s'affranchir à cette étape de la recherche,
- **Représentation simplificatrice des défauts** : l'objectif des travaux était de définir l'influence des défauts vibratoires sur la structure des signaux. Pour cela, il a été choisi de réaliser des défauts marqués pour que la modification des signaux qu'ils engendrent soit suffisamment identifiable.

Une fine meuleuse a permis de réaliser les défauts locaux sur la partie active d'une dent de la roue réceptrice. Afin de simuler l'aggravation du défaut d'écaillage, trois niveaux d'avarie ont été créés. A l'emplacement du primitif des dentures, le défaut correspondant au premier niveau de gravité occupe 1/3 de la largeur de la dent, le suivant occupe la moitié de cette largeur, tandis que le dernier défaut traverse toute la dent. La détérioration de la ligne primitive complète, ainsi que les dimensions de l'enlèvement de matière sont présentés par la Figure 4.30.

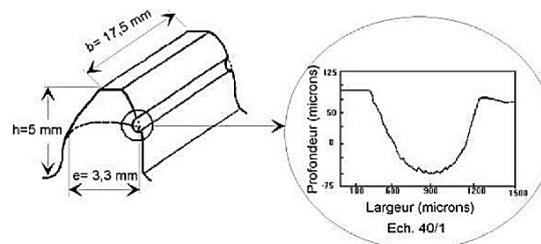


Figure 4.30: Simulation d'un défaut local d'engrenage

Les essais ont été menés sur des engrenages à denture droite et des engrenages à denture hélicoïdale. Les caractéristiques de conduite et d'angle d'hélice sont données par le Tableau 4.8:

Engrenages droits	Engrenages hélicoïdaux
36/38 dents, $\varepsilon \alpha = 1$, Rapport de conduite 1.3 Module = 2 qualité AGMA 12	36/38 dents, $\varepsilon \alpha = 1$, $\varepsilon \beta = 1.3$,

Tableau 4.8: Caractéristiques simplifiées d'engrenages

Le défaut réparti d'engrenages a été obtenu en faisant fonctionner le système sans lubrification, afin d'altérer uniformément les dents de la roue réceptrice et de la roue motrice.

4.3.3. Choix des défauts à simuler expérimentalement

L'étude bibliographique a permis d'établir une liste et une hiérarchie des principaux défauts d'usure pouvant intervenir sur les roulements et les engrenages lors du fonctionnement normal d'un système de transmission de puissance à engrenages. A partir de cela, on peut procéder à un choix optimal des défauts à observer sur les organes engrenages et roulements. Il s'agissait de conserver un nombre minimal mais significatif de défauts. Les défauts d'écaillage créés par fatigue et les défauts d'usure répartie sont les plus fréquents et les moins évitables. Les engrenages sont sensibles à ces deux types de défauts alors que les roulements sont plus particulièrement atteints par l'écaillage.

Pour mettre en évidence l'évolution de la signature des détériorations avec les conditions de fonctionnement, vitesse et couple transmis. Le banc fonctionner avec des vitesses et couples variés, et en présence d'avarie d'usure répartie et d'écaillage pour les engrenages et d'écaillage seul pour les roulements comme présenté par la Figure 4.31.

L'expérimentation doit prendre en considération, la signature des défauts isolés de roulements, la signature de défauts combinés roulements-roulements, et roulements-engrenages.

Pour la simulation de l'écaillage, le train d'engrenage présentant un enlèvement de matière sur toute la largeur de la dent est sélectionné. Le train d'engrenage utilisé par fonctionnement sans lubrifiant est utilisé pour l'étude de défaut uniformément réparti.

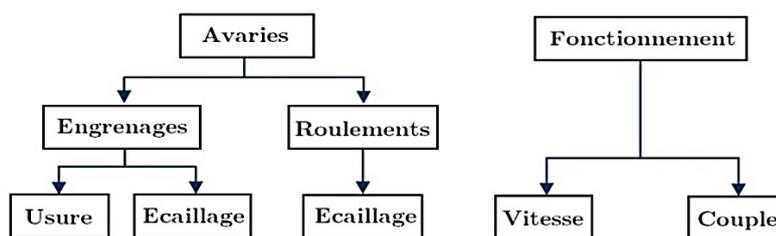


Figure 4.31: Facteurs à considérer pour l'expérimentation

Afin de vérifier la capacité à dissocier les signatures des roulements et différencier la provenance d'anomalies similaires, il est nécessaire d'introduire des défauts simultanément sur deux roulements différents. Pour cela, il faut agir sur les deux roulements situés sur la même ligne d'arbre au lieu des deux arbres différents pour la facilité de montage et de démontage des arbres d'essais. Les caractéristiques géométriques des deux types de roulements sont présentées dans le Tableau 4.9.

Roulement à billes	Zb = nombre d'éléments roulants Db = diamètre moyen du roulement [mm] db = diamètre de l'élément roulant [mm] α = angle de contact	Zb = 14 Db = 77.7 db = 9 α = 0
Roulement à rouleaux	Zr = nombre d'éléments roulants Dr = diamètre moyen du roulement [mm] dr = diamètre de l'élément roulant [mm] α = angle de contact	Zr = 21 Dr = 80.55 dr = 7 α = 0

Tableau 4.9: Caractéristiques géométriques des roulements

Les défauts de roulements étant choisis situés sur le même arbre, il restait à définir l'arbre sur lequel devait intervenir ces avaries. Les défauts locaux d'engrenages déjà disponibles étaient situés sur l'arbre récepteur. Afin de faciliter les premières recherches concernant les défauts locaux combinés d'engrenages et de roulements, l'arbre moteur portera les roulements endommagés. L'emplacement des défauts éventuels est résumé par la Figure 4.32.

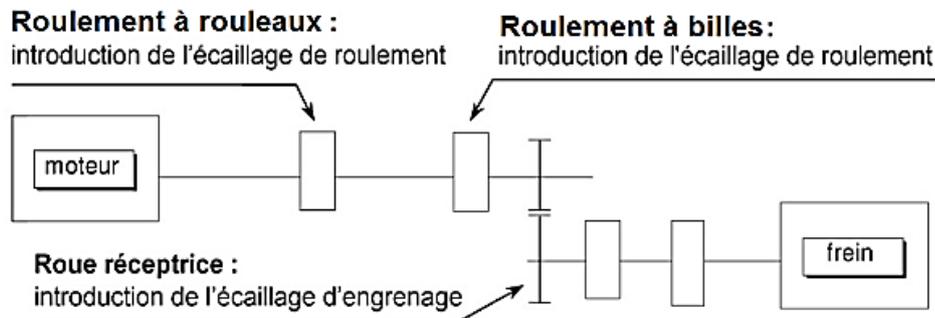


Figure 4.32: Disposition des défauts sur roulements et engrenages

L'écaillage de roulement peut être situé sur la bague intérieure, extérieure, ou sur un élément roulant. Il est important de pouvoir détecter les avaries quelques soit leur localisation. L'étude portera sur deux types de défauts : un défaut local sur bague intérieure, et un défaut local sur un élément roulant.

Pour simuler les écaillages sur les roulements, une entaille est réalisée à l'aide d'une fine meuleuse. Le roulement à rouleaux est démontable sans destruction ni outillage spécialisé, rendant accessible ses différents éléments ; le défaut d'écaillage sur élément roulant a donc été uniquement effectué sur le roulement à rouleaux. Il est situé sur une génératrice d'un rouleau. L'enlèvement de matière sur la bague intérieure a été réalisé sur les deux roulements de l'arbre moteur. Cependant, le défaut du roulement à rouleaux est plus important (facilité d'intervention) ; il traverse donc toute la piste, et est profond (cf. dimensions de la Figure 4.33). Par contre, le défaut du roulement à billes est plus faible et ne traverse pas toute la piste, car le démontage du roulement n'était pas envisageable. Les défauts reproduits sur chaque organe mécanique sont récapitulés Tableau 4.10.

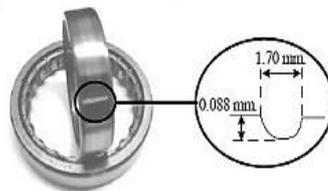


Figure 4.33: Géométrie du défaut bague intérieure du roulement à rouleaux

Engrenages	Entaille sur une dent de la roue menée, au niveau du primitif	Usure répartie des dents des deux roues par fonctionnement sans lubrifiant
Roulement à rouleaux	Entaille importante traversant la piste de la bague intérieure	Entaille sur une génératrice d'un rouleau
Roulement à billes	Faible entaille endommageant partiellement la piste de la bague intérieure	

Tableau 4.10: Défaut simulé sur chaque organe mécanique

4.3.4. Choix des grandeurs physiques à mesurer

Pour caractériser la signature de ces avaries types, on doit procéder à des mesures d'accélération aux paliers, pour cela, une carte d'acquisition 4 voies est utilisée. Trois accéléromètres ont été posés sur le système. Un accéléromètre a été disposé sur chaque roulement présentant un éventuel défaut, et le troisième sur le roulement à billes côté frein. Ce dernier n'a pas été placé sur le roulement à rouleaux intact car il aurait été trop loin de l'engrènement. Le positionnement de l'instrumentation de mesure « accéléromètres » et la cinématique de positionnement sont respectivement montrés par la Figure 4.34 et la Figure 4.35.

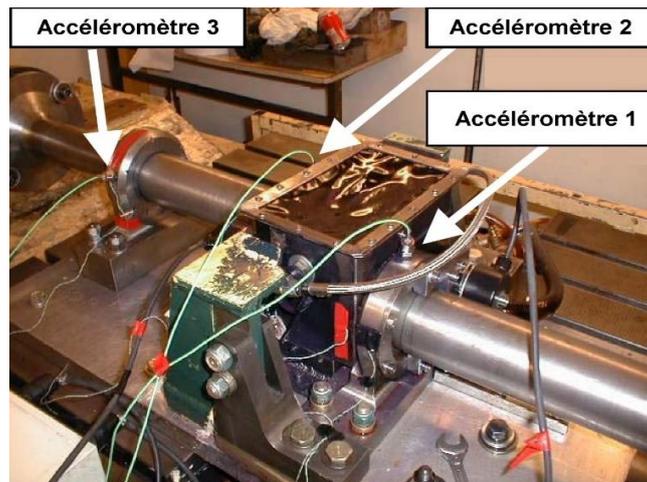


Figure 4.34: Positionnement de l'instrumentation de mesure

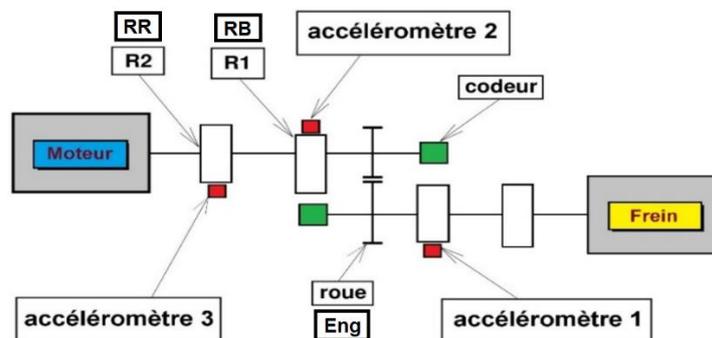


Figure 4.35: Schéma cinématique de positionnement des accéléromètres

4.3.5. Organisation des campagnes d'essais

Les conditions de fonctionnement sont caractérisées par le couple résistant et la vitesse motrice applicables au système. Le banc d'essais a une plage de fonctionnement en vitesse de 0 à 6000 tr/min, et une plage pour le couple de 0 à 150 N.m. Afin de choisir plusieurs vitesses d'étude, les signaux de mesures ont été enregistrés tous les 100 tr/min de 100 à 5500 tr/min. Trois vitesses ont ensuite été retenues, représentatives de la plage de fonctionnement du système présenté dans le Tableau 4.11. On considère seulement deux modalités pour le couple 60 et 120 N.m pour mettre en évidence l'effet de la charge sur la signature des défauts de roulements.

Vitesse [tr/min]	1300	2300	4300
Couple [N.m]	60	120	

Tableau 4.11: Conditions de fonctionnement pour les campagnes d'essai

La fréquence d'échantillonnage des mesures d'accélération est de 50000 Hz, permettant ainsi d'accéder notamment à l'influence des défauts de roulements sur les hautes fréquences. Finalement, le plan d'expérience complet est réalisé selon la méthodologie de TAGUCHI, avec deux répétitions pour accéder aux couplages entre les paramètres récapitulés dans le Tableau 4.12.

	Modalité 1	Modalité 2	Modalité 3
Roulement à billes (R1)	neuf	Défaut local B.I.	
Roulement à rouleaux (R2)	neuf	Défaut local B.I.	
engrenages (E)	neuf	Défaut local roue	Défaut réparti
couple (C)	60 N.m	120 N.m	
vitesse (V)	1300 Tr/min	2300 Tr/min	4300 Tr/min

Tableau 4.12: Paramètres de manipulation

Ce plan conduit à : $2 \times 2 \times 2 \times 3 \times 2 \times 3 = 144$ expériences, dont douze (12) démontages de la machine d'essais.

4.3.5.1. Codage des tests

Le codage est utilisé pour permettre, d'une part, la différenciation entre les différents tests sans risque de confusion, d'autre part permet de donner une certaine fluidité de changement de paramètres, pour cela la désignation présentée par la Figure 4.36 est utilisée pour la codification des différents signaux acquis.

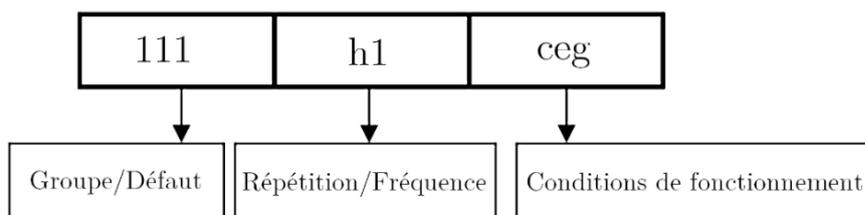


Figure 4.36: Désignation des tests pour les signaux LaMCoS

Les fichiers convertis prennent un nom générique de type : **111h2cbg.txt**, dont les combinaisons des expériences sont données par le Tableau 4.13.

- Les trois premiers chiffres représentent la configuration du banc.
- Les trois dernières lettres sont les informations concernant les conditions de fonctionnement du banc (vitesse et couple).

Les trois colonnes des fichiers contiennent les mesures des trois accéléromètres respectivement acc1 « engrenage Eng », acc2 « roulement à billes RB » et acc3 « roulement à rouleaux RR » selon la

disposition de la Figure 4.35, "h" signifie qu'on a une fréquence d'échantillonnage de 50 kHz, h1: répétitions 1; h2: répétitions 2.

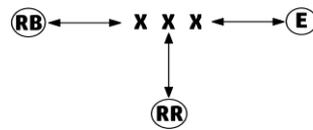


Figure 4.37 : Codification des essais par organe

111	121	131	211	221	231
112	122	132	212	222	232
113	123	133	213	223	233

Tableau 4.13: Les différentes combinaisons d'expériences

1- Groupe/Défaut: introduction d'un défaut par élément

L'introduction des défauts est montrée par le Tableau 4.14.

Roulement à Billes		Roulement à Rouleaux		Engrenage Hélicoïdal	
Sans défaut	1	Sans défaut	1	Sans défaut	1
Défaut localisé (L_RB)	2	Défaut localisé	2	Défaut localisé (L_EH)	2
		Elément Roulant (ER_RR)	3	Défaut Distribué (D_EH)	3

Tableau 4.14: Introduction du défaut localisé par élément

2- Répétition / fréquence:

Répétition h1: test unique avec fréquence d'échantillonnage de 50 kHz.

Répétition h2: test unique avec fréquence d'échantillonnage de 50 kHz.

3- **Conditions de fonctionnement:** Le Tableau 4.15 donne les charges et vitesses pour les différentes expérimentations avec leurs codifications.

Charges [daN.m]	Vitesses [tr/min]	Désignation
6	1300	cbg
	2300	ccg
	4300	ceg
12	1300	ebg
	2300	ecg
	4300	eeg

Tableau 4.15: Données des conditions de fonctionnement

4- **Codification finale:** 111h1ceg, 113h1ebg etc...

4.3.5.2. Les fichiers textes contiennent les mesures des acc1, acc2, acc3

On a 18*6 fichiers = 108 fichiers et chacun contient 3 colonnes de données des accéléromètres acc1, acc2 et acc3, qu'on va séparer par la suite pour faciliter le traitement, ce qui donne au total 108*3= 324 fichiers séparées (échantillon montré par la Figure 4.38).



Figure 4.38 : Echantillon de fichiers des données expérimentales

4.4. Analyse des Signaux Gipsa-lab

4.4.1. Evaluation globale des accélérations verticales et horizontales

Dans cette partie d'évaluation, on va présenter en premier lieu les signaux d'accélérations montrés dans le Tableau 4.2 CH1-CH6 de l'analyseur RACAL suivant les quatre creas : crea1, crea2, crea3 et crea4 de la fiche d'acquisition du Tableau 4.4 du paragraphe 4.2.4.8, la variation des indicateurs Ku, Sk, RMS et CF en fonction de la charge, selon la fixation verticale et horizontale des accéléromètres selon les crea1, crea2, crea3 et crea4 et qui représentent le fonctionnement sous différentes charges : 0, 48, 93 et 140 N. m.

4.4.1.1. Représentation temporelle

La représentation temporelle des accélérations des creas 1, 2, 3 et 4 zoomées à trois (03) périodes au minimum et qui sont présentées par la Figure 4.39, Figure 4.40 et Figure 4.41 pour la configuration verticale et par la Figure 4.42, Figure 4.43 et Figure 4.44 pour la configuration horizontale.

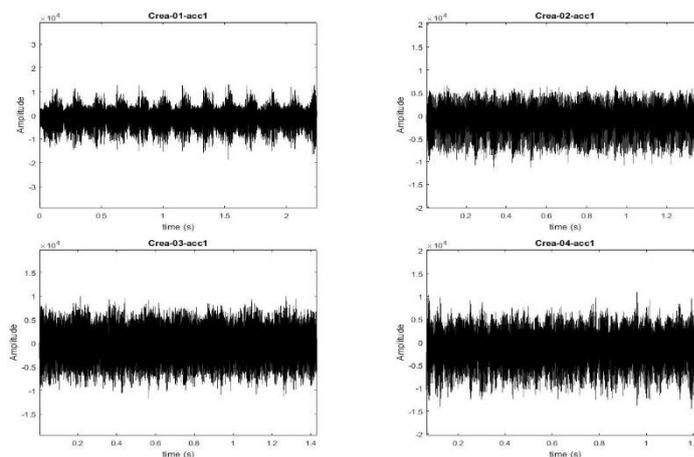


Figure 4.39: Accélérations au niveau du capteur 1 crea1-4

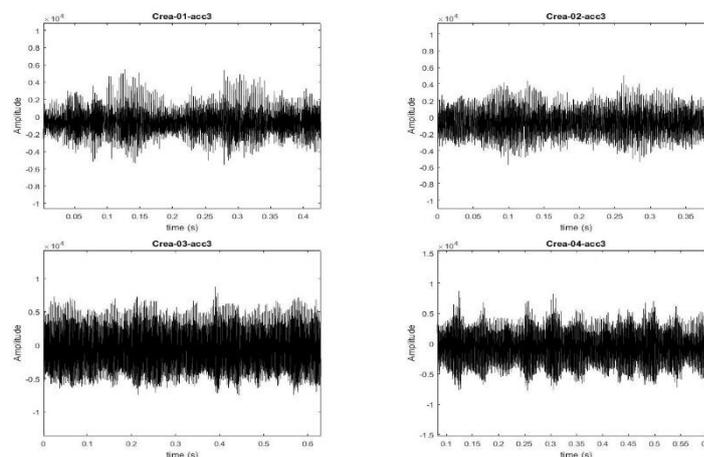


Figure 4.40: Accélérations au niveau du capteur 3 crea1-4

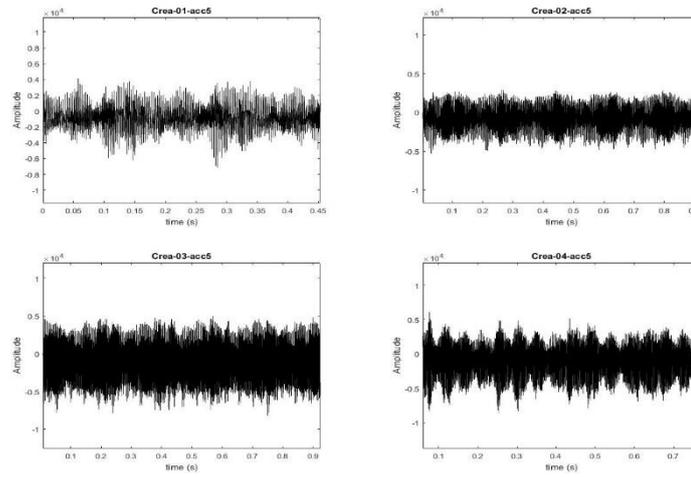


Figure 4.41: Accélérations au niveau du capteur 5 crea1-4

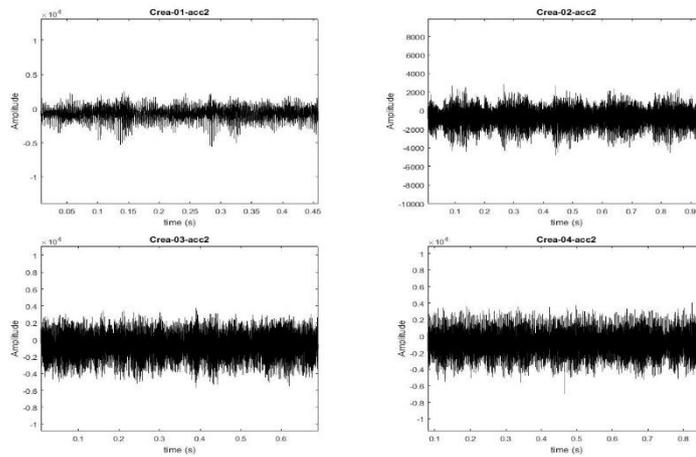


Figure 4.42: Accélérations au niveau du capteur 2 crea1-4

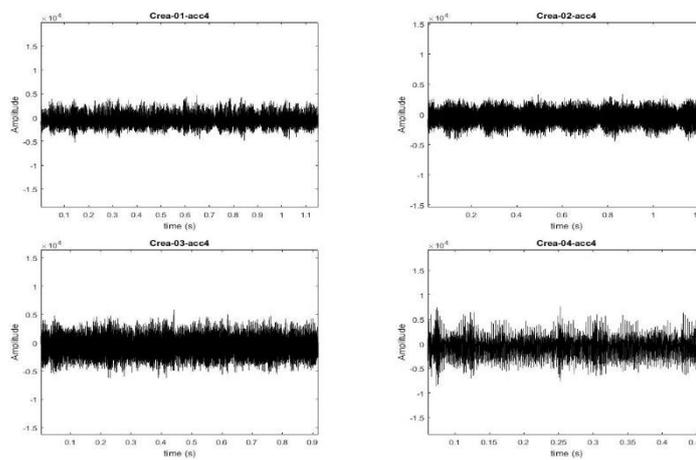


Figure 4.43: Accélérations au niveau du capteur 4 crea1-4

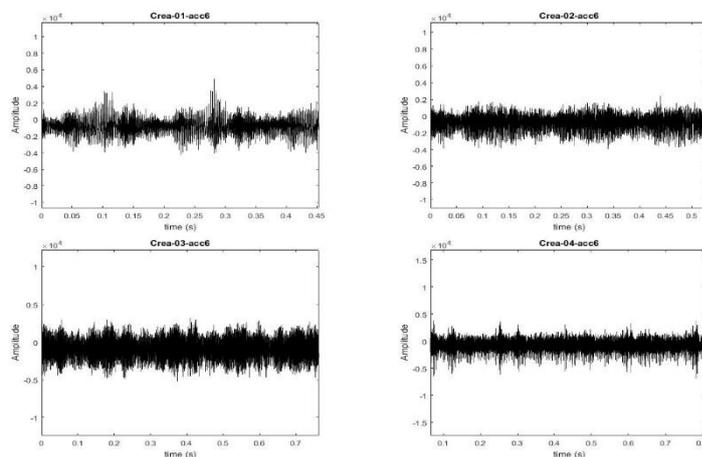


Figure 4.44: Accélérations au niveau du capteur 6 crea1-4

4.4.1.2. Variation des indicateurs Ku, Sk, RMS, CF, JBT et ICF

Les données des indicateurs scalaires sont calculés sous Matlab avec les formules du Tableau 1.9, sont présentées dans le Tableau 4.16, Tableau 4.17, Tableau 4.18 et Tableau 4.19 «Extraits des: Annexe 1, Annexe 3 et Annexe 5 et Annexe 7 ».

4.4.1.2.1. Kurtosis

Ku-01	CAPT-01-RV	CAPT-03-RV	CAPT-05-RV	CAPT-02-RH	CAPT-04-RH	CAPT-06-RH
Crea-1	6,03	5,92	5,35	16,07	14,61	18,37
Crea-2	3,9	6,86	8,14	31,55	37,18	35,29
Crea-3	2,8	2,68	3,31	8,55	9,23	20,5
Crea-4	3,61	3,29	5,06	9,37	8,13	28,64

Tableau 4.16: Valeurs du Kurtosis pour différents charges crea-1-4

4.4.1.2.2. Skewness

Crea	CAPT-01-RV	CAPT-03-RV	CAPT-05-RV	CAPT-02-RH	CAPT-04-RH	CAPT-06-RH
Crea-1	-0,2559	0,3465	0,0722	-0,2697	0,4114	0,2716
Crea-2	-0,334	0,1835	0,0922	-0,026	0,2045	0,197
Crea-3	0,2454	0,1702	-0,0648	0,015	-0,0731	0,2265
Crea-4	-0,4417	0,0508	-0,3418	-0,0021	-0,0354	-0,034

Tableau 4.17: Valeurs du Skewness pour différents charges crea-1-4

4.4.1.2.3. RMS

Crea	CAPT-01-RV	CAPT-03-RV	CAPT-05-RV	CAPT-02-RH	CAPT-04-RH	CAPT-06-RH
Crea-1	2863,98848	1525,13116	1485,48595	1009,99629	1314,19651	1003,04397
Crea-2	2691,88198	1628,88608	1476,58586	1023,06718	1266,76172	1037,79716
Crea-3	3535,31546	2927,39529	2508,06068	1581,08384	1985,89323	1297,02039
Crea-4	3394,86453	2684,17769	2238,83129	1565,43078	2139,03075	1209,76073

Tableau 4.18: Valeurs du RMS pour différents charges crea-1-4

4.4.1.2.4. Facteur de crête (FC)

Crea	CAPT-01-RV	CAPT-03-RV	CAPT-05-RV	CAPT-02-RH	CAPT-04-RH	CAPT-06-RH
Crea-1	11,3834	21,3306	21,6764	32,3308	24,9285	32,6048
Crea-2	12,0477	20,1033	22,0563	32,0243	25,7775	31,4936
Crea-3	9,1316	11,157	13,0491	20,6839	16,4712	25,2602
Crea-4	9,6493	12,1464	14,6206	20,9284	15,2985	27,0004

Tableau 4.19: Valeurs du Facteur de Crête (CF) pour différents charges crea-1-4

4.4.1.2.5. Test de Jarque-Berra

Avec $k = 0$ et $n = 2048000$

JB	CAPT-01-RV	CAPT-03-RV	CAPT-05-RV	CAPT-02-RH	CAPT-04-RH	CAPT-06-RH
Crea-1 x10 ⁵	8,057889485	7,685673813	4,730326494	146,0188607	115,6002985	201,8406112
Crea-2 x10 ⁵	1,071977813	12,82925995	22,57374153	695,5564407	997,0685278	889,8554334
Crea-3 x10 ⁵	0,239688226	0,18625891	0,096338057	26,285568	33,13858086	261,508445
Crea-4 x10 ⁵	0,983462878	0,080573918	4,019975646	34,62563639	22,46136545	560,9934711

Tableau 4.20: Test de Jarque-Bera des creas selon les capteurs

4.4.1.2.6. Indice de Cornish-Fisher

ICF	CAPT-01-RV	CAPT-03-RV	CAPT-05-RV	CAPT-02-RH	CAPT-04-RH	CAPT-06-RH
Crea-1	-0,75144194	-0,783473168	-0,886297575	7,983788098	5,792267459	11,75690618
Crea-2	-0,977925715	-0,497770878	0,067271717	46,43492366	67,60216316	60,01259068
Crea-3	-0,888586799	-0,880352406	-0,969099629	0,293787348	0,706179803	15,89509465
Crea-4	-0,942828221	-0,967783099	-0,927959556	0,802303367	0,065474546	36,94144109

Tableau 4.21: Indice de Cornish-Fisher des creas selon les capteurs

4.4.1.2.7. Variation des JBT et ICF en fonction des creas et capteurs

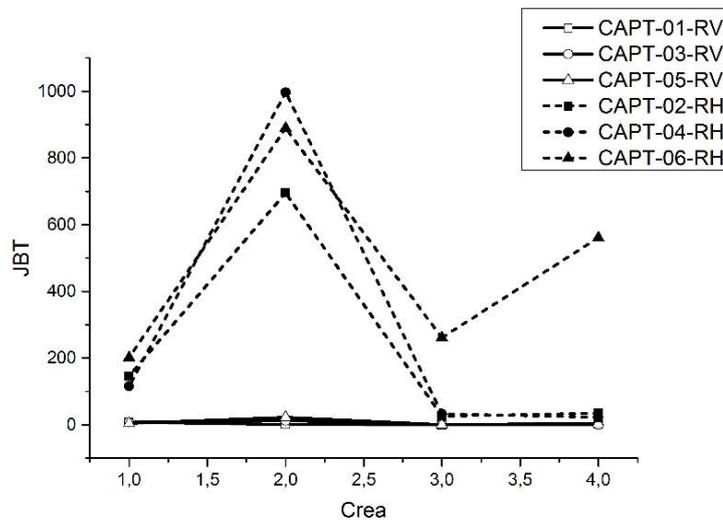


Figure 4.45: Variation de Jarque-Bera en Fonction des creas et capteurs

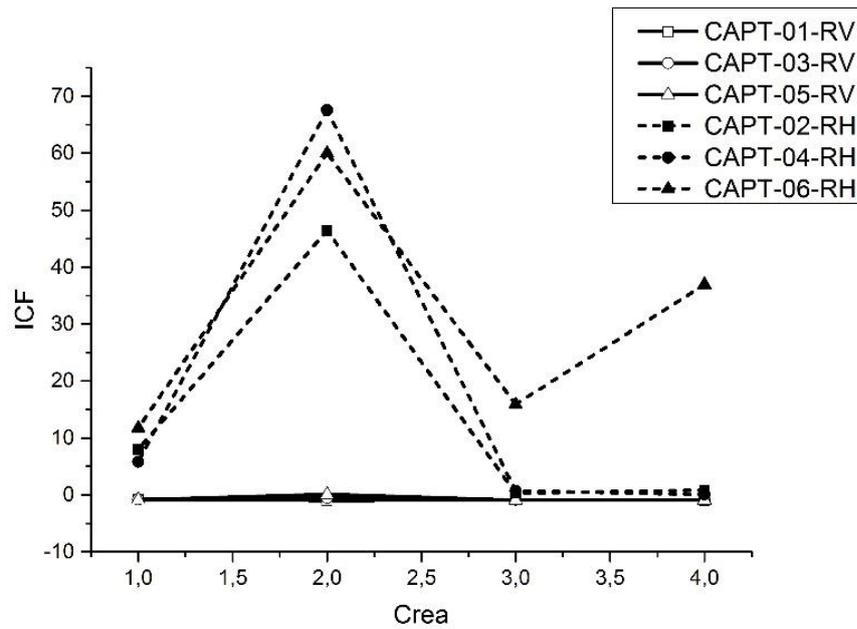


Figure 4.46: Variation de l'Indice de Cornish-Fisher en fonction des creas et capteurs

4.4.1.2.8. Interprétation

On constate que les valeurs des capteurs horizontaux sont excessivement grands par rapport aux verticaux et cela, est visible dans les courbes de variation de Jarque-Bera Test (JBT) calculée par la formule du paragraphe 1.3.5.1 et aussi montré par les courbes de variation de l'indice de Cornish-Fisher (ICF) calculé par la formule du paragraphe 1.3.5.2. Aussi, en se référant au même paragraphe 1.2.5.2 de l'indice de Cornish-Fisher, on peut facilement rejeter les valeurs positives de l'ICF et on ne retient que les valeurs négatives et celles proches de zéro, ce qui est traduit par l'élimination logique des données des accéléromètres horizontaux et on ne retient que les données des accéléromètres verticaux.

4.4.1.2.9. Conclusion

On peut conclure que toutes les mesures acceptables ne considèrent que les vibrations verticales, compte tenu que les roulements supportent mal les charges radiales et surtout les roulements à rouleaux.

Les indices de Jarque-Bera et de Cornish-Fisher, qui sont des fonctions du Kurtosis et de Skewness, sont des outils qui peuvent être utilisés pour la classification des signaux à caractères stationnaires et non stationnaire, ce qui leurs donne la faculté d'être utilisés aussi comme des indicateurs de surveillance efficaces.

4.4.1.3. Variations des indicateurs en fonction de la charge

On reprenant les valeurs des Tableau 4.16, Tableau 4.17, Tableau 4.18 et le Tableau 4.19 du paragraphe 4.4.1.2 (extrait de l'Annexe 1, Annexe 3, Annexe 5 et Annexe 7) et on trace la variation des indicateurs scalaires de l'accélération des trois capteurs verticaux et horizontaux (CH1-CH6) en fonction de la charge montrée par la Figure 4.47 .

Crea	Crea-1	Crea-2	Crea-3	Crea-4
Charge [N. m]	0	48	93	140

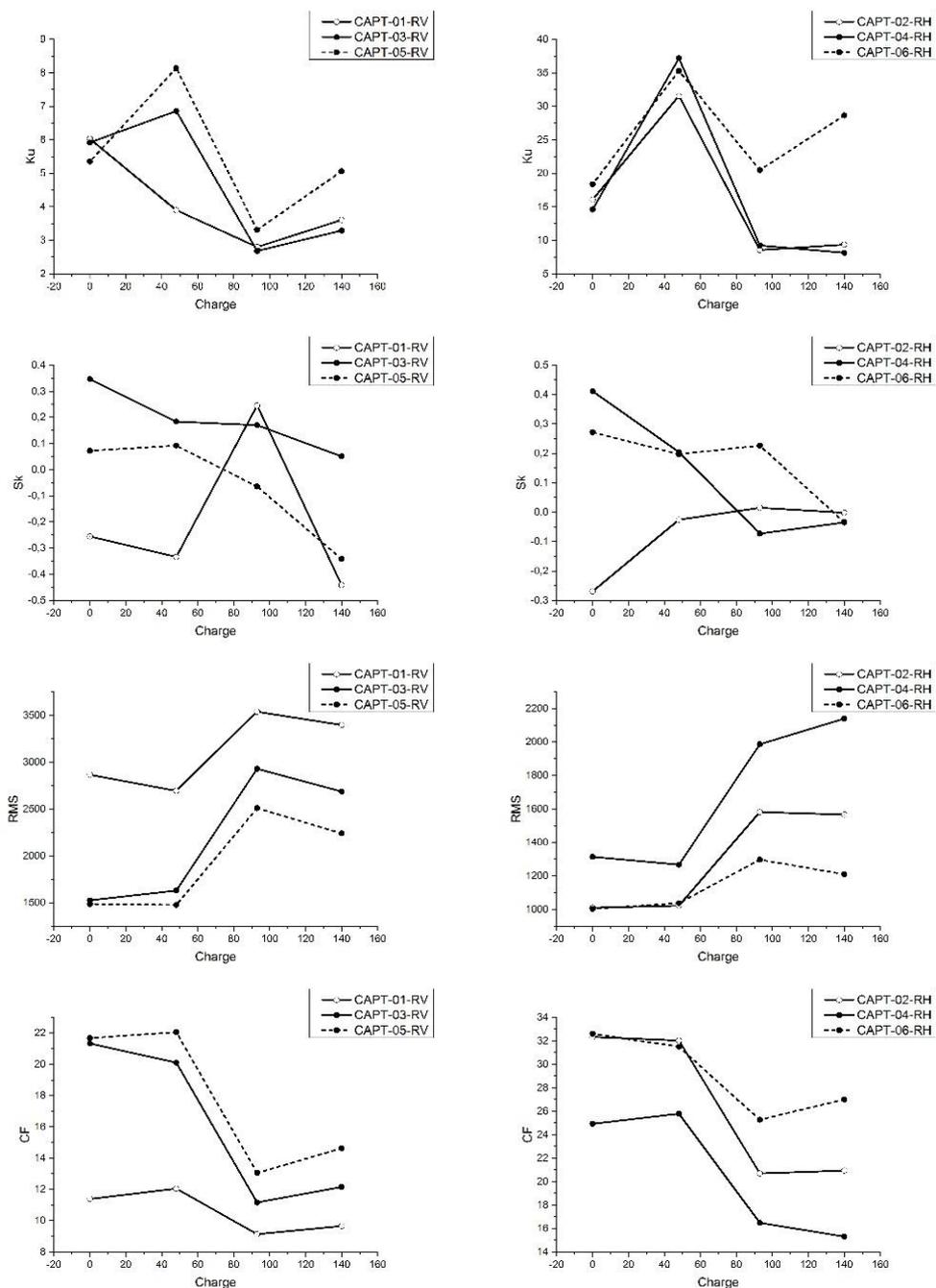


Figure 4.47: Variation des indicateurs scalaires en fonction de la charge

4.4.1.3.1. Interprétation

On remarque que la valeur du Kurtosis dans la configuration horizontale est très importante par rapport à la configuration verticale ce qui est expliqué aussi par la grande dispersion positive ou négative des données présentées par le Skewness.

Pour la variation des indicateurs en fonction de la charge, on remarque visiblement que le facteur de crête est inversement proportionnel avec la charge donc chaque fois que la charge augmente on peut facilement perdre l'information sur le défaut qui disparaît dans les calculs mais devient dangereux pour le système mécanique. Par contre le RMS est proportionnel avec la charge, et avec une combinaison avec le facteur de crête, il peut servir comme moyen efficace pour la détection, le Kurtosis qui caractérise la normalité, indique une variation supérieure à trois justifiée aussi par une asymétrie traduite par un Skewness assez éloigné du zéro.

4.4.1.3.2. Conclusion

Après l'examen des différentes courbes de la Figure 4.47, on constate que :

- Un excès considérable du Kurtosis dans la configuration horizontale par rapport à la verticale, phénomène qui lui rend insensible à la détection de la normalité.
- Le Skewness est aussi excessif dans la configuration horizontale que la verticale, à vide, il montre une asymétrie par rapport aux données sous la charge.
- Le RMS est proportionnelle à la charge, et il augmente avec l'augmentation de la charge.
- Le facteur de crête CF est inversement proportionnelle à la charge.

Donc la combinaison des quatre indicateurs permis une détection certaine de la normalité en fonction de la charge et le Kurtosis reste un outil robuste pour la détection des modulations provoquées par les défauts.

On peut aussi remarquer, que les courbes de la configuration horizontale « courbes de droite de la Figure 4.47 » ont la même tendance que la configuration verticale « courbes de gauche de la Figure 4.47 » par conséquent, on peut affirmer qu'il est inutile de mesurer les vibrations horizontales « axiales », donc, pour la surveillance des machines, on ne doit s'intéresser qu'aux vibrations verticales « radiales ».

4.4.2. Variation du couple, vitesses entrée-sortie et de température

Dans cette partie, on va présenter la variation de indicateurs Ku, Sk, RMS et CF du couple transmis à l'arbre de sortie mesuré par le couplemètre (C), la vitesse d'entrée, de sortie (V) et la température (T, sonde placée au logement 2) en fonction de la charge pour les quatre creas : crea1, crea2, crea3 et crea4 des capteurs suivant les canaux CH7, CH8, CH9 et CH20 du Tableau 4.2, sont représentés dans les Tableaux CVT « C : couple, V : vitesse d'entrée et de sortie, T : la température » Tableau 4.22, Tableau 4.23, Tableau 4.24 et Tableau 4.25 « Extraits: Annexe 1, Annexe 3, Annexe 5 et Annexe 7 pour les capteurs CAPT-07, 08 et 09 et Annexe 2, Annexe 4, Annexe 6 et Annexe 8 pour le CAPT-20 » et par les figures CVT : Figure 4.48, Figure 4.49, Figure 4.50 et Figure 4.51 respectivement du Kurtosis, Skewness, RMS et CF.

4.4.2.1. Kurtosis

Crea	CAPT-07	CAPT-08	CAPT-09	CAPT-20
1	2 695,97	40 976,24	51 079,70	25224,7512
2	397,03	13 593,44	16 756,50	7972,76867
3	699,64	9 368,01	13 046,37	7597,16005
4	1 175,89	8 916,52	11 846,17	6238,63655

Tableau 4.22: Variation du Kurtosis CVT en fonction de la charge

4.4.2.2. Skewness

Crea	CAPT-07	CAPT-08	CAPT-09	CAPT-20
1	-12,6101	71,3213	-192,91	-152,7699
2	-5,3115	51,5345	-110,3	-85,58135
3	-12,3852	34,8151	-99,54	-82,37874
4	-20,249	38,7731	-93,12	-74,05604

Tableau 4.23: Variation du Skewness CVT en fonction de la charge

4.4.2.3. RMS

Crea	CAPT-07	CAPT-08	CAPT-09	CAPT-20
1	330,44222	131,55397	157,51	286,61759
2	644,48698	221,81136	259,53	516,0144
3	641,26086	277,64122	292,79	522,40005
4	615,75483	278,53842	304,82	572,69122

Tableau 4.24: Variation du RMS CVT en fonction de la charge

4.4.2.4. Facteur de Crête

Crea	CAPT-07	CAPT-08	CAPT-09	CAPT-20
1	99,1066	242,4176	206,68	109,56062
2	50,7908	143,7979	125,38	63,02925
3	51,0791	114,8893	110,91	61,84149
4	53,0893	115,9768	106,24	57,20884

Tableau 4.25: Variation de CF en fonction de la charge

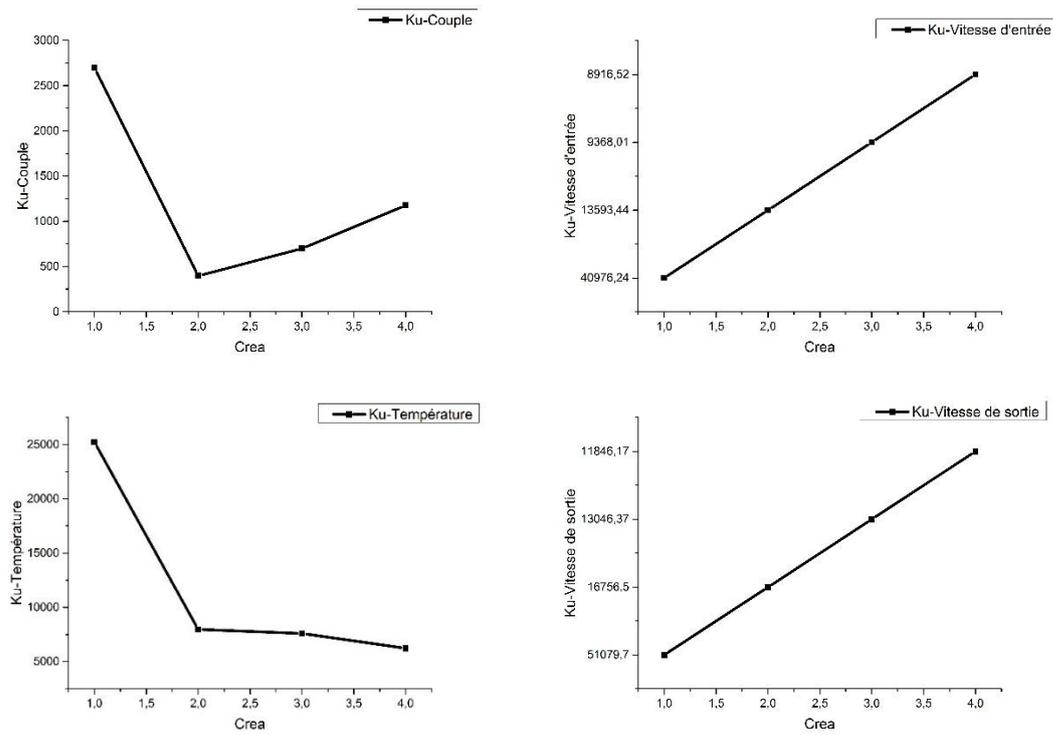


Figure 4.48: Variation du Kurtosis CVT en fonction de la charge

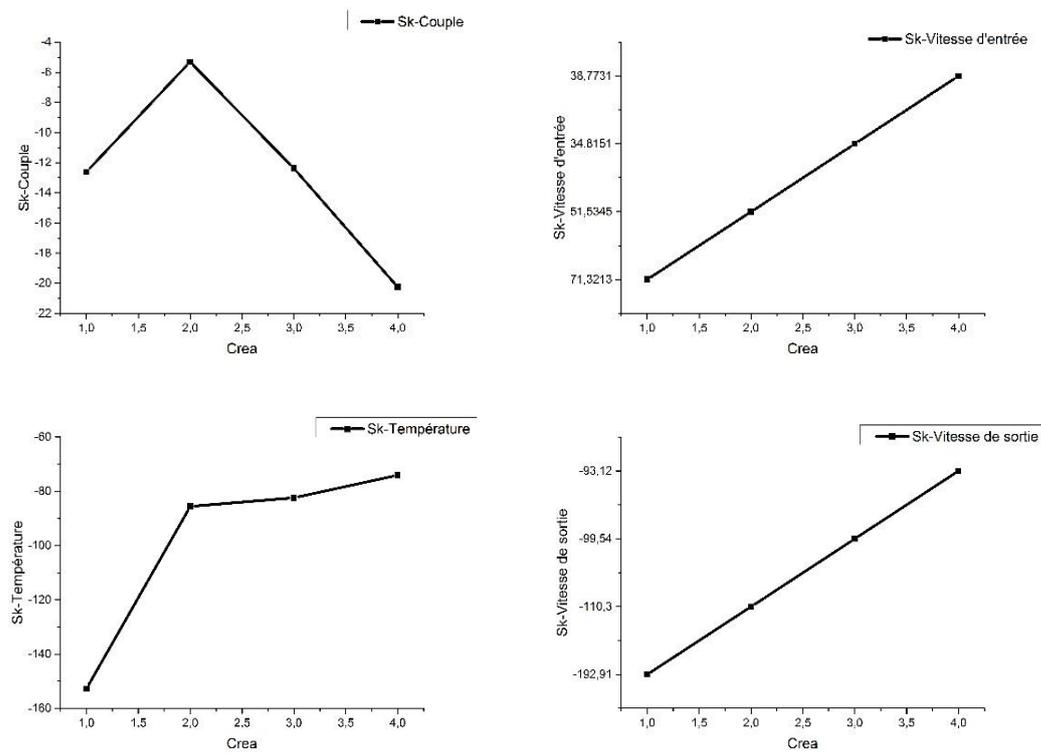


Figure 4.49: Variation du Skewness CVT en fonction de la charge

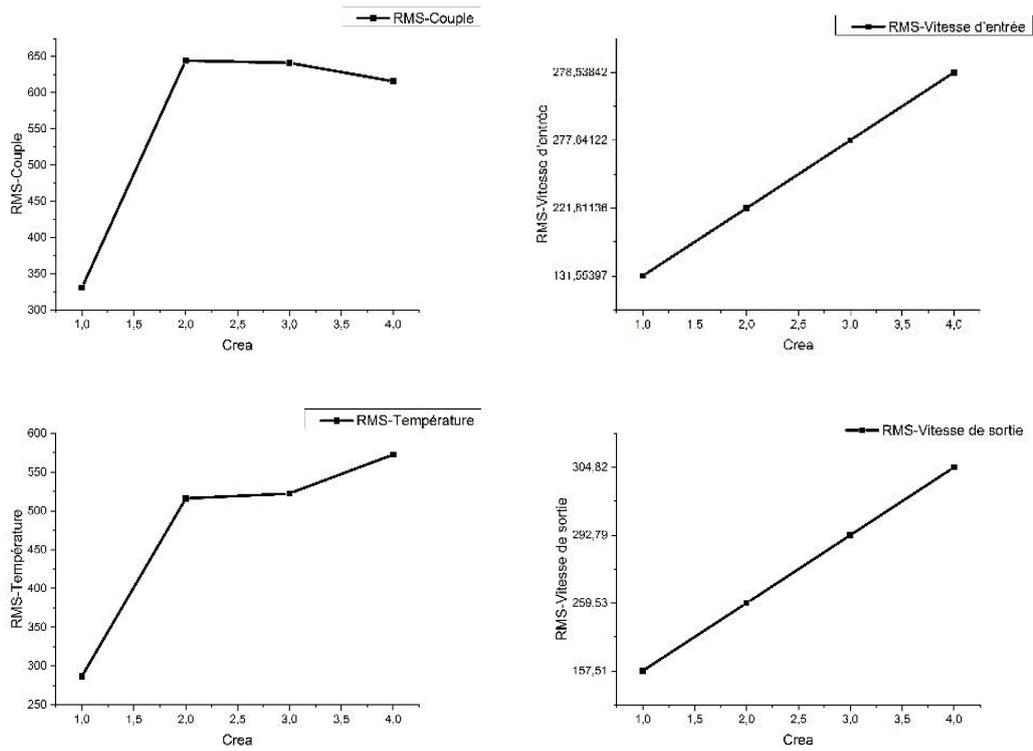


Figure 4.50: Variation du RMS CVT en fonction de la charge

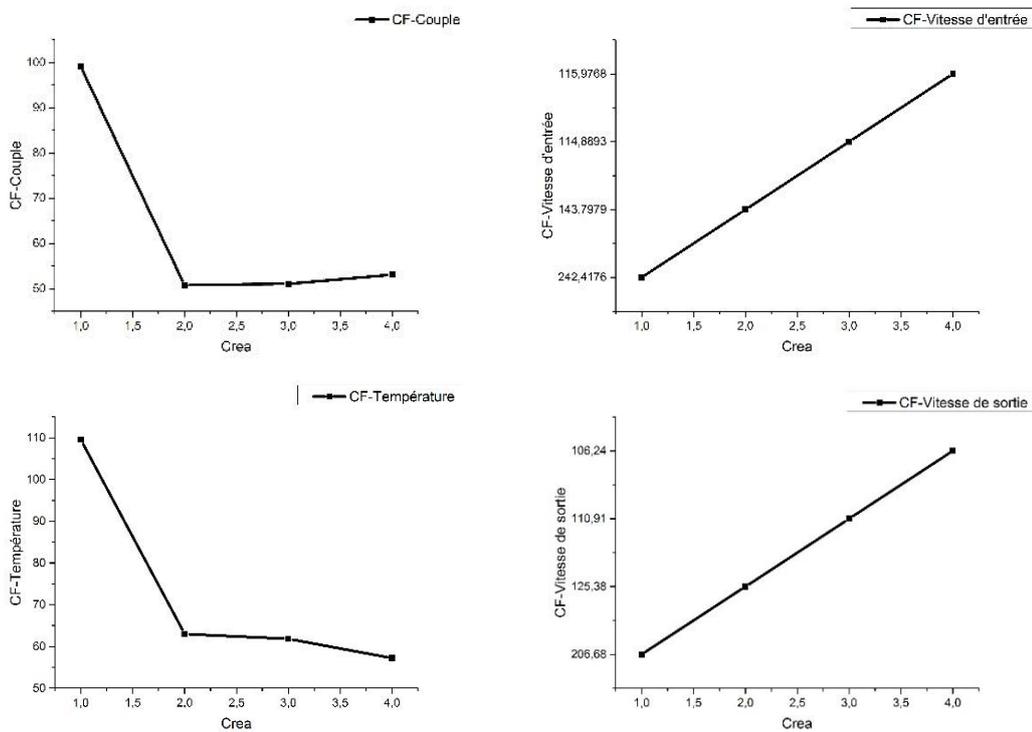


Figure 4.51: Variation du CF en fonction de la charge

4.4.2.5. Interprétation

Après l'examen des différentes courbes, On remarque que les indicateurs scalaires de surveillance Ku, Sk, RMS et CF de la vitesse d'entrée et de sortie sont proportionnels à la charge c'est-à-dire en augmentant la charge à la sortie l'indicateur de la vitesse de sortie augmente aussi avec un rapport fixe de transmission du mouvement « rapport de transmission » par rapport à la vitesse d'entrée, et les fluctuations de ce rapport sont minimales quel que soit la variation de la charge ou de la vitesse entrée-sortie et l'utilisation des indicateurs de suivi de la vitesse comme paramètre de suivi est délicate, car la mesure repose surtout sur la qualité des appareils de mesures, qui doivent être stables et fiables et aussi d'une bonne conception mécanique.

Pour les indicateurs scalaires de surveillance Ku, Sk, RMS et CF de la température de l'huile de barbotage la variation est proportionnelle à la charge c'est-à-dire que les indicateurs scalaires de la température augmentent avec l'augmentation de la température, et de cela on peut conclure aussi que la variation de la température peut aussi donner une indication importante sur l'état de la machine.

Dans le cas les indicateurs scalaires de surveillance Ku, Sk, RMS et CF du couple de transmission et sans tenir compte de l'essai à vide correspondant à la valeur nulle du couple, le Kurtosis augmente en fonction de la charge et a des valeurs excessives justifiées par une asymétrie gauche importante montrée par les valeurs négatives du Skewness et qui diminue avec la charge, presque le même comportement du RMS, avec le Kurtosis, qui augmente d'une façon exponentielle avec la charge et en fin le CF qui diminue exponentiellement avec la charge mais ses valeurs restent importantes par rapport à sa valeur classique.

4.4.2.6. Conclusion

La mesure du couple transmis par l'arbre de transmission et de la température de fonctionnement peuvent servir comme des moyens de détection. Par contre le suivi de la vitesse d'entrée et de sortie ne sert qu'au suivi de la transmission et peuvent être utiles dans le cas du suivi de l'erreur de transmission.

Globalement les indicateurs de surveillance Ku, Sk, RMS et CF peuvent servir ensemble comme peuvent être deux à deux, car il peut avoir une grande valeur sans ou avec l'influence de la charge due à des accélérations brusques et aussi aux décélérations brusques, qui nuisent d'une façon importante les valeurs nominales des indicateurs.

4.4.3. Courants et tensions de phases

Dans cette partie, on va présenter la variation de indicateurs Ku, Sk, RMS et CF des courants et des tensions dans les phases U, V et W en fonction de la charge pour les quatre creas : crea1, crea2, crea3 et crea4 des capteurs suivant les canaux CH10, CH11, CH12 pour les courants et CH13, CH14 et CH15 pour les tensions de l'analyseur RACAL du Tableau 4.2, sont représentés dans les Tableaux CVT « C : couple, V : vitesse d'entrée et de sortie, T : la température » : Tableau 4.26, Tableau 4.27, Tableau 4.28 et Tableau 4.29 « Extraits des: Annexe 1, Annexe 3, Annexe 5 et Annexe 7 pour le CAPT-10 et Annexe 2, Annexe 4, Annexe 6 et Annexe 8 pour les CAPT-11-CAPT-15» et par les: Figure 4.52, Figure 4.53, Figure 4.54 (zoom représenté par la Figure 4.56) et Figure 4.55 respectivement du Kurtosis, Skewness, RMS et CF.

4.4.3.1. Kurtosis

Crea	CAPT-10	CAPT-11	CAPT-12	CAPT-13	CAPT-14	CAPT-15
1	2,26	4,98652	2,57895	1,5196	1,5074	1,5196
2	4,1	8,22584	4,74036	1,5305	1,5242	1,5453
3	2,72	4,42963	3,17536	1,5471	1,5325	1,5523
4	2,1	2,83758	2,42035	1,5646	1,5474	1,5749

Tableau 4.26: Kurtosis des courants et tensions de phases en fonction des creas

4.4.3.2. Skewness

Crea	CAPT-10	CAPT-11	CAPT-12	CAPT-13	CAPT-14	CAPT-15
1	0,02	0,03289	0,00225	-1,55E-04	-2,73E-04	-0,00209
2	0,02	0,0131	0,01766	-3,55E-05	1,28E-04	-0,00375
3	0,01	-8,17E-04	0,0063	-7,31E-04	0,00356	-0,00401
4	0	0,01313	-0,00563	-6,21E-04	0,00424	-0,00302

Tableau 4.27: Skewness des courants et tensions de phases en fonction des creas

4.4.3.3. RMS

Crea	CAPT-10	CAPT-11	CAPT-12	CAPT-13	CAPT-14	CAPT-15
1	1817,81	0,05686	0,05761	0,20088	0,20105	0,20377
2	1967,55	0,06192	0,0623	0,19954	0,20008	0,2026
3	2458,73	0,07682	0,07714	0,19717	0,19763	0,19995
4	3259,87	0,10192	0,10208	0,19384	0,19518	0,19657

Tableau 4.28: RMS des courants et tensions de phases en fonction des creas

4.4.3.4. Facteur de Crête

Crea	CAPT-10	CAPT-11	CAPT-12	CAPT-13	CAPT-14	CAPT-15
1	17,3	17,5172	17,3212	4,9634	4,5606	4,8447
2	16,63	16,1341	15,9334	4,843	4,9852	4,9321
3	13,32	13,0004	12,9216	5,0218	5,0455	5,001
4	10,02	9,81147	9,73375	5,158	5,0727	5,0809

Tableau 4.29: CF des courants et tensions de phases en fonction des creas

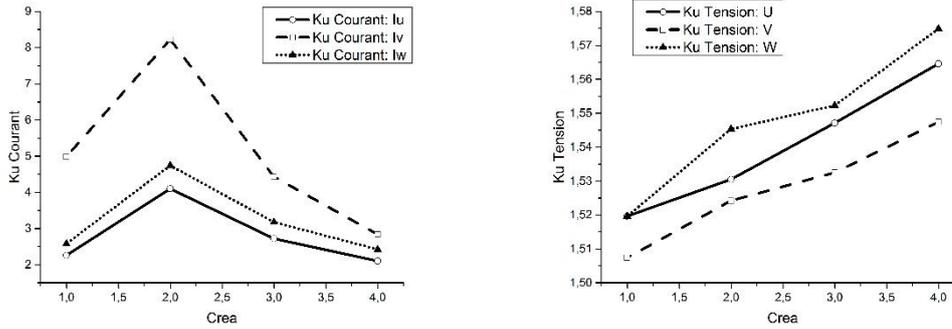


Figure 4.52: Variation du Kurtosis des indicateurs des courants et tensions

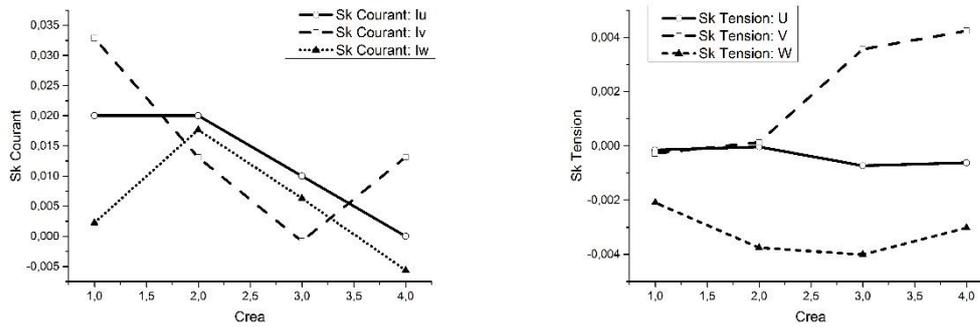


Figure 4.53: Variation du Skewness des indicateurs des courants et tensions

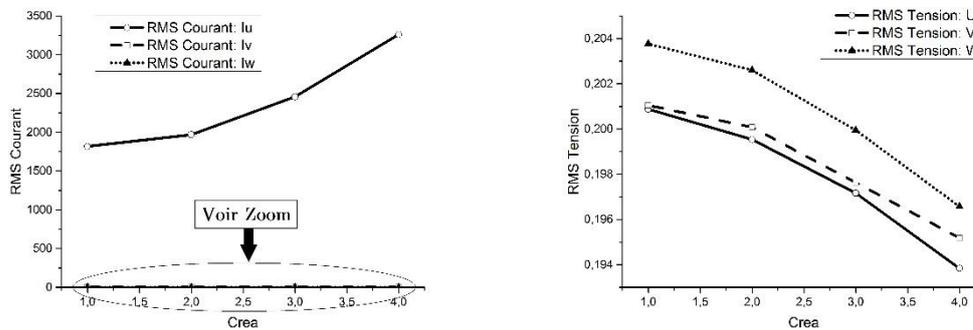


Figure 4.54: Variation du RMS des indicateurs des courants et tensions

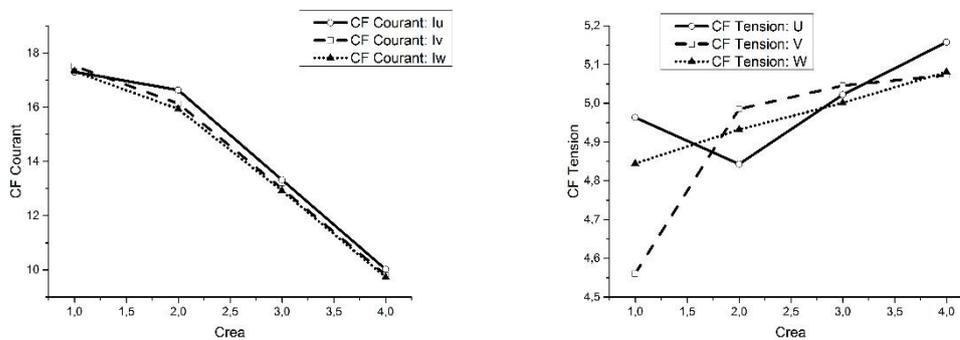


Figure 4.55: Variation du CF des indicateurs des courants et tensions

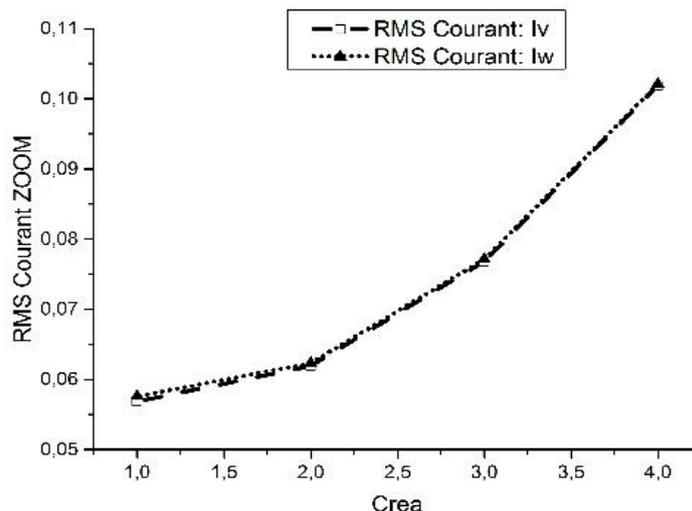


Figure 4.56: Zoom de la variation du RMS des courants en fonction des creas

4.4.3.5. Interprétation

Après examen des différentes courbes de variation du Ku, Sk, RMS et CF en fonction des : crea1, crea2, crea3 et crea4 représentées par les : Figure 4.52, Figure 4.53, Figure 4.54 (zoom représenté par la Figure 4.56) et Figure 4.55, des courants et tensions dans les phases U, V, W, illustrés par la Figure 4.57 (on a représenté que les courants et les tensions des crea1 et 2), on constate que :

Le Kurtosis est stable aux alentours de 1,5 pour les tensions, pour les courants il est compris entre 2 et 5 sauf pour la phase V du canal CH11 « crea 2 » il est de l'ordre de 8, signe d'anomalie sur cette phase et c'est tout à fait logique du moment, que malgré le matériel déployé pour la stabilisation des tensions et des courants, il y'aura toujours des fluctuations dues aux grandeurs perturbatrices qui rend le Kurtosis instable « supérieur à 3 » et aussi on remarque une légère diminution du Kurtosis des courants en fonction de la charge, par contre il y'a aussi une légère augmentation du Kurtosis des tensions en fonction de la charge.

Pour le Skewness, il indique une très bonne symétrie, et il est de l'ordre de zéro pour les courants et aussi pour les tensions, avec une tendance de diminution en fonction de la charge que ce soit pour les courants ou les tensions.

Le facteur de crête « CF » est stable pour les tensions avec une légère tendance d'augmentation en fonction de la charge. Par contre pour les courants, il est compris entre 9 et 17 avec une tendance de diminution en fonction de la charge, signe d'une légère instabilité.

Le RMS est stable pour les tensions il est de l'ordre de 0.2 avec une légère tendance de diminution en fonction de la charge, pour les courants, il est de l'ordre de 0.1 pour les phases I, W et très important pour la phase U du canal CH10 ce qui indique une instabilité au niveau de cette phase alors que les autres indicateurs n'indiquent qu'une légère fluctuation.

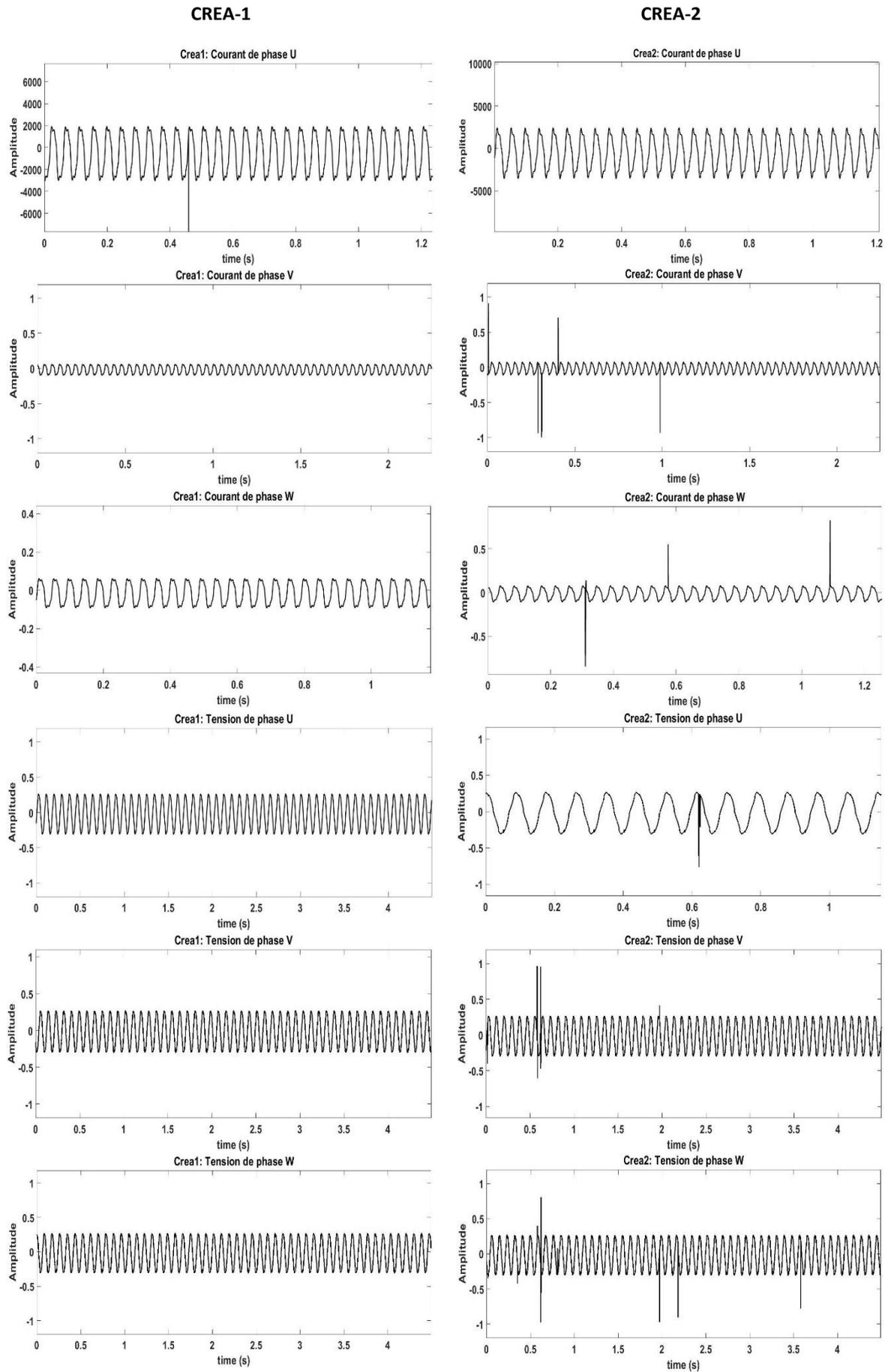


Figure 4.57: Représentation temporelle des courants et des tensions des crea 1 et 2

4.4.3.6. Conclusion

Le contrôle des courants et des tensions des différentes phases permet d'isoler toute influence sur l'état général de fonctionnement du banc, ainsi, toutes les données analysées permettent de certifier une très bonne stabilité des tensions et des courants d'alimentation du moteur.

L'examen des indicateurs de surveillance Kurtosis, Skewness, RMS et CF permet d'affirmer ou infirmer la stabilité et la régulation des courants et tensions d'alimentation d'un moteur électrique de très bonne qualité par contre devienne sans instable et parfaitement aléatoire si un vieux moteur ou de bas de gamme.

L'analyse des courants et des tensions statoriques de la Figure 4.57 peuvent servir comme moyen de surveillance avec l'utilisation des indicateurs de surveillances séparément ou combinés.

4.4.4. Encodeurs et Top tours

Dans cette partie, on va présenter la variation de indicateurs Ku, Sk, RMS et CF des encodeurs et des top tours en fonction de la charge pour les quatre creas : crea1, crea2, crea3 et crea4 des capteurs suivant les canaux CH16, CH17, CH18 et CH19 destinés aux encodeurs E1-Arbre d'entrée, E1-Top Tours à l'entrée, E2-Arbre de sortie et le E2-Top Tours à la sortie de l'analyseur RACAL du Tableau 4.2, sont représentés dans les: Tableau 4.30, Tableau 4.31, Tableau 4.32 et Tableau 4.33 « Extraits des Annexe 2, Annexe 4, Annexe 6 et Annexe 8 » et par les Figure 4.58, Figure 4.59, Figure 4.60 et Figure 4.61 respectivement du Kurtosis, Skewness, RMS et CF.

4.4.4.1. Kurtosis

Crea	CAPT-16	CAPT-17	CAPT-18	CAPT-19
1	1,24142	7019,94035	3,37745	7509,0912
2	1,26192	5234,58381	5,7047	4826,98758
3	1,26426	5084,36277	4,14898	4767,50014
4	1,27808	4301,76563	3,53175	3947,87774

Tableau 4.30: Kurtosis des encodeurs et des Top Tours en fonction des creas

4.4.4.2. Skewness

Crea	CAPT-16	CAPT-17	CAPT-18	CAPT-19
1	-0,0124	44,03823	-0,063	21,90535
2	-0,01547	19,29886	-0,15744	11,96431
3	-0,01602	18,69866	-0,09483	17,49667
4	-0,01993	19,17348	-0,09114	11,9292

Tableau 4.31: Skewness des encodeurs et des Top Tours en fonction des creas

4.4.4.3. RMS

Crea	CAPT-16	CAPT-17	CAPT-18	CAPT-19
1	6488,1054	231,53963	1844,296	222,45905
2	6490,9601	299,47095	1952,2212	314,3935
3	6491,1446	305,29036	2279,3989	319,32761
4	6494,0976	347,04569	2614,9011	360,16103

Tableau 4.32: RMS des encodeurs et des Top Tours en fonction des creas

4.4.4.4. Facteur de Crête

Crea	CAPT-16	CAPT-17	CAPT-18	CAPT-19
1	5,04785	140,97803	17,75854	146,80455
2	5,04748	109,37622	16,78293	104,18473
3	5,04456	107,16683	14,36607	102,41833
4	5,04473	94,12305	12,51175	90,96487

Tableau 4.33: CF des encodeurs et des Top Tours en fonction des creas

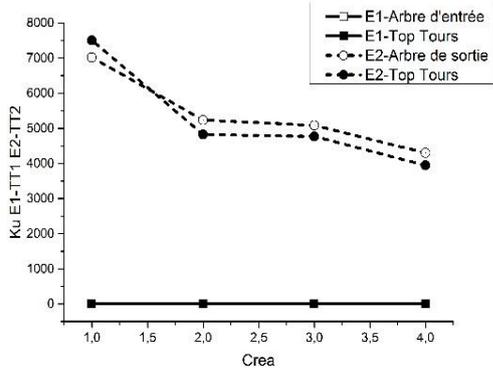


Figure 4.58: Variation du Kurtosis des encodeurs et des Top Tours

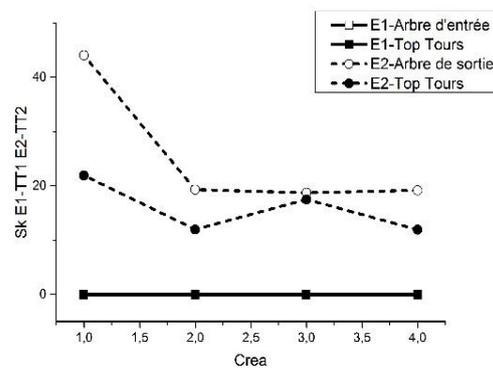


Figure 4.59: Variation du Skewness des encodeurs et des Top Tours

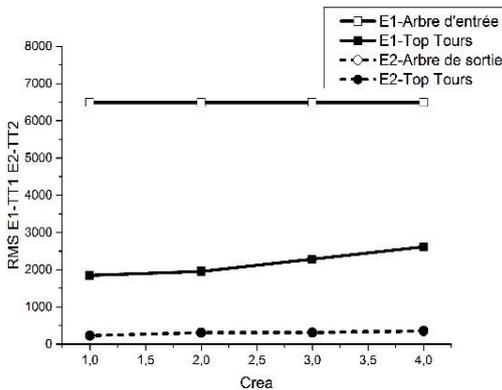


Figure 4.60: Variation du RMS des encodeurs et des Top Tours

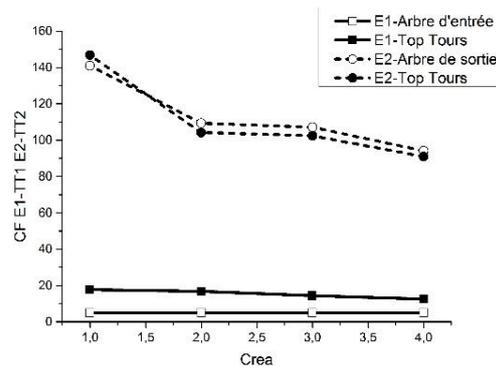


Figure 4.61: Variation du CF des encodeurs et des Top Tours

4.4.4.5. Interprétation :

En examinant les différentes courbes des Figure 4.58, Figure 4.59, Figure 4.60 et Figure 4.61 représentant respectivement la variation du Kurtosis, Skewness, RMS et CF en fonction des creas1, creas2, creas3 et creas4 des encodeurs à l'entrée et à la sortie, on constate que :

Le Kurtosis « Ku » pour l'arbre d'entrée est stable car il est proche de trois que ce soit à vide ou en charge, pour l'erreur de transmission et aussi pour le Top tour, par contre ses valeurs augmentent d'une manière considérable à la sortie, indiquant ainsi un changement de vitesse considérable, et c'est tout à fait normale du moment que la vitesse est multiplié par 3.8 « la boîte de vitesse est utilisée

comme un multiplicateur et non pas un réducteur, rapport de transmission : $n_2 = \frac{Z_1}{Z_2} n_1$ avec $Z_1 = 57$ et $Z_2 = 15$ », donc le Kurtosis augmente avec l'augmentation de la vitesse et diminue avec la charge.

Le Skewness « Sk » pour l'arbre d'entrée et le top tour, est stable car il est proche de zéro, signalant ainsi une symétrie moyennée par contre pour l'arbre de sortie, il indique une grande asymétrie droite qui traduit l'état des données qui ne suit plus la loi normale et par conséquent une dispersion des données mais avec une diminution régulière avec la charge et cela pour les deux encodeurs de sortie.

Le même phénomène du Kurtosis et Skewness est observé aussi pour le facteur de crête « CF » par contre il est inversé pour le RMS.

4.4.4.6. Conclusion

Dans cette partie, on a examiné la variation des indicateurs de surveillance Ku, Sk, RMS et CF en fonction de la charge et après l'analyse des différentes courbes on peut conclure que :

- La vitesse de sortie est stable par rapport à l'entrée et le facteur multiplicateur est pratiquement respecté, ce qui est expliqué par la bonne transmission.
- Les indicateurs de surveillance sont très sensibles pour la surveillance des paramètres d'entrée-sortie d'une boîte de vitesse malgré qu'un indicateur « RMS » a échoué pour la détection des erreurs de transmission surveillées par les encodeurs.
- Les indicateurs diminuent avec la charge du moment que la vitesse de transmission diminue en fonction de la charge et que les indicateurs de surveillance augmentent avec la vitesse par fois considérablement.
- La combinaison de plusieurs indicateurs est impérative pour une bonne surveillance.

4.5. Analyse des signaux LaMCoS

4.5.1. Effets de défauts isolés sur les signaux d'accélération

En se basant sur les défauts de roulements du sous-chapitre 1.3, on va présenter expérimentalement l'effet de ce dernier sur le changement de l'accélération au niveau des engrenages et roulements en fonction de degré de gravité.

Les engrenages et les roulements sont des organes de transmission d'efforts et de mouvement par contact physique entre pièces. Ce type de transmission émet naturellement bruit et vibrations. Ainsi les vibrations principales sont produites par les chocs d'entrée en contact des dents d'engrenages. La fréquence d'apparition de ce phénomène est la fréquence d'engrènement.

Les types de défauts choisis sont des avaries liées à des enlèvements de matière se produisant par usure par frottement de glissement pour le défaut réparti d'engrenages et par transmission de charge par contact quasi ponctuel pour l'écaillage. Chaque fois qu'une avarie participe à un contact, elle modifie les caractéristiques vibratoires, sonores et cinématiques du système.

En analysant les mesures d'accélération, on va identifier et quantifier ces modifications afin d'établir une relation entre les mesures, le type et la géométrie du défaut. Chaque défaut participe régulièrement à la transmission d'efforts et de mouvement. La fréquence d'apparition peut alors être connue à partir de la géométrie et de la cinématique du système. Dans un système de transmission de puissance à engrenages, il est possible de connaître la vitesse de rotation de chaque arbre ainsi que la géométrie des roulements et engrenages.

L'écaillage situé sur une dent d'engrenage est sollicité à chaque tour d'arbre, sa fréquence caractéristique est la fréquence de rotation de l'arbre sur lequel est montée la roue dentée.

L'usure répartie sur l'ensemble de la denture de l'engrenage se manifeste en continu, à chaque mise en contact de profils conjugués. La fréquence de ce type d'avarie est la fréquence d'engrènement : le produit de la fréquence de rotation d'arbre par le nombre de dents de la roue solidaire de cet arbre.

Un calcul cinématique permet de déterminer la fréquence d'apparition des défauts locaux pouvant survenir sur un roulement. Le Tableau 1.5 regroupe les fréquences caractéristiques des défauts analysés.

4.5.2. Influence des défauts isolés sur les signaux temporels bruts

Les défauts d'engrenages et de roulements ont une incidence sur l'allure des signaux mesurés : accélérations aux paliers. L'influence des avaries sur les signaux temporels bruts va être développée dans ce paragraphe. Ces descriptions permettent de comprendre les phénomènes et d'appuyer le choix d'indicateurs.

4.5.3. Signaux d'accélération

4.5.3.1. Influence des défauts d'engrenages

Les deux défauts envisagés sur l'engrenage sont :

- Un défaut localisé sur une dent ;
- Un défaut d'usure réparti sur toutes les dents des deux roues de l'engrenage.

La Figure 4.62 présente l'allure du signal d'accélération mesurée sur un palier à proximité de l'engrenage « colonne2 ».

Les signaux temporels bruts sont présentés pour :

- Une durée de 0.01 sec, qui correspond à 10 périodes d'engrènement (Figure 4.62.a à Figure 4.62.c).
- Une durée de 0.05 sec, qui correspond à deux périodes de rotation de l'arbre moteur (Figure 4.62.d à Figure 4.62.f).

Le couple d'engrenage produit des vibrations à travers tout le système mécanique ainsi le signal d'accélération avec un engrenage sans défaut est constitué de la somme de deux caractéristiques principales :

- Un signal périodique à la période d'engrènement (Figure 4.62.a)
- Une modulation d'amplitude de période de rotation d'arbre (Figure 4.62.d).

En présence du défaut réparti, la composante qui correspond à la fréquence d'engrènement du signal devient prépondérante (Figure 4.62.c). De plus, l'amplitude due à la modulation d'amplitude à la fréquence de rotation d'arbre est augmentée (Figure 4.62.f).

Dans le cas du défaut local d'engrenage, l'amplitude du signal due à la modulation d'amplitude est plus importante que dans la configuration sans défaut (Figure 4.62.e).

L'analyse du signal sur une petite plage temporelle (Figure 4.62.b.) montre que la composante d'engrènement est plus marquée que pour la configuration sans défaut mais moins nette que dans la configuration avec défaut réparti. D'autre part, le signal présente par endroit des pics correspondant à l'enregistrement par l'accéléromètre de la participation de la dent endommagée à l'engrènement.

D'une manière générale, les défauts d'engrenages entraînent une augmentation d'amplitude visible qualitativement sur l'ensemble des Figure 4.62.

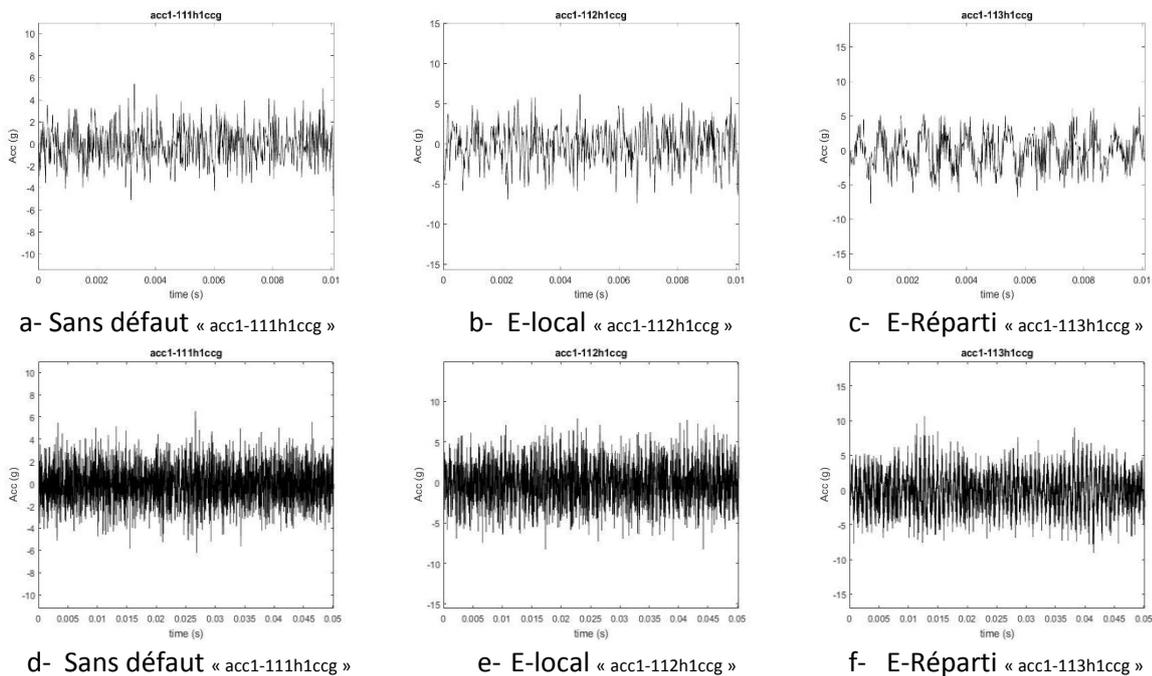


Figure 4.62: Influence de l'état de l'engrenage sur le signal temporel d'accélération (2300 tr/min, 60 N.m)

L'examen des indicateurs de surveillance représentés par le Tableau 4.34 et la Figure 4.63 « Extrait des Annexe 9, Annexe 10, Annexe 11 pour le tableau et Extrait des Annexe 63, Annexe 64 et Annexe 65 pour la figure » permet de confirmer que le Kurtosis est proche de trois avec une légère asymétrie montrée par Skewness qui est plus ou moins proche de zéro, le RMS indique un fonctionnement parfait justifié par sa valeur de 1.8354 dans le cas du fonctionnement sain « 111 » et qui augmente progressivement avec la gravité du défaut et enfin le CF, aussi, il indique un fonctionnement sain et qui augmente légèrement avec la gravité du défaut. Finalement, on peut dire que les indicateurs échouent complètement de détecter un défaut d'écaillage naissant ou de faible gravité.

acc1ccg	Ku	Sk	RMS	CF
111	2,8701	-0,0025	1,8354	3,7380
112	2,8888	0,0176	2,5770	3,6483
113	2,7377	0,0388	2,8390	4,0715

Tableau 4.34: Tableau des indicateurs pour un engrenage sain/écaillé

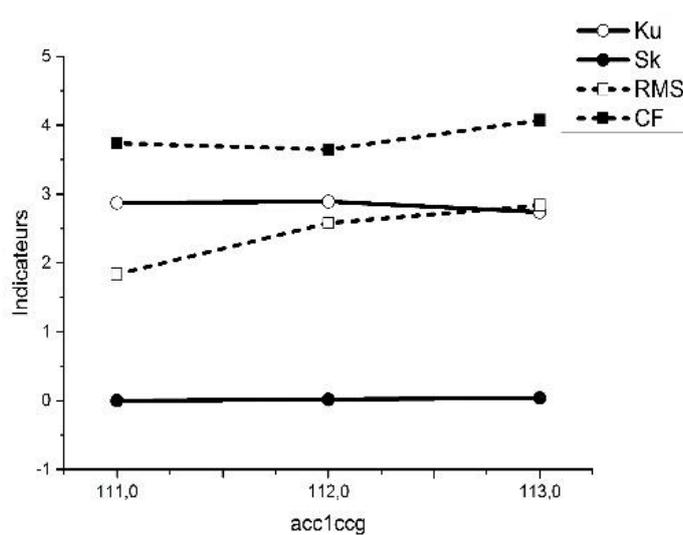


Figure 4.63: Variation des indicateurs par test

L'examen de la variation des indicateurs de surveillance dans le cas d'un fonctionnement sain et avec un faible défaut « faible gravité » en fonction de la vitesse permet de conclure que la variation du Kurtosis et le Skewness est peu sensible par contre, on remarque une augmentation, même elle est insignifiante mais elle reste un signe de changement de variation quasi-linéaire.

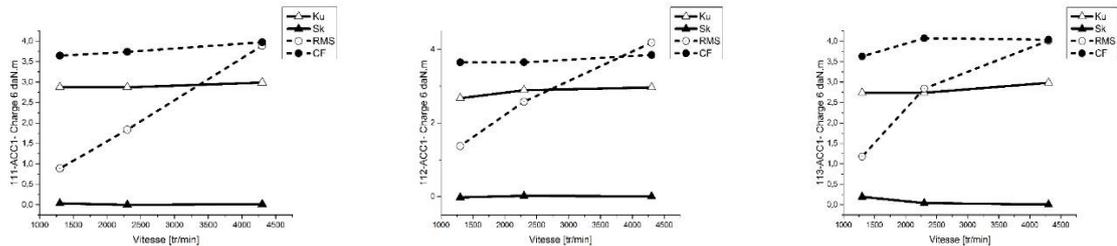


Figure 4.64: Variation des indicateurs par test en fonction de la vitesse

4.5.3.2. Influence des défauts de roulements

Les défauts de roulements ont été réalisés sur les roulements de l'arbre moteur. L'écaillage sur la bague intérieure du roulement à rouleaux et aussi sur la bague intérieure du roulement à billes. On va analyser l'influence des défauts sur les signaux d'accélération considérés en défaut isolé, recueillis sur les paliers porteurs de l'endommagement. Le défaut de la bague intérieure est situé sur le rayon reliant l'accéléromètre à l'axe de l'arbre une fois par tour d'arbre.

Le signal temporel présente deux caractéristiques majeures :

- Une modulation d'amplitude correspondant à la fréquence de rotation d'arbre.
- Une composante périodique de la période du défaut (Figure 4.65).

La gravité du défaut a une influence sur l'allure du signal temporel. La Figure 4.66 compare l'effet de l'écaillage de la bague intérieure du roulement à billes et celui de la bague intérieure du roulement à rouleaux. L'amplitude du signal en présence d'un défaut important est un plus élevée qu'en présence

d'un défaut faible (39,65g et 17,6g à 2300 tr/min et 60 N.m). Lorsque l'avarie est importante, l'accéléromètre perçoit le choc sur une zone plus large qu'en présence d'un faible défaut. La modulation d'amplitude induite est donc plus prononcée.

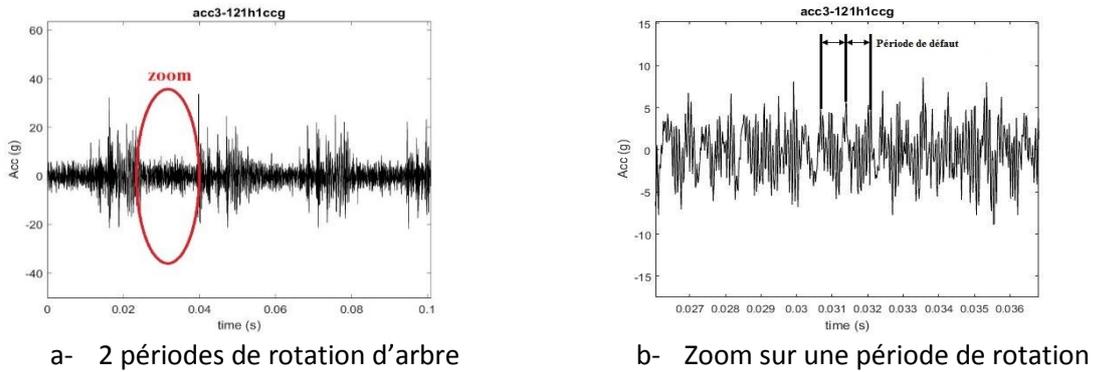


Figure 4.65: Effet d'un écaillage de la bague intérieure Test 121 (2300tr/min, 60 N.m, $Ku=6.6062$)

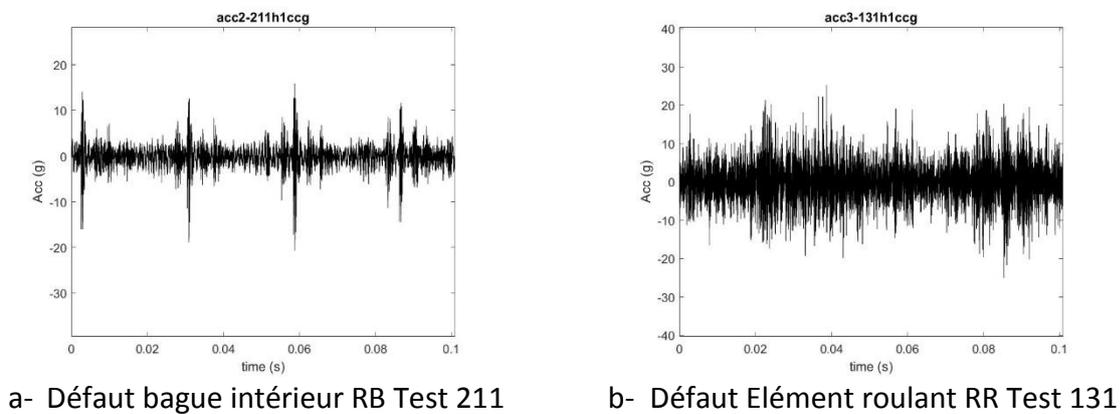


Figure 4.66: Influence de l'écaillage de la bague intérieure et l'élément roulant (2300tr/min, 60 N.m, $Ku_{211}=10.8171$, $Ku_{131}=3.5437$ « Tableau 4.35 »)

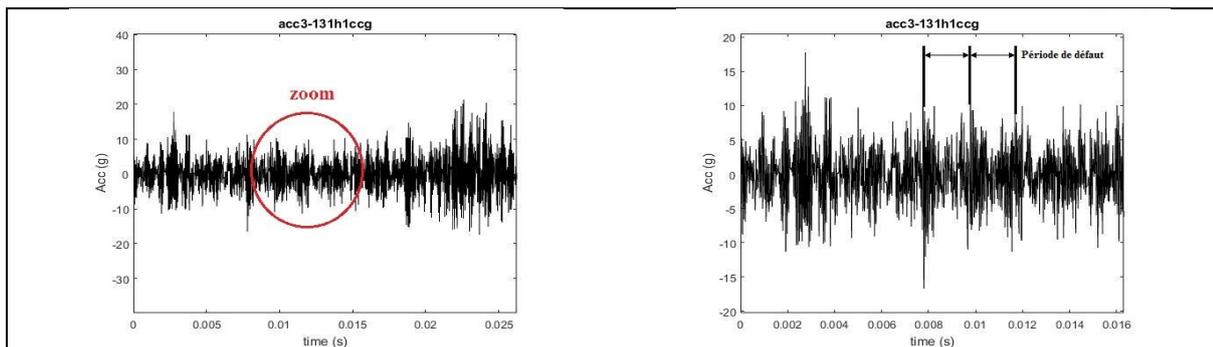


Figure 4.67: Signature de l'écaillage sur l'élément roulant Test 131 (2300tr/min, 60 N.m)

Dans le cas de l'écaillage de l'élément roulant de la Figure 4.67, qui produit une augmentation d'amplitude du signal d'accélération, les pics espacés à la période caractéristique du défaut ne sont visible que sur quelques portions du signal lorsqu'il est à proximité de l'accéléromètre car l'élément roulant n'est pas solidaire de l'arbre et il n'apparaît pas à chaque tour et par conséquent la modulation à la fréquence de rotation n'existe pas.

D'après l'examen du Kurtosis et du maximum d'accélération (en « g ») des signaux 111, 121, 131 et 211 « extrait respectivement des Annexe 9, Annexe 12, Annexe 15, Annexe 18 pour acc1; Annexe 27, Annexe 30, Annexe 33, Annexe 36 pour acc2 et Annexe 45, Annexe 48, Annexe 51, Annexe 54 pour acc3 », on remarque que le kurtosis indique le caractère impulsionnel de l'action du défaut par des valeurs supérieures à trois « valeurs en gras », le maximum d'accélération du

Tableau 4.36 et qui est représenté par la Figure 4.69 aussi indique des accélérations excessives lors de la présence d'un défaut par rapport au fonctionnement sain « valeurs en gras ».

K _u	111	211	121	131
acc1	2,8701	2,9076	2,8438	2,8565
acc2	2,6869	10,8173	3,4589	2,8331
acc3	2,8204	2,9571	6,6062	3,5437

Tableau 4.35: Kurtosis par défaut des Test 111-211-121-131

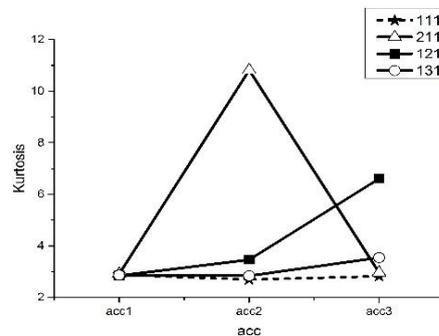


Figure 4.68: Kurtosis par acc des avaries choisies

a _{max}	111	211	121	131
acc1	6,8608	7,4041	9,3276	9,4388
acc2	10,0971	17,6337	16,0203	9,2625
acc3	7,6345	10,0797	39,6546	25,1992

Tableau 4.36: Accélérations maximales des Test 111-211-121-131

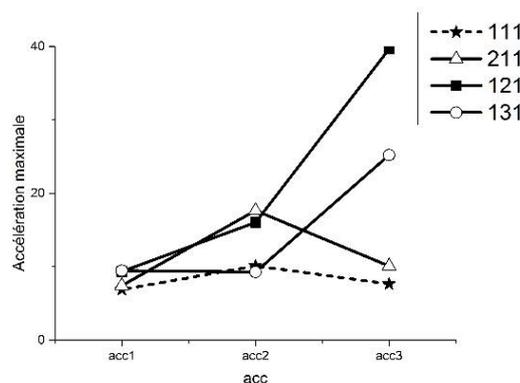


Figure 4.69: Accélérations maximales par acc des avaries choisies

4.5.3.3. Niveau vibratoire

Le Tableau 4.37 est calculé par la formule du paragraphe 1.3.6, et représenté par la Figure 4.70, indique aussi un niveau haut de 5 dB (global 15 dB) pour le roulement à bille et 12 dB (global 18 dB) pour le roulement à rouleaux révélateur d'une anomalie de fonctionnement.

L_a	211	121	131
acc1	0,6619503	2,0059528	0,1029374
acc2	4,8429358	-0,833456	-4,758848
acc3	2,4133401	11,896919	-3,938136

Tableau 4.37: Niveau vibratoire en dB des Test 211-121-131 par rapport à 111

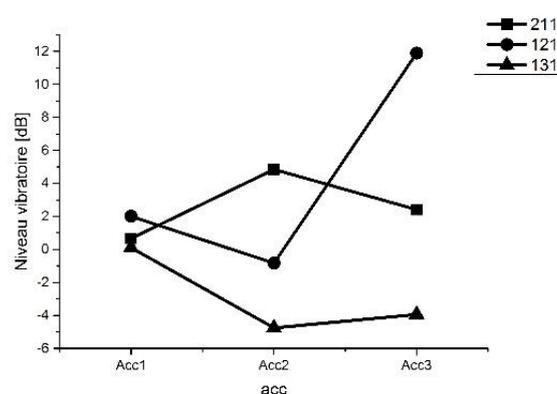


Figure 4.70: Niveau vibratoire par acc des avaries choisies

4.5.4. Evolution du maximum d'accélération

Les avaries éventuelles survenant sur un système de transmission de puissance produisent une augmentation d'amplitude des vibrations mesurées aux paliers. La Figure 4.71 présente l'évolution de la valeur maximale d'accélération en fonction de la vitesse de fonctionnement, du type et de l'importance du défaut. Pour un défaut isolé donné et une vitesse donnée, l'indicateur déterminé est la valeur maximale parmi les trois voies de mesure d'accélération. Ce sera le propos du paragraphe suivant.

L'étude de cet indicateur amène à différentes conclusions :

- L'intensité des accélérations augmente quasi linéairement avec la vitesse.
- Les engrenages n'ont pas d'effet significatif sur l'amplitude de l'accélération aux paliers (Figure 4.71.c.). Pour une vitesse donnée, l'état de l'engrenage n'entraîne pas de variation de la valeur maximale.
- L'intensité des accélérations augmente avec la gravité de l'écaillage de la bague intérieure (désigné par BI) (Figure 4.71.b.).
- Les accélérations produites par un écaillage de la bague intérieure sont supérieures à celles d'un écaillage d'élément roulant (Figure 4.71.a.), pour une importance similaire de l'écaillage.

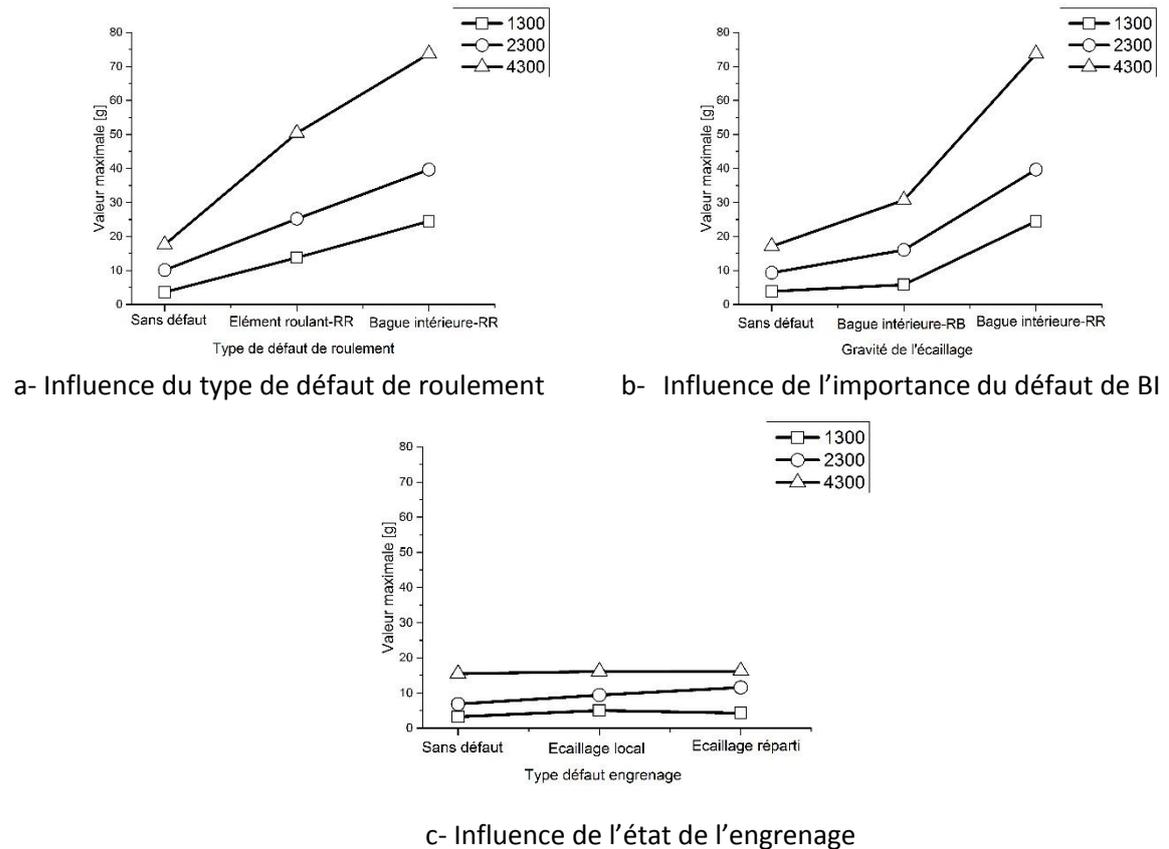


Figure 4.71: Evolution du maximum d'accélération en fonction de la vitesse et de la gravité du défaut.

4.5.5. Propagation de la signature des défauts dans le système

La disposition des accéléromètres sur le banc d'essai est rappelée sur la Figure 4.72 où Les accéléromètres sont placés respectivement : acc1/Voie 1 , acc2 /Voie 2 et acc3/Voie 3.

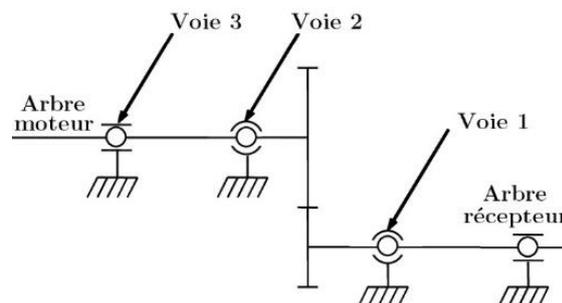


Figure 4.72: Disposition des capteurs piézoélectriques par voies

Les accélérations mesurées aux paliers sont accentuées en amplitude par la présence de défauts de roulements. Les accéléromètres sont principalement sensibles aux déplacements induits par une avarie dans le roulement du palier sur lequel il est placé. Ainsi, la mesure de la voie 1 (palier sans défaut de roulement) ne présente pas d'augmentation d'amplitude particulière hormis celle due à l'augmentation de vitesse (Figure 4.73.a).

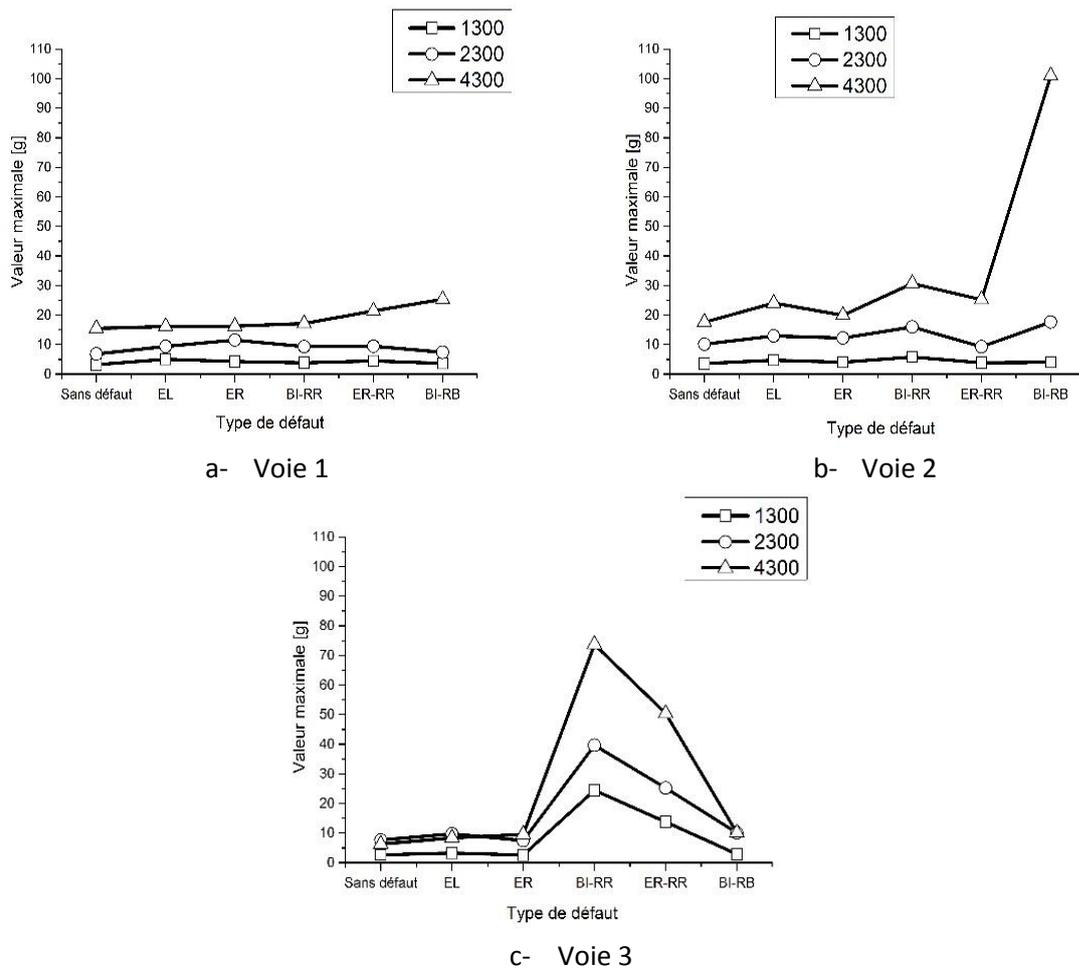


Figure 4.73: Evaluation du maximum de l'amplitude des vibrations sur les trois voies

La sensibilité des accélérations aux défauts augmente avec la vitesse (Figure 4.73.b) : voie 2, à 1300 tr/min, l'amplitude du signal est constante quel que soit le type de défaut (variation de 3.6g à 6g).

Pour les autres vitesses, l'apparition de l'écaillage de la bague intérieure du roulement à billes (palier 2) provoque une hausse de niveau (17.6g pour 2300tr/min et 101g pour 4300tr/min).

De plus, à 4300 tr/min, lorsque le palier voisin (palier 3) présente un défaut important (écaillage BI-RR 73.7g), les vibrations de la voie 2 augmentent (39.6g).

Pour des vitesses moyennes, les maxima enregistrés ne sont influencés que par l'état du roulement de la mesure.

Sur la voie 3 (Figure 4.73.c.), quel que soit la vitesse de fonctionnement, les accélérations sont amplifiées en présence d'un défaut sur l'élément roulant ou sur la bague intérieure.

L'effet de l'écaillage de l'élément roulant est moindre par rapport à celui sur la bague intérieure.

En résumé, en raisonnant sur l'amplitude du signal, la signature des défauts de roulements ne se propage pas à travers tout le système mécanique. Les défauts de roulements provoquent une augmentation de l'amplitude des accélérations dans le palier où ils sont logés.

En effet, dans le cas de défauts importants, leur effet peut se répercuter sur les paliers voisins, portés par le même arbre, à des vitesses suffisamment élevées (de l'ordre de 4000 tr/min). Les accélérations mesurées sur un autre arbre (en liaison engrenage avec l'arbre porteur de défaut de roulement) ne sont pas affectées par les avaries.

Ces résultats sont relatifs au dispositif expérimental, qui utilise une boîte de vitesse sans carter par rapport à une boîte de vitesse réelle, aussi, les roues de l'engrenage sont situées en extrémité d'arbre.

Dans une boîte de vitesse réelle, la disposition des engrenages et la compacité des organes ne favorise pas une propagation plus importante des vibrations issus des roulements. L'effet du carter constitue une liaison entre les différents paliers d'une boîte réelle, or les transmissions de puissance réelles sont plus rigides, donc les vibrations mesurées aux paliers peuvent avoir le même caractère que sur le dispositif expérimental.

4.6. Validation du test de Wald

4.6.1. Introduction

Pour valider le test de Wald, on va présenter une procédure et un plan de détection et de diagnostic des défauts dans les roulements, programmés sous Matlab, l'ensemble des programmes de traitement des données constitue un paquet nommé Matoule d'interface utilisateur illustré par la Figure 4.74 « le reste de l'interface est présenté par l'Annexe 81 » et la validation est argumenté par des signaux simulés et réels.

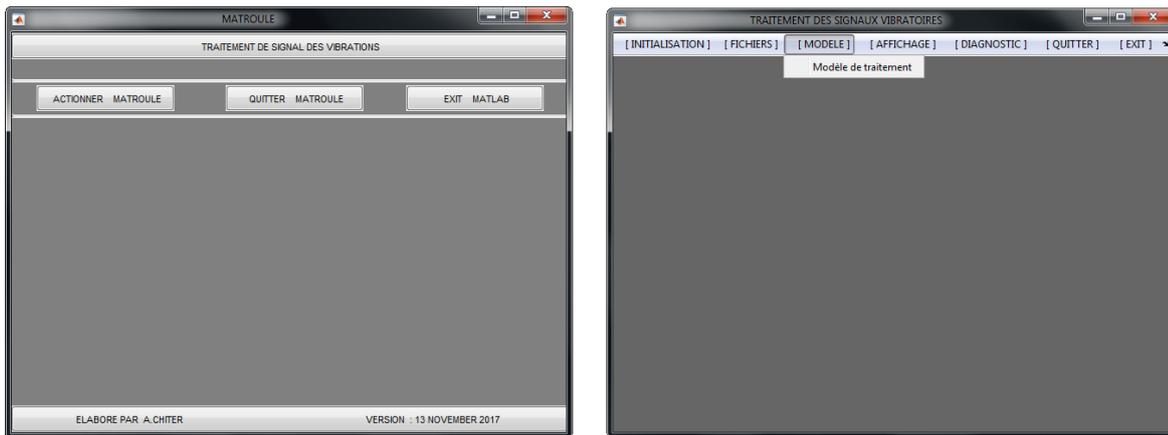


Figure 4.74: Interface paquet de programmes de traitement sous Matlab

4.6.2. Procédure de détection

La procédure de détection est divisée en plusieurs étapes, comme suit:

- 1- On prend la vibration discrète pour M échantillons, qui est plus grand que la quantité de la période caractéristique du défaut.
- 2 - Sélectionner une fenêtre de taille N pour le test.
- 3 - Estimer la variance σ_0^2 en utilisant l'équation 2.26.
- 4 – Avancer le choix pour α et β .
- 5 - Positionner la fenêtre au début de l'enregistrement de la vibration.
- 6 – Calculer $\Psi^{(N)}$ en utilisant l'équation 2.64.
- 7 - Définir les intervalles des trois régions, par les termes :

$$a = \ln \frac{\beta}{1-\alpha} \quad \text{et} \quad b = \ln \frac{1-\beta}{\alpha}$$

- 8 - Faire le test en utilisant l'équation 2.69.
- 9 - Générer un signal hypothétique, défini par:

$$h(i) = \begin{cases} 0 & \text{si } H_0 \text{ est vrai } (\Psi \leq a) \\ 1 & \text{si } H_1 \text{ est vrai } (\Psi \geq b) \end{cases}$$

Si $a \leq \Psi \leq b$ continuez à poursuivre les données, en ouvrant une autre fenêtre (ici, on ne prend pas de décision mais seulement augmente la taille de la fenêtre).

10 - Après la génération du signal hypothétique, si un défaut est présent, il y aura un vecteur de données composé de deux valeurs "0" et "1", si "1" apparaît périodiquement avec une période de la fréquence caractéristique du roulement et être considéré comme défectueux.

11 – Comparer la fréquence détectée avec les principales fréquences caractéristiques des paliers à roulement, il serait très facile de localiser le défaut afin de pouvoir établir le diagnostic en comparant le multiple de cette fréquence détecté avec celui des défauts les plus connus.

4.6.3. Plan du test

Sur la base de la procédure de détection décrite en 4.7.1, un plan de test peut être établi, ce qui est illustré par le diagramme de procédure présenté à la Figure 4.75. Pour que l'expérience soit valide, on choisit N comme une petite fraction de la période caractéristique du défaut, c'est-à-dire le cinquième. En examinant l'étape (10) dans la procédure de détection, pour montrer s'il y a une périodicité, on utilise l'autocorrélation du signal. Un pic dans la fonction d'autocorrélation révèle la périodicité du signal, et la valeur du temps de ce pic donnera la période du défaut T_d . Par conséquent, il peut déterminer la fréquence du défaut f_d , et en le comparant à la fréquence caractéristique, on peut établir le diagnostic.

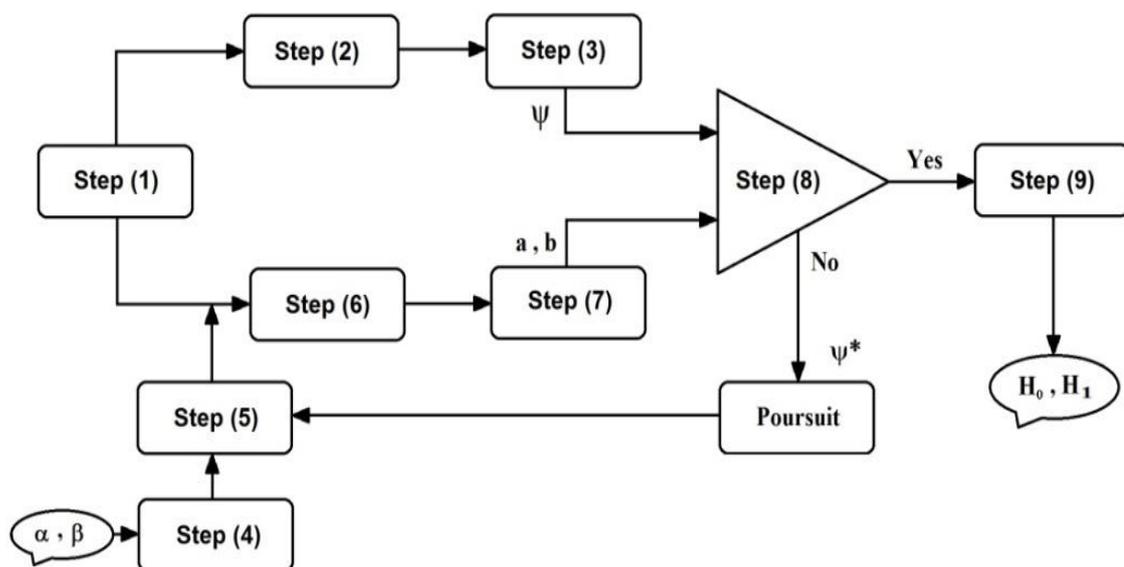


Figure 4.75: Plan du Test de Wald

4.6.4. Validation du modèle par des signaux simulés

4.6.4.1. Générations des signaux simulés

Pour simuler le défaut, un roulement de type NJ2204ECP a été utilisé, la vitesse de l'arbre $n=1500 \text{ rd/min}$, les fréquences caractéristiques sont déterminées par les relations du Tableau 1.5, où la fréquence de la cage est de 9.74Hz, la fréquence de la bague extérieure 87,68 Hz, la fréquence de la bague intérieure 137,32 Hz et la fréquence de l'élément roulant est de 118,85 Hz ; avec $f_r = 25\text{Hz}$, Z est le nombre de billes ou rouleaux. Pour NJ2204ECP: $Z=9$, $d=7,5 \text{ mm}$, $D=34 \text{ mm}$ et $\alpha=0^\circ$. Le signal de référence Figure 4.76 est pris comme une sinusoïde de fréquence 25 Hz, amplitude égale à l'unité et une phase nulle. Le signal de défaut simulé Figure 4.77 est considéré comme la somme d'une sinusoïde de fréquence 25Hz, d'amplitude égale à l'unité et une phase nulle, une sinusoïde de fréquence 87Hz d'amplitude 10 fois l'unité (représentant un défaut de fréquence 87Hz, ce qui correspond à la fréquence de la bague extérieure, on peut utiliser la fonction pulstran disponible sous Matlab et qui génère une série d'impulsions), et un bruit blanc gaussien centré avec variance égale à 1 et qui est généré par la fonction "randn" disponible sur Matlab avec un rapport de bruit de signal SNR = 20dB. Les seuils de significations sont fixés à: $\alpha= 0.05$ et $\beta= 0.002$ et l'échelle du temps est en milliseconde.

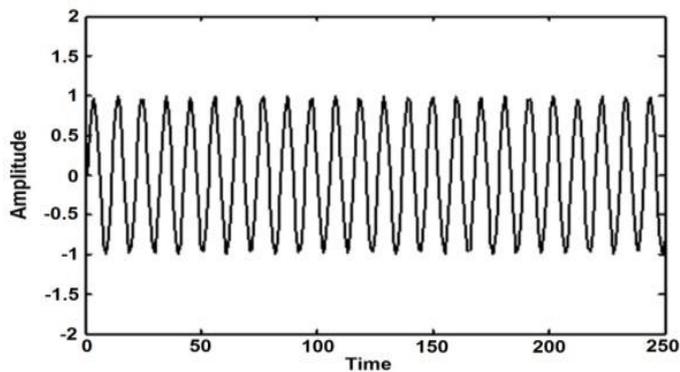


Figure 4.76: Signal référence simulé

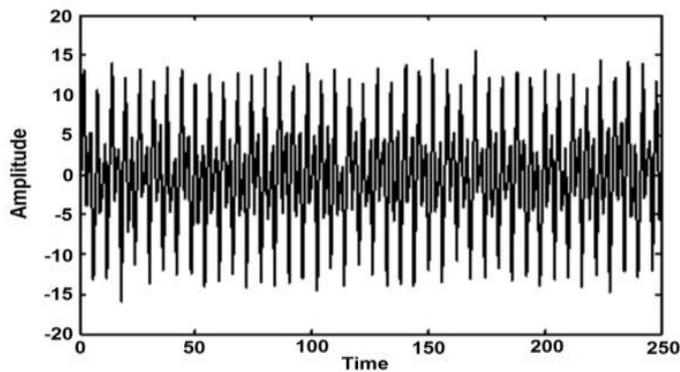


Figure 4.77: Signal défaut simulé

4.6.4.2. Interpretation

Pour interpréter, on peut dire que la périodicité du signal hypothétique (h-signal) est apparue dans l'autocorrélation du signal. La Figure 4.79 révèle l'existence du défaut, et pour déterminer la fréquence de ce dernier, on effectue une transformée de Fourier rapide (FFT) du signal, qui révèle visuellement la fréquence du défaut 87 Hz qui correspond en effet à la fréquence caractéristique de la bague extérieure de la Figure 4.80. En conséquence, on peut affirmer que le plan proposé pour la détection et le diagnostic du défaut dans le roulement a réussi à détecter le défaut et à faire le diagnostic de la pièce défectueuse. De plus, et lors d'un bon fonctionnement, le signal hypothétique sera à zéro "0", l'autocorrélation du signal h ne révélant aucune périodicité, et la FFT confirme l'absence de défaut.

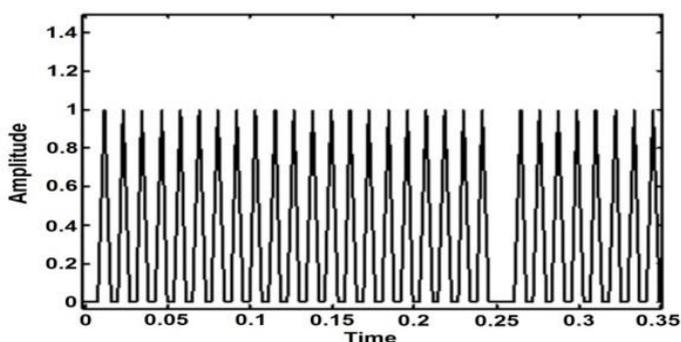


Figure 4.78: Signal hypothétique

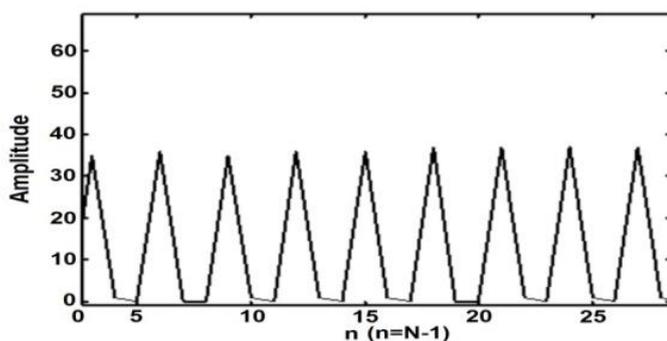


Figure 4.79: Autocorrélation du signal hypothétique

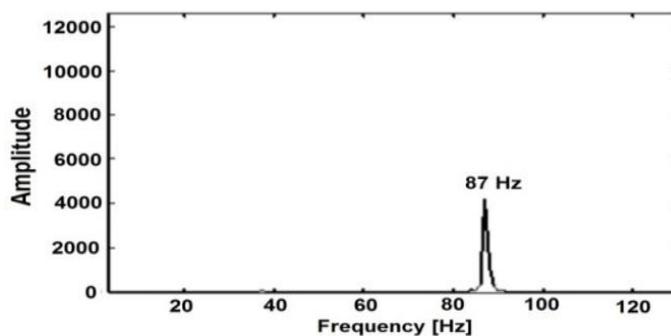


Figure 4.80: FFT du signal hypothétique

4.6.5. Validation du modèle par les signaux réels

Les paliers situés à proximité de la paire d'engrenages d'essai sont équipés de roulements à billes du type 6012, tandis que les paliers extérieurs sont des roulements à rouleaux du type NU1013. Les caractéristiques géométriques du roulement à billes et à rouleaux sont données dans le Tableau 4.38.

Caractéristiques géométriques	Roulement à billes	Roulement à rouleaux
Diamètre moyen au centre de la bille: D [mm]	77.7	80.55
Diamètre de la bille/rouleau: d [mm]	9	7
Nombre de billes/rouleaux: Z	14	21
Angle de contact: α	0	0

Tableau 4.38: Caractéristiques géométriques roulements à billes et à rouleaux

4.6.5.1. Nature de défaut

Le défaut est représenté par la figure dans le roulement, une entaille de 1,7 mm de profondeur de 0,088 mm est réalisée à l'aide d'une meule fine, comme illustré à la Figure 4.81. Le roulement à rouleaux est à bagues séparables démontable sans destruction "type NU" ou outillage spéciale.

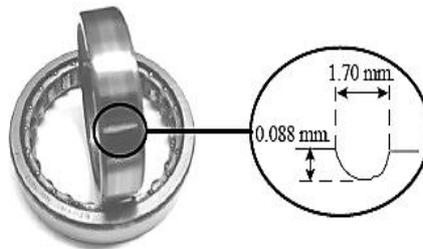


Figure 4.81 : Géométrie du défaut dans la bague intérieure du roulement

4.6.5.2. Conditions de fonctionnement

La charge appliquée est égale à 12 daN.m et une vitesse de 4300 tr / min.

Les fréquences caractéristiques du roulement à billes et à rouleaux sont calculées par les formules géométriques données par Tableau 4.39.

Type	F_r [Hz]	F_{cage} [Hz]	F_{be} [Hz]	F_{bi} [Hz]	F_{er} [Hz]
6012	71.67	31.68	443.56	559.77	627.02
NU1013	71.67	32.72	687.11	817.89	830.91

Tableau 4.39: Fréquences caractéristiques des roulements à billes et à rouleaux

F_r : Fréquence de rotation; F_{cage} : Fréquence de la cage; F_{be} : Fréquence de la bague extérieure;

F_{bi} : Fréquence de la bague intérieure; F_{er} : Fréquence de l'élément roulant: bille/Rouleau.

4.6.5.3. Signaux réelles:

Le signal de référence du roulement et le signal avec défaut acquis sont illustrés par la Figure 4.82 et la Figure 4.83.

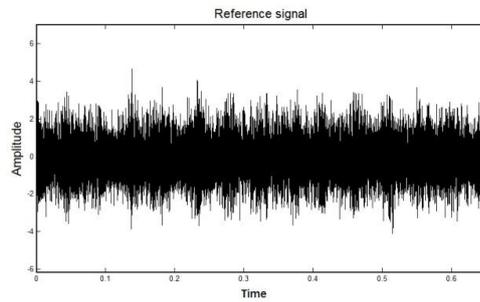


Figure 4.82: Signal de référence réel

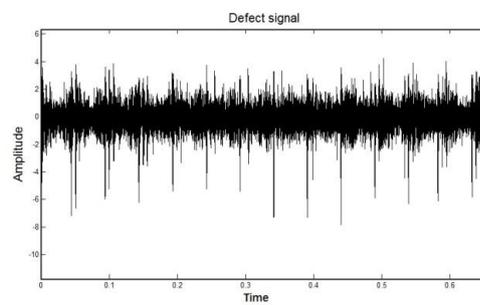


Figure 4.83: Signal réel avec défaut

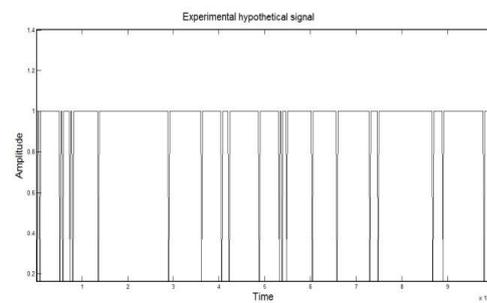


Figure 4.84: Signal hypothétique réel

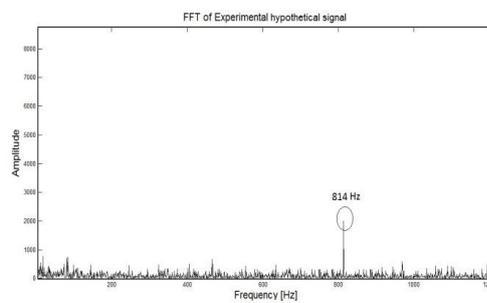


Figure 4.85: FFT du signal hypothétique réel

4.6.5.4. Interpretation

Le plan de détection et de diagnostic appliqué aux signaux réels illustrés à la Figure 4.82 et à la Figure 4.83 a permis de détecter la fréquence de défaut appliquée à la bague intérieure du roulement représentée par la Figure 4.84 et qui indique la présence d'un état "1" du signal hypothétique et la Figure 4.85 montre une fréquence de 814 Hz très proche de la fréquence de défaut qui est égale à 817,89 Hz, et le plan a également bien réagi pour établir un diagnostic correct.

4.6.5.5. Plan du diagnostic

Pour établir un bon diagnostic de défauts, il faut connaître un nombre important de défauts. Ainsi en comparant la fréquence détectée par le test de Wald avec les fréquences caractéristiques on peut localiser le défaut et en comparant toujours la fréquence de défaut détectée avec les défauts caractéristiques des roulements, on peut établir le diagnostic en utilisant la fréquence de modulation présentée dans le travail de Barkov [92]. Pour cela, le plan proposé par la Figure 4.75 permet d'établir le diagnostic de la partie défectueuse du roulement et de sa nature.

4.6.6. Conclusion

Le plan de détection et de diagnostic basé sur le test de Wald a été décrit, ce plan pourrait être appliqué aux mesures des signaux de vibration des roulements avec et sans défauts sous différentes charges et vitesses. L'efficacité du plan de détection suggéré, est illustrée par la Figure 4.78, la Figure 4.79 et la Figure 4.80 pour le signal simulé et par la Figure 4.84 et la Figure 4.85 pour le signal réel. Le plan proposé fonctionne très bien avec des signaux vibratoires à bande large. Enfin, le plan est très prometteur pour les applications de détection et de diagnostic automatiques.

4.7. Validation expérimental de FastICA

4.7.1. Introduction

FastICA, comme défini précédemment dans la paragraphe 3.16, est un algorithme à point fixe destiné à calculer l'extremum de la fonction kurtosis d'une densité de probabilité et comme le kurtosis est une fonction de contraste pour l'analyse en composantes indépendantes et lorsqu'il est minimisé au maximisé localement après certaines itérations par la combinaison linéaire $W^T \cdot x$ des signaux x qui sera égale au signé près à une des composantes indépendantes.

L'algorithme FastICA est basé sur cette propriété pour calculer les composantes indépendantes et ainsi obtenir la séparation des signaux sources. Cet algorithme utilisé deux approches pour le traitement des signaux soit par un :

- Approche par déflation : dans ce cas où on traite les signaux l'un après l'autre.
- Approche par symétrie : dans ce cas on traite tous les signaux au même temps

Les travaux de recherches dans ce sens [130, 137], ont montrés que les deux approches aboutis pratiquement aux mêmes résultats malgré la légère tendance vers l'approche symétrique et c'est pour cette raison qu'on va traiter les signaux de roulements par ce dernier approche qui est par : symétrie.

4.7.2. Choix de non linéarité :

L'algorithme permet de choisir trois type de non-linéarité qu'on peut injecter :

- pow3 (défaut) $g(u)=u^3$
- tanh $g(u)=\tanh(a_1 \cdot u)$
- gaus $g(u)=u \cdot \exp(-a_2 \cdot u^2/2)$

Pour la validation, on a choisis [131]:

La non-linéarité gaussienne "gaus" , avec $a_2 = 1$.

4.7.3. Critère d'adaptation des signaux :

Les paramètres indiqués ci-dessous sont utilisés pour un choix cohérent.

- Le critère d'interruption ou d'arrêt est fixé à : 0.0001
- Le nombre d'itération maximale est égal à : 1000
- Le nombre d'échantillons pour la matrice mélange est fixé à : 5000, ce nombre correspond à 0.1 seconde soit le un sixième du temps d'acquisition (0.6 s).

4.7.4. Signaux des mélanges et leurs codifications

Les signaux du Tableau 4.40, utilisés pour la validation, sont des signaux réels du laboratoire LaMCoS. Dans cette perspective, on a choisi pour préparer les matrices mélanges quinze signaux répartis en cinq groupe dont chacun contient trois signaux, ces signaux représentent dans l'ensemble l'état de fonctionnement sain, avec défaut, défaut isolé ou combiné sous une charge de 120 Nm et une vitesse de 4300 tr/min ce qui leurs donne la codification « ceg » du paragraphe 4.3.5.1.

Désignation	111h1ceg	131h1ceg	211h1ceg	133h1ceg	233h1ceg
Mélange	M1	M2	M3	M4	M5
Signal	S1	S2	S3	S4	S5
E	-	-	-	-	x
RB	-	-	x	x	x
RR	-	x	-	x	x

Tableau 4.40: Signaux constituant les mélanges

- **E**: engrenage, rapport de transmission : 38/36 avec un module $m=2$.
- **RB**: roulement à billes de type SKF-6012, 14 billes de diamètre 10 [mm].
- **RR**: roulement à rouleaux de type SKF-Nu1013, 21 éléments de diamètre 8 [mm].

Les signaux des mélanges sont formés comme suit avec la codification supplémentaire de : SD signifie signal sans défaut et AD signifie signal avec défaut:

- M1: S1-E-SD, S1-RB-SD et S1-RR-SD
- M2: S2-E-SD, S2-RB-SD et S2-RR-AD
- M3: S3-E-SD, S3-RB-AD et S3-RR-SD
- M4: S4-E-SD, S4-RB-AD et S4-RR-AD
- M5: S5-E-AD, S5-RB-AD et S5-RR-AD

Tous les signaux ont été tronqués à 5000 échantillons « paragraphe 4.7.3 », donc chaque matrice mélange « matrice mélange : M1, M2, M3, M4 et M5 » est de dimension : (3,5000).

4.7.5. Procédure de séparation

4.7.6. Représentation temporelle des matrices mélanges

4.7.6.1. Représentation des signaux de bases

Les signaux de départ avant la troncature, et qui seront la base de construction des signaux pour la matrice mélanges M1-M5 sont représentés par les Figure 4.86, Figure 4.87, Figure 4.88, Figure 4.89 et Figure 4.90.

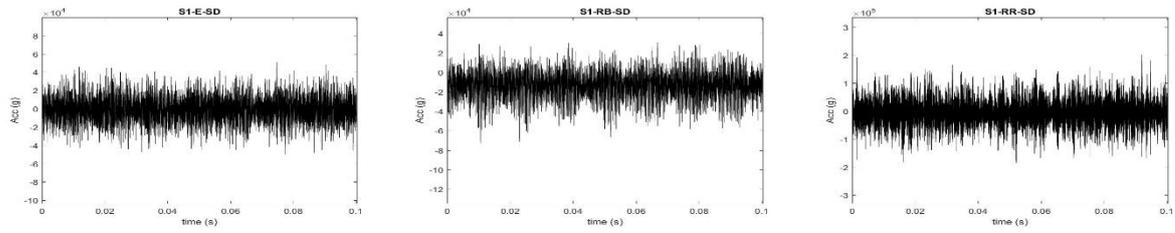


Figure 4.86: Signaux de bases pour le mélange M1 avant troncature

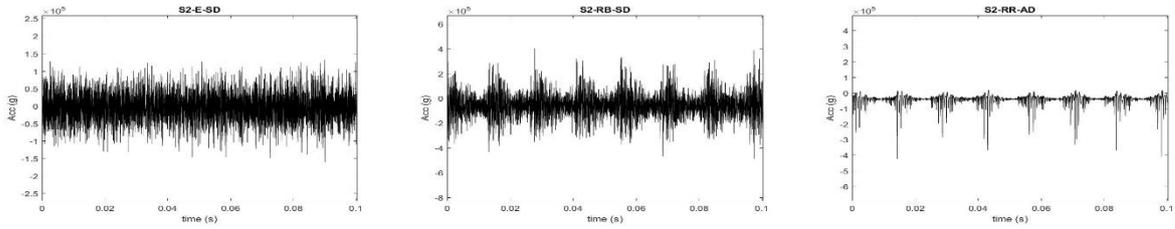


Figure 4.87: Signaux de bases pour le mélange M2 avant troncature

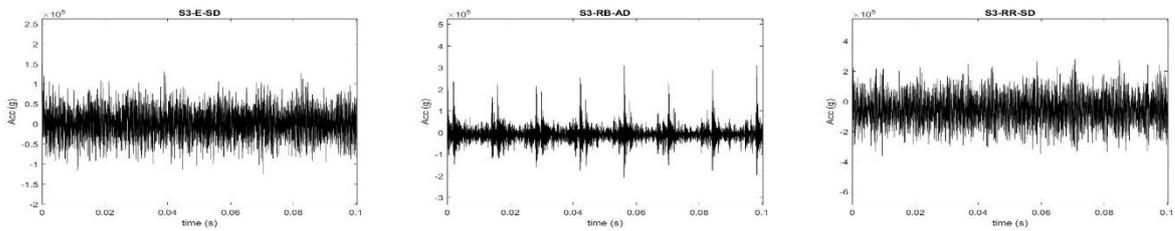


Figure 4.88: Signaux de bases pour le mélange M3 avant troncature

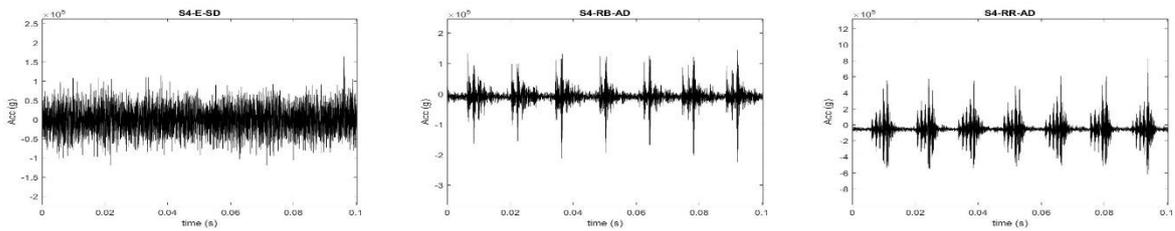


Figure 4.89: Signaux de bases pour le mélange M4 avant troncature

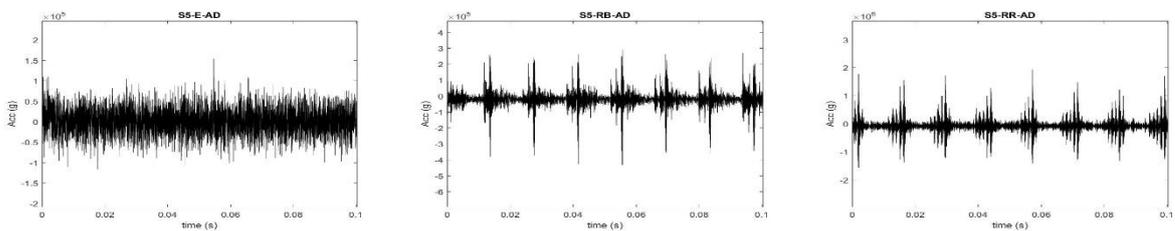


Figure 4.90: Signaux de bases pour le mélange M5 avant troncature

4.7.6.2. Représentation temporelle des signaux mixés

Les signaux mixés des groupes de mélange M1-M5, sont représentés par les Figure 4.91, Figure 4.92, Figure 4.93, Figure 4.94 et Figure 4.95, l'ordre de ces signaux est : E-RB-RR.

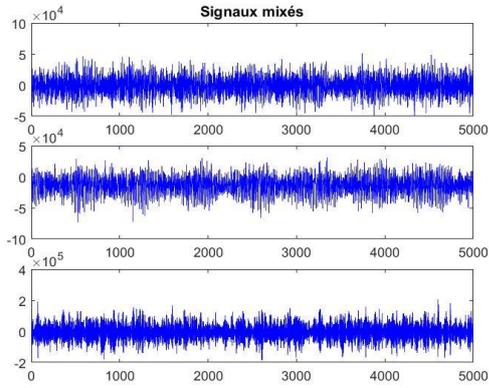


Figure 4.91: Signaux mixés du mélange M1

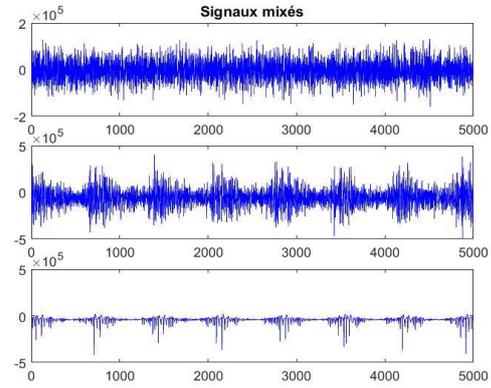


Figure 4.92: Signaux mixés du mélange M2

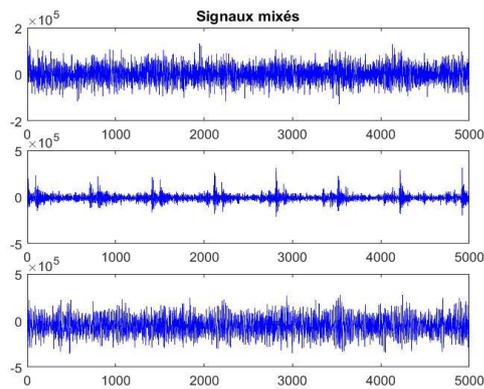


Figure 4.93: Signaux mixés du mélange M3

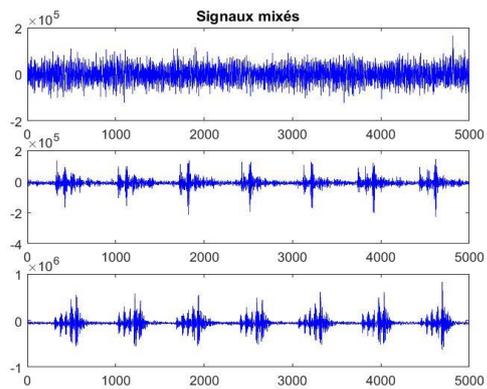


Figure 4.94: Signaux mixés du mélange M4

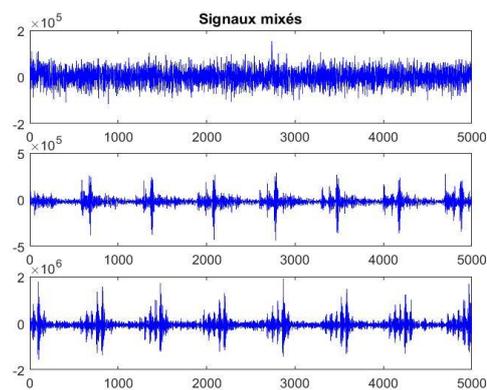


Figure 4.95: Signaux mixés du mélange M5

4.7.6.3. Représentation des signaux blanchis

Les signaux blanchis du mélange M1-M5, sont représentés par les Figure 4.96, Figure 4.97, Figure 4.98, Figure 4.99 et Figure 4.100 , l'ordre de ces signaux est aléatoire.

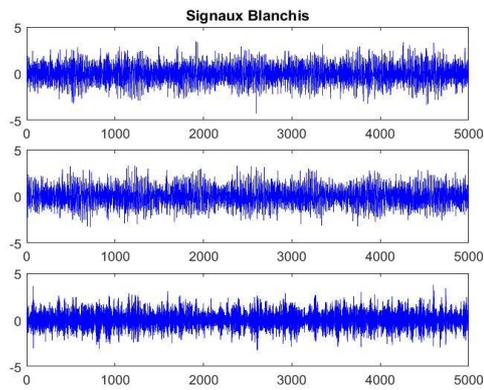


Figure 4.96: Signaux blanchis du mélange M1

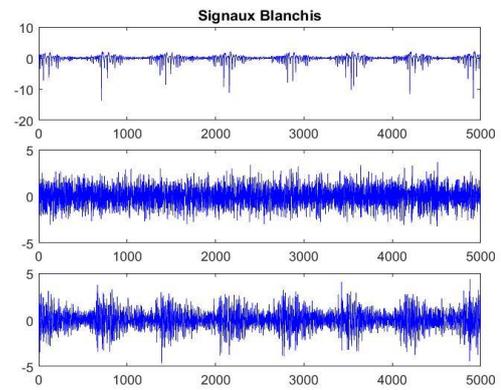


Figure 4.97: Signaux blanchis du mélange M2

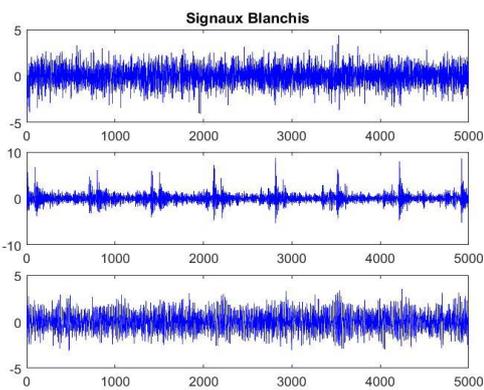


Figure 4.98: Signaux blanchis du mélange M3

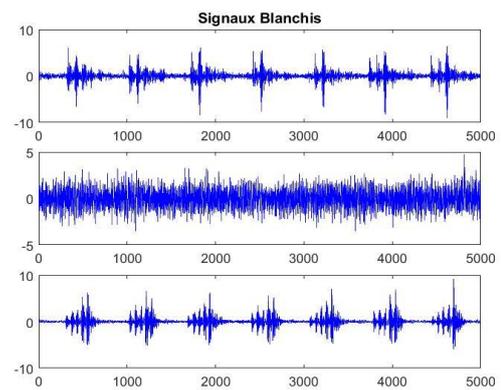


Figure 4.99: Signaux blanchis du mélange M4

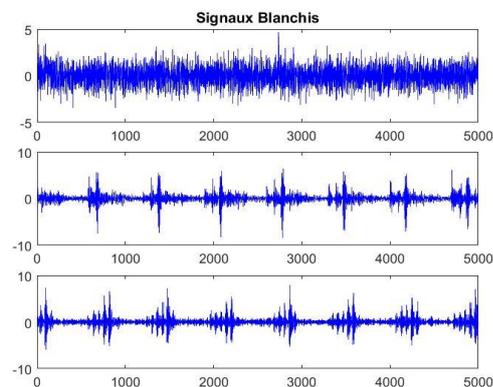


Figure 4.100: Signaux blanchis du mélange M5

4.7.6.4. Signaux séparés

Les signaux qui sont obtenus par l'algorithme FastICA, sont représentés par les Figure 4.101, Figure 4.102, Figure 4.103, Figure 4.104 et Figure 4.105, les signaux sont organisés par groupe de mélange M1-M5, les signaux de sorties sont dans un ordre aléatoire.

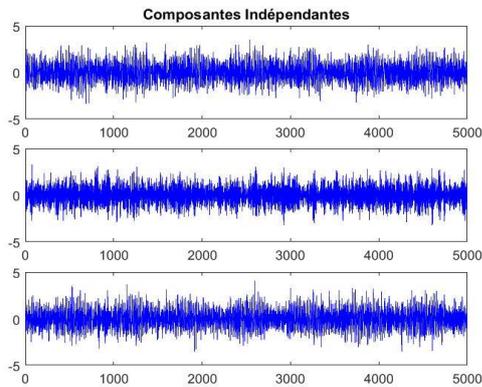


Figure 4.101: Signaux séparés du mélange M1

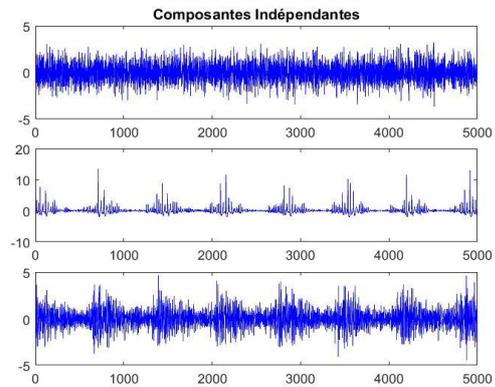


Figure 4.102: Signaux séparés du mélange M2

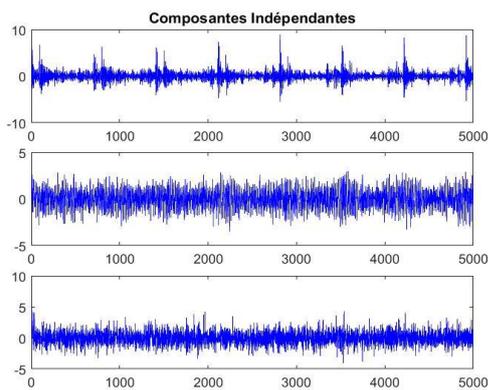


Figure 4.103: Signaux séparés du mélange M3

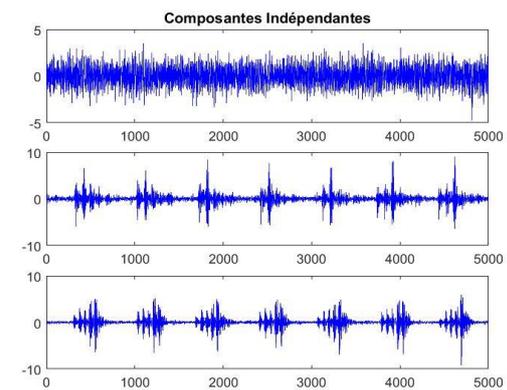


Figure 4.104: Signaux séparés du mélange M4

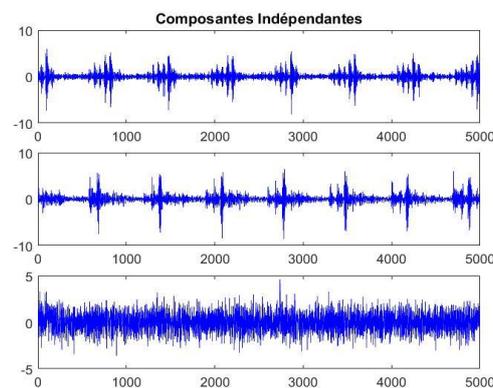


Figure 4.105: Signaux séparés du mélange M5

4.7.6.5. Interprétation des résultats

La comparaison des signaux des Figure 4.101, Figure 4.102, Figure 4.103, Figure 4.104 et Figure 4.105 avec les signaux mixés des Figure 4.91, Figure 4.92, Figure 4.93, Figure 4.94 et Figure 4.95 permet de dire que l'algorithme FastICA a réussi de restituer les signaux d'une manière presque intégrale.

L'estimation fondée sur le Kurtosis avec une non linéarité gaussienne est la mieux adapté car elle permet la restitution avec un nombre minimal d'itération « compté pendant l'exécution » qui ne dépasse pas les 60 itérations.

Tous les signaux des matrices mélanges ont été tronqués pour favoriser la rapidité de l'estimation des composantes indépendantes et aussi pour une exécution qui ne provoque pas le freeze de l'algorithme suite au nombre important d'itérations.

Le nombre total d'échantillons de départ été 29981, donc la matrice mélange est de dimension (3,29981), une telle matrice, ne fait qu'augmenter le temps d'exécution et n'apporte aucune information supplémentaire sur l'état de fonctionnement ou encore de détection ou de diagnostic et compte tenu de la fameuse règle des vibrations mécaniques et qui stipule: que dans les systèmes mécaniques amortis, l'amortissement limite le mouvement à la fréquence amortie et qui sera approximée par la fréquence de résonance et l'amortissement peut être quantifié au maximum par trois pics positifs successifs d'une réponse vibratoire [102], ce qui correspond à trois périodes, donc la réduction du nombre d'échantillons à 1/6 (un sixième (29981)= 5000) est mécaniquement acceptable donc l'adoption d'une dimension (3,5000) des matrices mélanges est légitimes.

4.7.6.6. Indicateurs scalaires de surveillances des signaux mélanges et séparés

Les indicateurs scalaires Ku, Sk et RMS des différents signaux sources de Tableau 4.41 et des signaux séparés (IC) du Tableau 4.42 sont représentés respectivement par les Figure 4.106 et Figure 4.107.

L'examen des valeurs du Tableau 4.41 confirme l'efficacité du Kurtosis qui indique exactement là où il y'a un défaut excepté pour l'engrenage qui ne modifie pas de façon significative le profil temporelle des signaux sains ou avec défauts et la variation montrée par la Figure 4.106 confirme l'analyse des valeurs, le Skewness est régulier et confirme son efficacité, là où il y'a un défaut, il y'aura une asymétrie soit droite ou gauche et le RMS est instable.

Les valeurs du Tableau 4.42, qui expriment les indicateurs des signaux séparés et représentées par Figure 4.107. L'examen de ces valeurs et courbes confirme l'efficacité du Kurtosis pour la détection des défauts, le Skewness n'est efficace que pour les défauts sévères qui provoque des modulations importantes, c'est-à-dire là où il y'a un fort Kurtosis et il montre une symétrie quasi parfaite pour les autres cas, alors le RMS échoue complètement et il est normalisé à un.

MM	Ku	Sk	RMS
M1	2,9522	-0,0144	1,4825
	3,0805	-0,2404	1,4369
	2,8176	0,0478	5,5682
M2	2,943	-0,0172	4,2794
	4,0492	0,0712	9,9582
	43,4363	-4,6416	2,8469
M3	3,1628	0,0653	3,4803
	11,498	0,9375	3,6417
	2,8843	0,0581	9,5789
M4	3,0141	0,03	3,4257
	16,4459	-0,3552	2,3894
	13,9829	0,2946	9,6276
M5	3,0059	0,034	3,2828
	14,8816	-0,3794	4,8641
	12,0748	0,4015	25,032

IC	Ku	Sk	RMS
M1	2.8931	0.1000	1.0001
	2.8001	-0.0331	1.0001
	3.1712	0.0848	1.0001
M2	2.9478	-0.0143	1.0001
	42.9129	4.6195	1.0001
	4.1207	0.0705	1.0001
M3	11.5281	0.9330	1.0001
	2.7600	-0.0523	1.0001
	3.7863	0.2112	1.0001
M4	3.0127	-0.0316	1.0001
	16.5244	0.3587	1.0001
	13.9063	-0.2852	1.0001
M5	12.0772	-0.3989	1.0001
	14.9249	-0.3789	1.0001
	3.0038	0.0333	1.0001

Tableau 4.41: Indicateurs des signaux mélanges

Tableau 4.42: Indicateurs des signaux séparés

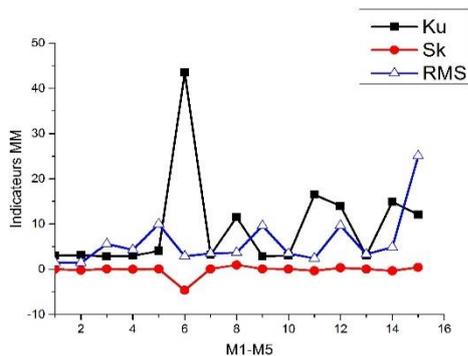


Figure 4.106: Indicateurs des signaux sources

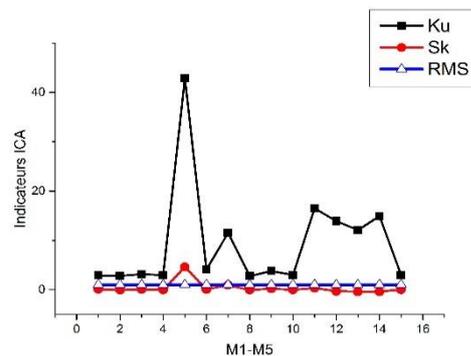


Figure 4.107: Indicateurs des signaux séparés

L'inefficacité du RMS et la régularité du Skewness est évidente car elle est provoquée par la standardisation « blanchiment des données ». Donc pour les signaux séparés on peut affirmer que seul le Kurtosis et le Skewness qui peuvent être utilisés comme des outils de détection.

Pour mieux cerner le Kurtosis des signaux sources et séparés, on va donner les valeurs du Kurtosis des signaux dans l'ordre initial par le Tableau 4.43 et représentées par Figure 4.108, dans le Tableau 4.44, les données du Kurtosis des signaux séparés ont été ordonnées selon l'ordre des signaux sources, ces données sont représentés Figure 4.109, on remarque une restitution quasi parfaite.

Position Initiale	Ku-MM	Ku-IC
M1	2,9522	2.8931
	3,0805	2.8001
	2,8176	3.1712
M2	2,943	2.9478
	4,0492	42.9129
	43,4363	4.1207
M3	3,1628	11.5281
	11,498	2.7600
	2,8843	3.7863
M4	3,0141	3.0127
	16,4459	16.5244
	13,9829	13.9063
M5	3,0059	12.0772
	14,8816	14.9249
	12,0748	3.0038

Tableau 4.43: Position initiales de MM

Position-Modifiée	Ku-MM	Ku-IC
M1	2,9522	2.8931
	3,0805	3.1712
	2,8176	2.8001
M2	2,943	2.9478
	4,0492	4.1207
	43,4363	42.9129
M3	3,1628	3.7863
	11,498	11.5281
	2,8843	2.7600
M4	3,0141	3.0127
	16,4459	16.5244
	13,9829	13.9063
M5	3,0059	3.0038
	14,8816	14.9249
	12,0748	12.0772

Tableau 4.44: Position initiales de IC

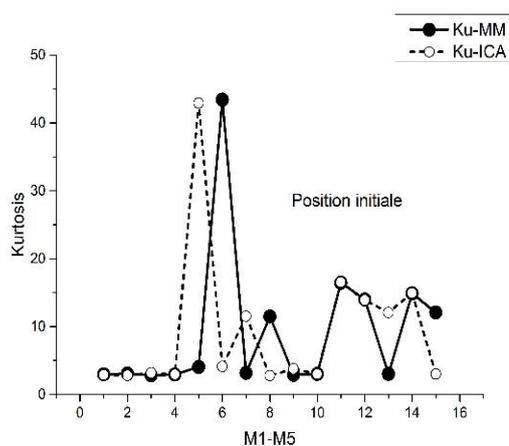


Figure 4.108: Kurtosis non ordonné des signaux sources et mélangés

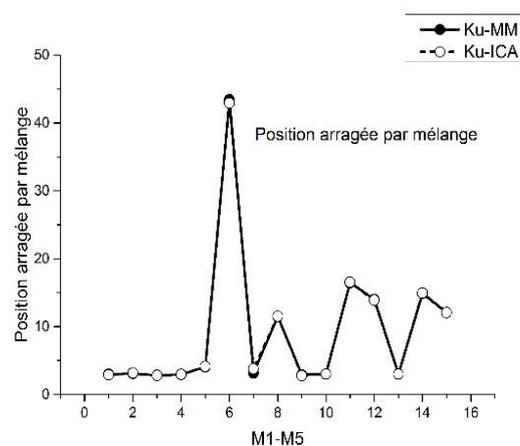


Figure 4.109 : Kurtosis ordonnés des signaux sources et séparés

4.7.6.7. Conclusion

La validation expérimentale de l'algorithme FastICA a permis de montrer son efficacité inédite pour séparer les signaux mixés, de ce fait, on peut donc minimiser le nombre de capteur « accéléromètres » utilisés pour l'acquisition des signaux et par conséquent on peut toujours utiliser la mesure en mode globale avec l'utilisation de la séparation aveugle basée sur l'analyse des composantes indépendantes, pour l'analyse des vibrations mécaniques.

4.8. Conclusion

Cette étude expérimentale a permis :

- D'affirmer l'influence des conditions de fonctionnement charges et vitesses variables sur le comportement vibratoire des roulements et des engrenages.
- D'observer de manière globale le comportement des signaux mesurés (accélérations aux paliers) en présence de défauts isolés d'engrenage et de roulement.
- De vérifier l'effet des défauts de roulements qui est nettement plus observable sur les signaux d'accélérations que d'autres mesures.
- De valider expérimentalement le test Wald pour la détection des défauts et qui peut être utilisé comme une fonction de contraste pour la séparation des signaux des roulements et engrenages.
- De confirmer l'efficacité de l'algorithme FastICA pour la séparation des signaux sources.
- En plus de la mesure en mode spécifique, on peut toujours utiliser la mesure en mode globale accompagnée impérativement par la séparation aveugle de sources.

5. Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal du présent travail est de définir les conditions de fonctionnement qui peuvent endommager ou encore accroître les défauts mécaniques de fonctionnement tel que l'écaillage, l'usure etc..., des organes mécaniques de transmission de mouvement à savoir les engrenages et plus particulièrement les roulements dans une machine dont la conception, la fabrication et le montage sont parfaitement respectés en recueillant des signaux expérimentaux qui reflètent l'état réel.

L'ensemble des mesures sont des accélérations au niveau des paliers à roulements et engrenages, c'est-à-dire que les mesures ont été réalisées en mode spécifique.

L'examen de l'influence des différents défauts des roulements et engrenages à partir d'un traitement de signal adapté : maximum du niveau vibratoire, spectre de fréquence, l'autocorrélation, l'enveloppe, la démodulation etc..., a permis de donner une vision claire sur l'utilisation des indicateurs scalaires de surveillance : Kurtosis, Skewness, le facteur de crête et le RMS en cas des défauts isolés ou combinés. Cet examen permet aussi la connaissance de l'influence de propagation des modes impulsionnels excités par les défauts à travers une structure mécanique et ainsi que la vérification de l'effet de masque sous différents régimes de fonctionnement, vitesses et charges variables afin d'établir un diagnostic acceptable et rentable en se basant sur des connaissances préalables confirmées par des firmes mondiales spécialisées.

Il était fondamental, donc, d'automatiser le suivi de comportement des organes mécaniques par des méthodes qui remplissent à la fois la tâche de la détection et de diagnostic automatique et aussi de prendre en considération l'aspect économique qui requiers la réduction du temps d'acquisition des données « la surveillance » et par conséquent la réduction du nombre de mesures « taille d'échantillons » et aussi le nombre de capteurs ; ce qui encourage l'utilisation de la surveillance avec les mesures en mode global. Pour cela, le test de Wald basé sur l'analyse séquentielle est repris avec la séparation aveugle de sources basée l'analyse en composantes indépendantes en utilisant l'algorithme FastICA, afin de proposer une nouvelle méthode qui permettra l'optimisation et l'automatisation de la démarche de diagnostic.

Pour plus de précision:

Les différentes expérimentations ont été menées à partir des essais réalisés sur deux différents bancs, le premier celui de EDF de Chatou, implanté au laboratoire GIPSA-lab, Grenoble Images Parole Signal Automatique laboratoire, INP-Grenoble, le second est celui de EUROCOPTER implanté au Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures LaMCoS, INSA Lyon.

Pour le premier banc, Une boîte d'engrenages multiplicatrice (57/15) et quatre roulements, fonctionnant sous des charges et vitesses variables avec des accélérations et des freinages brusques, les données recueillies sont:

- Six accélérations « entrée-sortie avec fixation verticale et horizontale ».
- Couples.
- Vitesses d'entrée et de sortie.
- Quatre encodeurs optiques : Deux pour « Tops tours » et deux Entrée-Sortie « E/S » arbres.
- Courants et tensions d'alimentation sur les trois phases.
- Température « sonde de température ».

Les accéléromètres ont été disposés sur les deux roulements pour permettre la mesure des vibrations radiales « fixation verticale » et axiales « fixation horizontale » ; ces mesures ont été recueillies sur vingt « 20 » voies sous des différentes vitesses et couples résistants.

Pour le second banc, un réducteur à simple étage, fonctionnant sous des conditions de fonctionnement sévères. Les défauts d'usure ont été réalisés sur deux types de roulements et sur l'engrenage à denture hélicoïdale et droite.

Les mesures ont été captées par :

- Trois accéléromètres pour les vibrations,
- Deux codeurs optiques pour l'erreur de transmission.

Les accéléromètres ont été disposés sur les deux roulements où les défauts ont été introduits, et sur un roulement sain. Les mesures ont été recueillies pour trois vitesses 1300, 2300 et 4300 tr/min et deux couples résistants 6 et 12 daN.m, avec deux répétitions.

Les signaux recueillis ont été examinés avec différentes méthodes d'analyse dans le domaine temporel et spectral.

La mesure vibratoire basée sur les accélérations sous l'action des défauts et en fonctionnement sain, permet de donner une information assez complète sur le comportement de la structure, ce qui est traduit par la possibilité d'examen de l'influence des défauts isolés et combinés, d'engrenages et de roulements sur le comportement global des signaux mesurés en bruts.

Et en conclusion, on peut dire que :

- Les défauts de roulements provoquent une augmentation de l'amplitude des vibrations et aussi, sur un palier voisin de même arbre lorsque le défaut est sévère.
- Pour un engrenage défectueux, il a été constaté qu'un faible niveau vibratoire est observé sur les roulements mais plus uniforme et affecte tous les paliers.
- D'autre part, il a été remarqué, que le suivi d'un roulement nécessite un accéléromètre par palier à surveiller.

- Les roulements surveillés, près des engrenages, peuvent permettre le suivi des roues dentées, mais seulement lorsque les paliers sont sains.

Parallèlement, on a recueilli différentes signatures utilisées pour la validation expérimentale de la nouvelle méthode de Wald proposée pour la détection et le diagnostic et aussi la validation de l'algorithme FastICA afin de séparer les signaux sous différents modes de fonctionnement et aussi la validation de la possibilité d'utiliser les indicateurs scalaires de suivi comme une fonction de contraste.

Dans la perspective de poursuivre les travaux dans cette direction, il serait également nécessaire d'étudier d'autres méthodes d'optimisation du Kurtosis basée sur la recherche des extrémums tel que la méthode de Gauss-Jordan modifiée avec l'utilisation des différentes normes, la méthode de Newton etc.... Aussi il est intéressant de revoir la possibilité de réduire encore la taille de l'échantillon pour le test de Wald et aussi d'étudier l'effet de troncature du test en se basant sur le fait qu'un défaut provoquant la modulation soit détectable sur trois cycles de vibrations avec n'importe quel type d'amortissements.

6. Bibliographie

1. Edwards, D.J., G.D. Holt, and F.C. Harris, *Predictive maintenance techniques and their relevance to construction plant*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 1998. **4**(1): p. 25-37.
2. Tandon, N. and A. Choudhury, *A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings*. Tribology International, 1999. **32**(8): p. 469-480.
3. Jayaswal, P., A.K. Wadhvani, and K.B. Mulchandani, *Machine Fault Signature Analysis*. International Journal of Rotating Machinery, 2008. **2008**: p. 10.
4. El-Thalji, I. and E. Jantunen, *A summary of fault modelling and predictive health monitoring of rolling element bearings*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015. **60-61**(Supplement C): p. 252-272.
5. Mann, L., A. Saxena, and G.M. Knapp, *Statistical-based or condition-based preventive maintenance?* Journal of Quality in Maintenance Engineering, 1995. **1**(1): p. 46-59.
6. Renwick, J.T. and P.E. Babson, *Vibration analysis - A Proven technique as a predictive maintenance tool*. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985. **IA-21**(2): p. 324-332.
7. Dron, J.P., F. Bolaers, and I. Rasolofondraibe, *Improvement of the sensitivity of the scalar indicators (crest factor, kurtosis) using a de-noising method by spectral subtraction: application to the detection of defects in ball bearings*. Journal of Sound and Vibration, 2004. **270**(1): p. 61-73.
8. Pachaud, C., R. Salvetat, and C. Fray, *Crest Factor and Kurtosis contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces*. Mechanical Systems and Signal Processing, 1997. **11**(6): p. 903-916.
9. Al-Bugharbee, H. and I. Trendafilova, *A fault diagnosis methodology for rolling element bearings based on advanced signal pretreatment and autoregressive modelling*. Journal of Sound and Vibration, 2016. **369**(Supplement C): p. 246-265.
10. Sheen, Y.T., *A complex filter for vibration signal demodulation in bearing defect diagnosis*. Journal of Sound and Vibration, 2004. **276**(1): p. 105-119.
11. Sheen, Y.T., *An envelope detection method based on the first-vibration-mode of bearing vibration*. Measurement, 2008. **41**(7): p. 797-809.
12. Stack, J.R., R.G. Harley, and T.G. Habetler, *An amplitude modulation detector for fault diagnosis in rolling element bearings*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004. **51**(5): p. 1097-1102.
13. Rizos, P.F., N. Aspragathos, and A.D. Dimarogonas, *Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes*. Journal of Sound and Vibration, 1990. **138**(3): p. 381-388.
14. Bolaers, F., et al., *Advanced detection of rolling bearing spalling from de-noising vibratory signals*. Control Engineering Practice, 2004. **12**(2): p. 181-190.
15. Krejcar, O. and R. Frischer, *Non Destructive Defect Detection by Spectral Density Analysis*. Sensors, 2011. **11**(3): p. 2334.
16. Lenort, F., *A fast discrete Fourier transform with unequally-spaced frequencies*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1995. **33**(1): p. 9.

17. Kar, C. and A.R. Mohanty, *Application of KS test in ball bearing fault diagnosis*. Journal of Sound and Vibration, 2004. **269**(1): p. 439-454.
18. Dong, Y., et al., *Faults diagnosis of rolling element bearings based on modified morphological method*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011. **25**(4): p. 1276-1286.
19. Zhang, L., L. B. Jack, and A.K. Nandi, *Fault detection using genetic programming*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005. **19**(2): p. 271-289.
20. Yang, H., J. Mathew, and L. Ma, *Fault diagnosis of rolling element bearings using basis pursuit*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005. **19**(2): p. 341-356.
21. Kopsaftopoulos, F.P. and S.D. Fassois, *Scalar and vector time series methods for vibration based damage diagnosis in a scale aircraft skeleton structure*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics; Vol 49, No 3 (2011), 2011.
22. Samanta, B. and K.R. Al-Balushi, *Artificial neural network based fault diagnosis of rolling element bearings using time-domain features*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003. **17**(2): p. 317-328.
23. Liu, T.I., J.H. Singonahalli, and N.R. Iyer, *Detection of roller bearing defects using expert system and fuzzy logic*. Mechanical Systems and Signal Processing, 1996. **10**(5): p. 595-614.
24. Bendjama, H. and M.S. Boucherit, *Wavelets and principal component analysis method for vibration monitoring of rotating machinery*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016. **54**(2): p. 659-670.
25. Zhou, F.-C., G.-J. Tang, and Y.-L. He, *An effective gear fault diagnosis method based on singular value decomposition and frequency slice Wavelet transform*. International Journal of Rotating Machinery, 2016. **2016**: p. 8.
26. Wang, Z., et al., *Constrained independent component analysis and its application to machine fault diagnosis*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011. **25**(7): p. 2501-2512.
27. Bell, A.J. and T.J. Sejnowski, *The "independent components" of natural scenes are edge filters*. Vision Research, 1997. **37**(23): p. 3327-3338.
28. Wang, H., et al., *A Compound fault diagnosis for rolling bearings method based on blind source separation and ensemble empirical mode decomposition*. Plos One, 2014. **9**(10): p. e109166.
29. Rai, A. and S.H. Upadhyay, *A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings*. Tribology International, 2016. **96**(Supplement C): p. 289-306.
30. Dolenc, B., P. Boskoski, and D. Juricic, *Distributed bearing fault diagnosis based on vibration analysis*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016. **66-67**(Supplement C): p. 521-532.
31. Fajdiga, G. and M. Sraml, *Fatigue crack initiation and propagation under cyclic contact loading*. Engineering Fracture Mechanics, 2009. **76**(9): p. 1320-1335.
32. Ismail, F., A. Ibrahim, and H.R. Martin, *Identification of fatigue cracks from vibration testing*. Journal of Sound and Vibration, 1990. **140**(2): p. 305-317.
33. Tauqir, A., et al., *Causes of fatigue failure in the main bearing of an aero-engine*. Engineering Failure Analysis, 2000. **7**(2): p. 127-144.
34. Orhan, S., N. Aktürk, and V. Çelik, *Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies*. NDT & E International, 2006. **39**(4): p. 293-298.
35. Brie, D., *Modeling of the spalled rolling element bearing vibration signal: An overview and some new results*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000. **14**(3): p. 353-369.

36. Ou, L., D. Yu, and H. Yang, *A new rolling bearing fault diagnosis method based on GFT impulse component extraction*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016. **81**(Supplement C): p. 162-182.
37. Chiter, A., *Etude Comparative de trois méthodes de diagnostic des vibrations cyclostationnaires*, in *Institut d'Optique et de Mécanique de Précision*. 1998, Ferhat Abbas Sétif1: Sétif. p. 26.
38. Cui, L., et al., *Vibration response mechanism of faulty outer race rolling element bearings for quantitative analysis*. Journal of Sound and Vibration, 2016. **364**(Supplement C): p. 67-76.
39. Dyer, D. and R.M. Stewart, *Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis*. Journal of Mechanical Design, 1978. **100**(2): p. 229-235.
40. Feng, Z., H. Ma, and M.J. Zuo, *Vibration signal models for fault diagnosis of planet bearings*. Journal of Sound and Vibration, 2016. **370**(Supplement C): p. 372-393.
41. Ma, J. and J.C. Li, *Detection of localised defects in rolling element bearings via composite hypothesis test*. Mechanical Systems and Signal Processing, 1995. **9**(1): p. 63-75.
42. Chiter, A., et al., *A new method for automatic defects detection and diagnosis in rolling element bearings using Wald-Test*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Warsaw, 2018. **56**(1): p. 123-135.
43. Niu, L., et al., *A systematic study of ball passing frequencies based on dynamic modeling of rolling ball bearings with localized surface defects*. Journal of Sound and Vibration, 2015. **357**(Supplement C): p. 207-232.
44. Van, M., P. Franciosa, and D. Ceglarek, *Rolling element bearing fault diagnosis using integrated nonlocal means denoising with modified morphology filter operators*. Mathematical Problems in Engineering, 2016. **2016**: p. 13
45. Mikhlin, Y. and S. Mytrokhin, *Nonlinear vibration modes of the double tracked road vehicle*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008. **46**(3).
46. Wald, A., *Contributions to the theory of statistical estimation and testing hypotheses*. The Annals of Mathematical Statistics, 1939. **10**(4): p. 299-326.
47. Wald, A., *On the power function of the analysis of variance test*. The Annals of Mathematical Statistics, 1942. **13**(4): p. 434-439.
48. Wald, A., *Tests of statistical hypotheses concerning several parameters when the number of observations is large*. Transactions of the American Mathematical Society, 1943. **54**(3): p. 426-482.
49. Wald, A., *On the efficient design of statistical investigations*. The Annals of Mathematical Statistics, 1943. **14**(2): p. 134-140.
50. Wald, A., *Sequential tests of statistical hypotheses*. The Annals of Mathematical Statistics, 1945. **16**(2): p. 117-186.
51. Wald, A., *Statistical decision functions*. The Annals of Mathematical Statistics, 1949. **20**(2): p. 165-205.
52. Wald, A. and J. Wolfowitz, *Confidence limits for continuous distribution functions*. The Annals of Mathematical Statistics, 1939. **10**(2): p. 105-118.
53. Wald, A. and J. Wolfowitz, *An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation*. The Annals of Mathematical Statistics, 1943. **14**(4): p. 378-388.
54. Wald, A. and J. Wolfowitz, *Optimum character of the sequential probability ratio test*. Ann. Math. Statist., 1948. **19**(3): p. 326-339.

55. Weiss, L., *Jacob Wolfowitz, 1910-1981*. International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique, 1984. **52**(2): p. 219-223.
56. Wolfowitz, J., *Abraham Wald, 1902-1950*. The Annals of Mathematical Statistics, 1952. **23**(1): p. 1-13.
57. Schneeweis, H., *Abraham Wald*. 2005. **439**: p. 21.
58. Zwingelstein, G., *Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Diagnostic & Maintenance. 1995, Paris: Hermes. 601.
59. Boulenger, A. and C. Pachaud, *Aide-mémoire Surveillance des machines par analyse des vibrations*, ed. L.U. Nouvelle. 2009, Paris: Dunod. 337.
60. Zwingelstein, G., *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes Étude opérationnelle*. Techniques de l'ingénieur Systèmes d'information et de communication, 2009(ref. article : s8252).
61. Zwingelstein, G., *Introduction aux méthodes de maintenance basées sur la fiabilité*. Techniques de l'ingénieur Systèmes d'information et de communication, 2017(ref. article : se1649).
62. Cogniel, D., F. Castellazzi, and Y. Gangloff, *Memotech-Maintenance industrielle*. 1998.
63. Héng, J., *Pratique de la maintenance préventive* Gestion Industrielle, ed. L.U. Nouvelle. 2002, Paris: Dunod. 396.
64. Bloch, H.P., *Improving Machinery Reliability*. 3 ed. Practical Machinery Management for Process Plants. Vol. 1. 1998, Texas: Gulf Publishing Company Houston. 710.
65. Bloch, H.P. and F.K. Geitner, *Machinery Component Maintenance and Repair*. 2 ed. Practical Machinery Management for Process Plants. Vol. 3. 1990, Texas: Gulf Publishing Company Houston. 614.
66. Moamar, S.M., *Diagnostic des systèmes à événements discrets (SED) État de l'art*. Techniques de l'ingénieur Méthodes de production, 2011(ref. article : ag3540).
67. Scheffer, C. and Girdhar P., *Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Practical 2004, London: British Library. 264.
68. Gross, J.M., *Fundamentals of Preventive Maintenance*. 2002, New York: American Management Association. 237.
69. Bloch, H.P. and F.K. Geitner, *Major Process Equipment Maintenance and Repair*. 2 ed. Practical Machinery Management for Process Plants. Vol. 4. 1997, Texas: Gulf Publishing Company Houston. 718.
70. Bloch, H.P. and F.K. Geitner, *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. 3 ed. Practical Machinery Management for Process Plants. Vol. 2. 1999, Texas: Gulf Publishing Company Houston. 681.
71. Pirro, D.M. and A.A. Wessol, *Lubrication Fundamentals* 2ed. 1980, New York: Marcel Dekker, Inc. 516.
72. Hamrock, B.J., S.R. Schmid, and B.O. Jacobson, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication* 2ed. 2004, New York: Marcel Dekker, Inc. 703.
73. Luce, S., *Choice criteria in conditional preventive maintenance*. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999. **13**(1): p. 163-168.
74. Chiter, A., *Detection et diagnostic des défauts de roulements: Contribution à la maintenance des machines tournantes*, in *Institut d'Optique et Mécanique de Précision*. 2001, Ferhat Abbas: Sétif. p. 115.

75. Lazrak, A., *Amélioration des processus de prévision et de gestion des stocks dans le cas d'une chaîne logistique des pièces de rechange*, in *Ecole des Mines de Nantes*. 2015, Université Nantes: Nantes. p. 185.
76. Barry, C.A., *Pareto Distributions*. 2 ed. 2015, New York: CRC Press/Taylor & Francis Group. 435.
77. Parmenter, D., *Pareto's 80/20 Rule for Corporate Accountants*. 2007, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 272.
78. Femia, J.V. and A.J. Marshall, *Vilfredo Pareto Beyond Disciplinary Boundaries*. 2012, Farnham, England: Ashgate Publishing Limited 214.
79. Smith, R. and R.K. Mobley, *Industrial machinery repair : Best maintenance Practices pocket guide*. Vol. 1. 2003, London Butterworth–Heinemann. 561.
80. Harris, T.A., *Rolling Bearing Analysis*. 4th ed. 2001, New York: John Wiley & Sons, INC.
81. Harris, T.A. and M.N. Kotzalas, *Rolling Bearing Analysis - Advanced Concepts of Bearing Technology*. 5th ed. 2007, New York: Taylor & Francis.
82. Harris, T.A. and M.N. Kotzalas, *Rolling Bearing Analysis - Essential Concepts of Bearing Technology*. 2007, New York: Taylor & Francis.
83. Dowson, D., *History of Tribology*. 1999, New York: John Wiley & Sons Inc.
84. Reti, L., *Leonardo on Bearings and Gears*. *Scientific American*, 1971. **224**(2): p. 100-111.
85. Bennett, J., *da Vinci Quincentenary Exhibition of 1952*. eng, 2015. **4**(Autumn 2015).
86. Hutchings, I., *Giovanni Canestrini's models of Leonardo da Vinci's friction experiments*. eng, 2016. **6**(Autumn 2016).
87. Chevalier, A., *Guide du dessinateur Industriel*, ed. H. Technique. 2004, Paris. 338.
88. Fanchon, J.-L., *Guide de Mécanique*. Nathan ed. 2001, Paris. 500.
89. Fanchon, J.-L., *Guide des sciences et Technologies Industrielles*. Afnor Nathan ed. 2001, Paris. 593.
90. Mobley, R.K., *An Introduction to Predictive Maintenance*. Vol. 2. 2002, London Butterworth–Heinemann. 451.
91. Glaeser, W.A. and S.J. Shaffer, *Contact Fatigue* ASM Handbook; Fatigue and Fracture, 1996. **19**: p. 331-336.
92. Barkov A.V., et al., *The peculiarities of rolling element bearing vibroacoustic diagnostics for transportation applications*. Vibrotek, 1999.
93. Chiter, A., *Technologie de base*. Office des Publications Universitaires ed. Vol. 1. 1993, Alger. 245.
94. Breneur, C., *Eléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements*. 2002, INSA: Lyon, France. p. 127.
95. Kurfess, T.R., S. Billington, and S.Y. Liang, *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*. 2006, Springer: London. p. 137-165.
96. Paliwal, D., A. Choudhury, and G. Tingarika, *Wavelet and Scalar Indicator based Fault Assessment Approach for Rolling Element Bearings*. *Procedia Materials Science*, 2014. **5**: p. 2347-2355.
97. Martin, H.R. and F. Honarvar, *Application of statistical moments to bearing failure detection*. *Applied Acoustics*, 1995. **44**(1): p. 67-77.
98. Brüel-&-Kjaer, *Detecting faulty rolling-element bearings*. Application notes Vol. N°BO0210. 1995, Copenhagen: Brüel & Kjaer. 4 pages.

99. Jarque, C.M. and A.K. Bera, *A Test for Normality of Observations and Regression Residuals*. International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique, 1987. **55**(2): p. 163-172.
100. Cornish, E.A. and R.A. Fisher, *Moments and Cumulants in the Specification of Distributions*. Revue de l'Institut International de Statistique / Review of the International Statistical Institute, 1938. **5**(4): p. 307-320.
101. Kryszynski, T. and F. Malburet, *Mechanical Vibrations : Active and Passive Control*. 2007, Great Britain ISTE. 391.
102. Chiter, A., *Identification du type d'amortissement dans les systèmes mécaniques linéaires*, in *Institut d'Optique et de Mécanique de Précision*. 1991, Ferhat Abbas Sétif1: Sétif. p. 134.
103. Aïvazian, S., *Etude Statistique des Dépendances*. 1978, Moscou: Mir. 236.
104. Aïvazian, S., I. Enukov, and L. Mechalkine, *Elément de modélisation et traitement primaire des données*. 1986, Moscou: Mir. 392.
105. Cramer, H., *Mathematical Methods of Statistics*. Vol. 9. 1946, United States: Princeton, NJ: Princeton University Press. 575.
106. Kendall, M.G., *The advanced theory of statistics, Distribution Theory* Vol. 1. 1945, London: Charles Griffin & Company Limited. 466.
107. Kendall, M.G. and A. Stuart, *The advanced theory of statistics, Inference and relation ship*. Vol. 2. 1946, London: Charles Griffin & Company Limited. 684.
108. Neyman, J. and E.S. Pearson, *On the Problem of the Most Efficient Tests of Statistical Hypotheses*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1933. **231**: p. 289-337.
109. Aïvazian, S.A., *Comparison of the optimal properties of the Wald and Neyman-Pearson criteria*. Theory of Probability & Its Applications, 1959. **4**(1): p. 83-89.
110. Smirnov, N. and L. Bolchev, *Tables de statistique mathématique-Extrait*. 1965: Nouka, 13.
111. Berkson, J., *Some difficulties of interpretation encountered in the application of the Chi-Square test*. Journal of the American Statistical Association, 1938. **33**(203): p. 526-536.
112. Taylor, W.F., *Joseph Berkson, 1899-1982*. Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General), 1983. **146**(4): p. 438-439.
113. Dodge, H.F. and H.G. Romig, *A Method of Sampling Inspection*. Bell System Technical Journal, 1929. **8**(4): p. 613-631.
114. Wald, A., *Sequential analysis*. Wiley mathematical statistics 1947, New York: J. Wiley & sons. 223.
115. Wald, A., *Sequential Method of Sampling for Deciding between Two Courses of Action*. Journal of the American Statistical Association, 1945. **40**(231): p. 277-306.
116. Berger, A. and A. Wald, *On distinct hypotheses*. The Annals of Mathematical Statistics, 1949. **20**(1): p. 104-109.
117. Le Cam, L., *Asymptotic Methods in Statistical Decision Theory*. 1 ed. 1986, New York: Springer-Verlag 765.
118. Weiss, L., *On the uniqueness of Wald sequential tests*. Ann. Math. Statist., 1956. **27**(4): p. 1178-1181.
119. Paulson, E., *A note on the efficiency of the Wald sequential test*. The Annals of Mathematical Statistics, 1947. **18**(3): p. 447-450.
120. Scott, C. and R. Nowak, *The Neyman-Pearson Criterion*. Science and Technology, 2003: p. 11.

121. Scott, C. and R. Nowak, *A Neyman-Pearson approach to statistical learning*. IEEE Transactions on Information Theory, 2005. **51**(11): p. 3806-3819.
122. Le Cam, L., *An Extension of Wald's Theory of Statistical Decision Functions*. The Annals of Mathematical Statistics, 1955. **26**(1): p. 69-81.
123. Scott, C., G. Bellala, and R. Willett, *The false discovery rate for statistical pattern recognition*. Electron. J. Statist., 2009. **3**: p. 651-677.
124. Wald, A., *Selected papers in statistics and probability*. Stanford University Press ed. 1957, Stanford, California. 702.
125. Wolfowitz, J., *On Wald's proof of the consistency of the maximum likelihood estimate*. The Annals of Mathematical Statistics, 1949. **20**(4): p. 601-602.
126. Sobel, M. and A. Wald, *A sequential decision procedure for choosing one of three hypotheses concerning the unknown mean of a normal distribution*. The Annals of Mathematical Statistics, 1949. **20**(4): p. 502-522.
127. Lacoume, J.L., P.O. Amblard, and P. Comon, *Statistiques d'ordre supérieur pour le traitement du signal*. 1997: MASSON. 290.
128. Comon, P., *Independent component analysis, A new concept?* Signal Processing, 1994. **36**(3): p. 287-314.
129. Jutten, C. and J. Herault, *Blind separation of sources, part I: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture*. Signal Processing, 1991. **24**(1): p. 1-10.
130. Hyvarinen, A. and E. Oja, *A Fast Fixed-Point Algorithm for Independent Component Analysis*. Neural Computation, 1997. **9**(7): p. 1483-1492.
131. Hyvarinen, A., *A family of fixed-point algorithms for independent component analysis*. 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1997. **5**: p. 3917-3920 vol.5.
132. Cardoso, J.F., *Eigen-structure of the fourth-order cumulant tensor with application to the blind source separation problem*. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990. **5**: p. 2655-2658
133. Bell, A.J. and T.J. Sejnowski, *Learning the higher-order structure of a natural sound*. Network: Computation in Neural Systems, 1996. **7**(2): p. 261-266.
134. Hurri, J., et al., *Image Feature Extraction Using Independent Component Analysis*. In Proc. NORSIG'96, 1996: p. 475-478.
135. Oja, E. and J. Karhunen, *Signal Separation by Nonlinear Hebbian Learning*. IEEE Press, 1995: p. 83-97.
136. Cardoso, J.F., *Iterative techniques for blind source separation using only fourth-order cumulants*. Proc. EuSIPCO, 1992. **92**: p. 739-742.
137. Hyvarinen, A., *Independent component analysis by minimization of mutual information*, in *Technical Report 1997*, Helsinki University of Technology, Laboratory of Computer and Information Science: Helsinki. p. 37.
138. Shalvi, O. and E. Weinstein, *Super-exponential methods for blind deconvolution*. IEEE Transactions on Information Theory, 1993. **39**(2): p. 504-519.
139. Amari, S., A. Cichocki, and H.H. Yang, *A New Learning Algorithm for Blind Signal Separation*. Advances in Neural Information Processing Systems, 1996. **8**: p. 757-763.
140. Delfosse, N. and P. Loubaton, *Adaptive blind separation of independent sources: A deflation approach*. Signal Processing, 1995. **45**(1): p. 59-83.

141. Hyvarinen, A. and E. Oja, *A neuron that learns to separate one signal from a mixture of independent sources*. Neural Networks, 1996., IEEE International Conference 1996. **1**: p. 62-67
142. Bell, A.J. and T.J. Sejnowski, *An Information-Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution*. Neural Computation, 1995. **7**(6): p. 1129-1159.
143. Moreau, E. and O. Macchi, *New self-adaptative algorithms for source separation based on contrast functions*. Proceedings IEEE Signal Processing Workshop on Higher-Order Statistics, 1993: p. 215-219.
144. Vial, F., *Banc d'essais pour engrenages avec variateurs*. 2000, LIS-ENSIEG-INPG: Grenoble. p. 48.
145. Serridge, M. and T.R. Licht, *Accéléromètres piézoélectriques et préamplificateurs de vibration Théorie et Applications*. K. Larson & Son A/S ed. 1988, Naerum: Brüel & Kjær p. 155.

7. Annexe

7.1. Traitement des résultats Gipsa-lab

7.1.1. Kurtosis crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20

Ku-01	CAPT-01	CAPT-02	CAPT-03	CAPT-04	CAPT-05	CAPT-06	CAPT-07	CAPT-08	CAPT-09	CAPT-10
Crea-01	6,03	16,07	5,92	14,61	5,35	18,37	2 695,97	40 976,24	51 079,70	2,26
Crea-02	3,9	31,55	6,86	37,18	8,14	35,29	397,03	13 593,44	16 756,50	4,1
Crea-03	2,8	8,55	2,68	9,23	3,31	20,5	699,64	9 368,01	13 046,37	2,72
Crea-04	3,61	9,37	3,29	8,13	5,06	28,64	1 175,89	8 916,52	11 846,17	2,1
Crea-05	3 759,86	3 539,31	3 661,03	2 536,49	3 302,84	3 241,58	3,91	3 873,51	3 098,15	5
Crea-06	168 775,41	129 954,90	47 984,27	76 314,51	61 232,67	73 394,46	5,16	180 249,85	63 055,97	1,76
Crea-07	163 423,08	102 670,11	65 855,85	144 299,81	64 953,77	32 053,04	1,42	120 714,14	59 148,08	2,43
Crea-08	29 389,00	32 512,02	21 182,26	17 829,41	21 679,04	20 594,70	2,2	33 827,18	6 959,61	2,11
Crea-09	37 532,12	41 778,84	33 467,69	30 049,15	39 365,93	31 057,39	1,37	49 640,22	813,36	2,38
Crea-10	2 724,31	37 950,56	34 332,76	17 704,97	28 964,33	25 265,54	2,19	45 231,50	34,73	1,98
Crea-11	1 830,27	3 298,56	1 878,66	1 247,98	1 178,56	5 271,32	3,29	56 403,16	4,31	2,09
Crea-12	35,61	478,82	54,58	41,43	408,55	256,69	1,77	21 947,32	1,47	2,48
Crea-13	14,65	100,06	27,25	22,45	79,92	121,45	7,84	13 350,89	1,83	1,91
Crea-14	5,12	42,81	6,7	4,51	9,91	16,86	8,21	17 402,82	3,27	2
Crea-15	4,28	11,34	3,97	8,67	5,14	31,03	4,13	16 444,91	3,15	2,03
Crea-16	11,17	125,35	22,31	15,87	56,1	114,39	28,64	9 689,33	4,18	1,85
Crea-17	181,86	801,99	403,7	192,12	960,44	1 090,84	3,42	9 283,19	14,2	1,92
Crea-18	4 033,02	8 654,83	6 021,46	4 626,39	8 425,58	6 891,78	26,58	14 033,36	89,7	1,91
Crea-19	10 023,37	8 954,53	8 633,09	7 140,50	10 120,36	10 690,53	21,35	9 599,34	935,07	2,02
Crea-20	9 623,68	8 702,63	8 801,92	6 088,60	8 494,01	8 225,16	298,61	10 580,20	1 088,44	4,35
Crea-21	13 001,46	12 466,29	11 513,11	9 452,54	10 653,35	9 937,59	88,98	12 366,02	5 432,33	2,42
Crea-22	3 907,15	5 469,90	4 656,89	3 797,54	4 297,11	4 102,70	216,83	6 588,33	6 301,33	4,26
Crea-23	1 994,87	4 279,49	3 277,34	3 860,77	2 650,19	3 662,87	83,09	10 241,40	40	4,52
Crea-24	723,24	1 616,79	1 450,05	1 874,99	704,2	1 534,58	49,05	8 193,66	9,39	5,59
Crea-25	70,42	280,87	302,29	544,17	95,45	292,85	32,94	12 481,85	1,77	7,52
Crea-26	26,48	141,31	90,38	162,08	39,59	72,28	53,31	10 006,66	295,19	10,18
Crea-27	306,08	780,88	917,56	1 305,53	406,04	813,18	45,42	5 817,57	130,91	6,17
Crea-28	4,86	17,39	4,52	10,72	7,66	26,4	3,81	9 303,59	3,97	2,4
Crea-29	5,05	41,09	6,13	20,86	7,65	62,18	5,17	9 013,54	2,55	3,6

Annexe 1: Kurtosis crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20

Kurtosis crea1-29 CAPT11-20

Ku-02	CAPT-11	CAPT-12	CAPT-13	CAPT-14	CAPT-15	CAPT-16	CAPT-17	CAPT-18	CAPT-19	CAPT-20
Crea-01	4,98652	2,57895	1,5196	1,5074	1,5196	1,24142	7019,9403	3,37745	7509,0912	25224,751
Crea-02	8,22584	4,74036	1,5305	1,5242	1,5453	1,26192	5234,5838	5,7047	4826,9875	7972,7686
Crea-03	4,42963	3,17536	1,5471	1,5325	1,5523	1,26426	5084,3627	4,14898	4767,5001	7597,1600
Crea-04	2,83758	2,42035	1,5646	1,5474	1,5749	1,27808	4301,7656	3,53175	3947,8777	6238,6365
Crea-05	7,02077	4,98503	1,4912	1,4838	1,5007	1,04583	3034,9231	1,0728	2989,4235	4102,0557
Crea-06	2,03603	2,06605	1,3832	1,3812	1,3872	1,01051	1072,5353	1,00669	40334,475	61613,224
Crea-07	2,49008	2,5124	1,8003	1,7998	1,8059	1,00699	43173,954	1,02386	9362,4549	86272,122
Crea-08	2,13834	2,19158	1,4481	1,4506	1,4552	1,01159	20356,958	1,03608	4935,4013	29378,280
Crea-09	2,52205	2,53646	1,7957	1,798	1,8098	1,01177	8838,6151	1,04894	7736,6613	34282,452
Crea-10	2,21639	2,24933	1,5567	1,5637	1,5775	1,02394	11148,353	1,06373	3695,0107	19469,154
Crea-11	2,00512	2,01964	1,4578	1,4514	1,4655	1,04065	7973,5672	1,1324	5353,4426	21852,774
Crea-12	2,59968	2,39689	1,655	1,6469	1,6668	1,06667	1444,5140	1,26534	3548,6004	13192,145
Crea-13	2,057	1,87312	1,327	1,3224	1,3343	1,10499	5923,0480	1,33698	4167,1783	9760,6910
Crea-14	2,41071	2,16031	1,3513	1,35	1,3588	1,1923	4993,1089	1,44997	3955,5394	3227,3723
Crea-15	2,74931	2,28144	1,2757	1,2714	1,2823	1,21671	4956,6920	2,68236	4405,7516	7194,1744
Crea-16	2,35573	2,13275	1,3076	1,3057	1,3136	1,15949	3846,0963	1,47766	3039,7515	5031,1512
Crea-17	2,8856	2,12742	1,2487	1,247	1,2585	1,11656	4003,5618	1,47274	3269,8802	5397,4305
Crea-18	3,20332	2,46356	1,3182	1,3169	1,3311	1,07758	3976,5932	1,19985	3156,5369	6550,2305
Crea-19	2,3595	2,04471	1,3187	1,3194	1,3277	1,04469	5294,1638	1,11072	3801,9971	8528,0575
Crea-20	9,20446	6,3305	1,2841	1,2798	1,2866	1,05408	4329,6656	1,13153	3464,0928	7346,2676
Crea-21	11,6837	6,24617	1,261	1,2591	1,269	1,08196	3817,6835	1,22681	3241,3029	6612,6344
Crea-22	10,3943	6,19004	1,2649	1,2674	1,2713	1,1147	4623,5631	1,53953	3478,6978	7089,9124
Crea-23	9,65881	5,79923	1,287	1,2853	1,2943	1,17831	4387,6187	1,52859	3587,2925	7411,7577
Crea-24	8,3072	5,55443	1,3095	1,3104	1,316	1,2491	4782,1138	1,51491	4216,5885	7880,7186
Crea-25	13,6292	9,13189	1,5966	1,5966	1,6113	1,53746	4894,7710	2,46728	4584,4516	6773,9947
Crea-26	20,794	12,1495	1,195	1,1925	1,1999	1,27962	4925,6839	337,03684	5010,7333	8247,5284
Crea-27	12,6355	8,03927	1,4747	1,4967	1,4824	1,30868	3134,5586	4,18895	2670,9915	4610,6952
Crea-28	2,87531	2,56674	1,296	1,2942	1,3031	1,22857	4671,8960	2,92262	4095,1325	11144,262
Crea-29	4,83877	3,36832	1,2652	1,2634	1,2701	1,19912	5316,3050	2,63885	4222,9087	9987,7842

Annexe 2: Kurtosis crea1-29 CAPT11-20

7.1.2. Skewness crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20

Sk-01	CAPT-01	CAPT-02	CAPT-03	CAPT-04	CAPT-05	CAPT-06	CAPT-07	CAPT-08	CAPT-09	CAPT-10
Crea-01	-0,2559	-0,2697	0,3465	0,4114	0,0722	0,2716	-12,6101	71,3213	-192,91	0,02
Crea-02	-0,334	-0,026	0,1835	0,2045	0,0922	0,197	-5,3115	51,5345	-110,3	0,02
Crea-03	0,2454	0,015	0,1702	-0,0731	-0,0648	0,2265	-12,3852	34,8151	-99,54	0,01
Crea-04	-0,4417	-0,0021	0,0508	-0,0354	-0,3418	-0,034	-20,249	38,7731	-93,12	0
Crea-05	24,3783	16,5602	27,8624	6,8231	23,9772	31,4127	-1,5358	25,6283	16,3	-0,07
Crea-06	200,9501	126,6977	26,954	-95,0583	-86,8219	188,8554	-1,8598	377,8845	7,2	-0,1
Crea-07	351,2645	138,198	102,0593	-315,9228	-8,5294	30,5774	-0,5067	225,5588	141,06	-0,02
Crea-08	32,2891	113,2351	74,6697	37,5711	43,01	70,9455	-0,8951	91,11	26,15	-0,14
Crea-09	24,4706	48,298	87,6101	63,427	64,255	81,0292	-0,3624	78,9767	4,32	-0,14
Crea-10	15,4287	70,2076	99,4489	47,646	22,6243	40,9425	-1,0143	101,4845	-0,54	-0,16
Crea-11	11,9945	-2,419	5,065	4,9856	2,3503	24,584	-1,4463	105,0886	-0,84	0,04
Crea-12	-0,1478	0,8202	0,343	0,2677	2,8289	2,0395	-0,8306	89,4466	-0,33	-0,03
Crea-13	-0,376	1,0072	0,2216	-0,2286	0,3444	1,1789	-2,4659	36,0684	-0,37	-0,07
Crea-14	-0,0493	0,6731	0,0228	0,0149	-0,3277	0,4175	-2,0265	44,7425	-1,32	-0,01
Crea-15	-0,2733	0,0933	0,1113	-0,0651	-0,0572	0,1037	0,4781	34,3512	-1,24	0
Crea-16	-0,3049	0,8257	-0,0512	-0,0819	-0,5489	0,834	-4,4547	60,4631	-1,44	0,01
Crea-17	0,9914	1,04	4,9147	0,4579	4,8448	11,0315	0,0052	41,8039	-2,09	0
Crea-18	14,146	22,7097	37,6132	1,3775	38,7186	39,2986	-4,7277	51,6825	-3,11	-0,04
Crea-19	57,5408	14,2249	50,5517	0,5379	20,5411	66,0158	-4,2599	21,5562	-8,83	-0,02
Crea-20	30,7839	43,8475	30,0233	14,3522	35,419	49,5928	8,2306	15,6138	-2,42	0,13
Crea-21	49,751	14,8639	43,3705	-8,2906	27,4207	55,4725	-8,2188	-9,5704	-21,28	-0,02
Crea-22	18,4218	26,2517	24,0433	7,5041	30,6436	32,0504	-12,5858	23,0834	-22,2	-0,05
Crea-23	14,469	6,1916	13,8259	9,1501	15,3452	21,9088	8,5643	45,3692	-5,58	0,12
Crea-24	5,8121	11,4051	10,6714	7,7307	5,5152	9,8512	6,5327	21,2129	-2,83	0,02
Crea-25	-0,2434	1,8417	3,3524	3,9391	0,4506	2,6906	5,1679	72,5459	-0,86	0,22
Crea-26	-0,2029	1,7945	1,1828	1,1508	0,1716	0,6702	6,917	30,9772	-12,46	-0,08
Crea-27	5,6539	2,5535	12,7423	0,8905	1,8062	8,797	-2,1415	48,6315	-4,44	0,04
Crea-28	-0,3579	-0,0758	-0,0707	-0,0394	-0,0556	0,2741	0,6616	38,5766	-1,42	-0,04
Crea-29	-0,0639	-0,0809	0,2522	0,0514	0,0859	0,8099	0,6379	50,6311	-1,07	-0,05

Annexe 3: Skewness crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20

Skewness crea1-29 CAPT 11-20

Sk-02	CAPT-11	CAPT-12	CAPT-13	CAPT-14	CAPT-15	CAPT-16	CAPT-17	CAPT-18	CAPT-19	CAPT-20
Crea-01	0,03289	0,00225	-1,55E-04	-2,73E-04	-0,00209	-0,0124	44,03823	-0,063	21,90535	-152,7699
Crea-02	0,0131	0,01766	-3,55E-05	1,28E-04	-0,00375	-0,01547	19,29886	-0,15744	11,96431	-85,58135
Crea-03	-8,17E-04	0,0063	-7,31E-04	0,00356	-0,00401	-0,01602	18,69866	-0,09483	17,49667	-82,37874
Crea-04	0,01313	-0,00563	-6,21E-04	0,00424	-0,00302	-0,01993	19,17348	-0,09114	11,9292	-74,05604
Crea-05	-0,00445	0,08285	0,27031	0,26236	0,27041	-0,05793	13,87969	-0,14544	10,28482	-61,53952
Crea-06	-0,01617	0,047	0,15259	0,14612	0,15372	-0,07872	29,03	-0,03638	41,44894	-237,05422
Crea-07	0,03195	-0,05584	0,5145	0,51413	0,51685	-0,02446	63,91474	-0,13027	44,6986	-280,33936
Crea-08	0,11241	-0,00368	0,17594	0,18168	0,18638	-0,04953	25,23627	-0,15124	38,95444	-162,34087
Crea-09	0,09925	0,0311	0,45977	0,46265	0,47053	-0,0328	43,46653	-0,17131	40,73876	-175,79837
Crea-10	0,19394	0,0857	0,30744	0,31632	0,32544	-0,02446	43,5619	-0,02081	34,87481	-133,98895
Crea-11	-0,06892	0,08841	0,21377	0,2037	0,21694	-0,03145	43,64246	-0,07884	33,11677	-140,65862
Crea-12	-0,07479	0,00989	0,42679	0,42442	0,433	-0,02896	25,69875	0,00443	23,76233	-108,13958
Crea-13	-0,03529	0,05816	0,04712	0,04694	0,05555	-0,04119	26,86513	-0,02011	19,29299	-93,8301
Crea-14	0,05176	-0,05436	0,03089	0,03505	0,03938	-0,03028	19,9603	-0,00909	15,68004	-44,75161
Crea-15	0,02066	-0,00415	-0,00547	-0,00516	-9,10E-04	-0,01731	16,04021	0,01939	17,17356	-78,92958
Crea-16	0,01332	-0,00895	-0,00668	-0,0065	-0,00131	-0,03404	17,27752	-0,03852	9,27256	-68,64257
Crea-17	0,02009	-0,02731	-0,00667	-0,00453	-0,00226	-0,03602	18,02562	-0,03522	9,46172	-71,31117
Crea-18	0,05702	-0,0011	0,0102	0,00886	0,01497	-0,03959	21,52983	-0,01599	17,55633	-77,75178
Crea-19	0,02824	-0,01299	0,01018	0,00934	0,01367	-0,02241	26,98689	-0,0826	26,30244	-88,40569
Crea-20	-0,09359	-0,01497	0,05014	0,04825	0,0525	0,02335	15,00097	-0,13083	20,93914	-82,59189
Crea-21	-0,04509	-0,01672	-0,00803	-0,00874	-0,00649	-0,04802	19,65072	-0,04541	16,36268	-78,19437
Crea-22	0,10287	0,0818	-0,00636	-0,00725	-0,0047	-0,03502	22,42189	-0,03428	18,88364	-80,83824
Crea-23	0,01183	0,02798	0,0133	0,01341	0,01974	-0,00881	19,36138	-0,03775	14,73996	-83,04919
Crea-24	0,02556	0,05288	0,10366	0,10497	0,10905	0,10958	11,88989	-0,14414	13,08933	-85,00105
Crea-25	-0,21399	0,05	0,45353	0,4571	0,45952	0,5579	15,9764	0,18223	11,92841	-79,26189
Crea-26	0,14277	0,2546	-0,00339	-0,00525	-0,00286	-0,01736	19,98365	-2,92178	17,396	-87,3895
Crea-27	0,18604	0,1715	-0,00477	-0,00648	0,00142	-0,01874	14,4983	-0,05407	10,99422	-65,14662
Crea-28	0,03118	0,00512	-0,00313	-0,00322	-0,00405	-0,01524	13,28274	0,03421	14,44075	-96,55753
Crea-29	0,12282	0,01065	-0,00642	-0,00336	-0,00339	-0,01602	29,01306	0,06816	14,91733	-90,72547

Annexe 4: Skewness crea1-29 CAPT 11-20

7.1.3. RMS crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20

RMS-01	CAPT-01	CAPT-02	CAPT-03	CAPT-04	CAPT-05	CAPT-06	CAPT-07	CAPT-08	CAPT-09	CAPT-10
Crea-01	2863,98848	1009,99629	1525,13116	1314,19651	1485,48595	1003,04397	330,44222	131,55397	157,51	1817,81
Crea-02	2691,88198	1023,06718	1628,88608	1266,76172	1476,58586	1037,79716	644,48698	221,81136	259,53	1967,55
Crea-03	3535,31546	1581,08384	2927,39529	1985,89323	2508,06068	1297,02039	641,26086	277,64122	292,79	2458,73
Crea-04	3394,86453	1565,43078	2684,17769	2139,03075	2238,83129	1209,76073	615,75483	278,53842	304,82	3259,87
Crea-05	419,589913	425,30197	420,59397	579,47132	453,0125	473,54167	4844,59181	431,69119	443,72	2473,5
Crea-06	56,8778635	67,83355	67,75946	102,25415	86,06348	96,7817	4410,31843	51,29124	91,6	2661,99
Crea-07	65,2172913	78,88763	39,68115	38,94547	80,67485	49,42808	11164,1584	83,99339	78,72	4041,92
Crea-08	146,163956	141,76614	180,49968	221,58483	159,60791	181,59304	9317,58939	136,70893	216,82	4592,84
Crea-09	128,92592	128,00885	130,4356	173,09308	125,22503	132,76301	13699,3253	119,67738	309,08	4195,48
Crea-10	266,081592	126,48694	118,00327	210,87924	118,32261	97,15297	13517,7051	119,24298	720,26	4219,81
Crea-11	277,266115	224,86656	256,3103	360,25797	284,79444	205,76067	12268,3835	114,55166	1 369,20	4221,69
Crea-12	972,630925	475,74273	772,62664	1093,51058	473,79299	554,74103	14491,247	186,67675	3 025,55	4164,38
Crea-13	1577,41915	738,06811	1058,54658	1436,51606	804,28376	724,8081	8735,16338	227,55057	3 637,77	4548,12
Crea-14	2833,2821	917,92193	1824,47506	2551,65761	1531,45802	1294,43001	6645,78053	198,26356	4 514,89	3770,03
Crea-15	2969,2846	1310,13273	2423,85646	1910,95145	2031,13531	1093,49989	4804,14987	203,93779	5 150,34	3284,97
Crea-16	1763,7035	787,23935	1174,63874	1629,87079	952,21792	817,24625	3833,68369	280,17906	3 045,34	3937,66
Crea-17	755,617208	473,84103	603,69491	859,12983	461,28654	460,56991	3263,4457	279,09287	1 536,74	3320,16
Crea-18	289,858698	241,36867	284,51775	344,58481	262,93335	277,97175	3414,08744	235,28442	803,16	3172,56
Crea-19	248,59268	252,34521	270,64844	334,29219	242,73654	255,32661	3647,22198	281,10655	446,14	3098,31
Crea-20	269,860562	286,213	257,12812	384,00269	293,68864	292,09519	904,31636	253,731	438,71	2007,79
Crea-21	229,694508	196,50893	229,47352	282,38633	252,26311	246,26648	1853,49089	230,46222	242,69	2022,33
Crea-22	368,093706	321,06245	330,32872	456,34407	379,50974	393,0326	1602,38614	326,1143	318,23	2029,61
Crea-23	394,451357	320,8817	340,05741	425,77701	385,16102	333,23428	3062,70224	263,32144	1 721,23	2144,37
Crea-24	558,701787	422,26581	426,04161	529,31761	530,91937	436,95162	3821,27778	283,28896	3 850,90	2132,89
Crea-25	950,213231	547,92945	623,05952	657,97574	792,43243	561,20701	4542,05694	244,13574	7 706,63	2007,33
Crea-26	1296,14341	783,84326	921,95859	867,62347	1036,47768	915,04174	3547,83446	266,50158	1 007,97	1656,65
Crea-27	770,941646	537,18969	582,68395	583,4486	691,72894	536,02169	1647,82604	357,99911	965,83	2049,26
Crea-28	2969,76872	1241,00482	2301,88881	2066,64996	1970,40578	1216,40236	5408,41007	274,07231	4 774,37	3717,81
Crea-29	2532,46628	1058,85136	2085,42858	1582,16489	1820,28302	1018,03943	7011,94068	274,85014	6 070,35	2765,84

Annexe 5: RMS crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20

RMS crea1-29 CAPT 11-20

RMS-02	CAPT-11	CAPT-12	CAPT-13	CAPT-14	CAPT-15	CAPT-16	CAPT-17	CAPT-18	CAPT-19	CAPT-20
Crea-01	0,05686	0,05761	0,20088	0,20105	0,20377	6488,1054	231,53963	1844,296	222,45905	286,61759
Crea-02	0,06192	0,0623	0,19954	0,20008	0,2026	6490,9601	299,47095	1952,2212	314,3935	516,0144
Crea-03	0,07682	0,07714	0,19717	0,19763	0,19995	6491,1446	305,29036	2279,3989	319,32761	522,40005
Crea-04	0,10192	0,10208	0,19384	0,19518	0,19657	6494,0976	347,04569	2614,9011	360,16103	572,69122
Crea-05	0,07636	0,0777	0,22201	0,22145	0,22594	6931,9743	414,38381	6899,5408	434,77357	695,89496
Crea-06	0,08202	0,08456	0,22707	0,22648	0,23102	6917,8594	449,86362	6905,9781	124,13506	185,10101
Crea-07	0,12383	0,12619	0,20247	0,20194	0,20595	6915,5346	119,37222	6884,3434	192,05117	116,54191
Crea-08	0,14093	0,14249	0,22049	0,21987	0,22425	6912,1183	164,79775	6875,4513	265,74461	239,72819
Crea-09	0,12623	0,12851	0,20166	0,20106	0,20497	6905,0419	211,9211	6851,0401	223,64383	227,92212
Crea-10	0,12328	0,12415	0,20846	0,20781	0,21188	6888,6934	194,07968	6786,2959	292,18852	274,43375
Crea-11	0,13338	0,13396	0,21447	0,21396	0,21819	6865,7692	230,65778	6644,9059	270,81428	282,0478
Crea-12	0,12773	0,13425	0,20209	0,20149	0,20545	6824,6239	446,48768	6453,5802	337,29832	354,7595
Crea-13	0,13807	0,14452	0,22445	0,22379	0,22832	6761,0743	284,42146	6323,8817	317,30864	446,04428
Crea-14	0,11568	0,11784	0,22593	0,22533	0,22983	6612,825	319,94199	6127,2249	349,07203	659,77953
Crea-15	0,10027	0,10266	0,23357	0,23293	0,23765	6578,4962	312,01476	4330,3099	336,12691	519,91621
Crea-16	0,12055	0,1237	0,23266	0,23202	0,2367	6712,2021	374,90965	6173,9839	409,17402	655,98123
Crea-17	0,10166	0,1038	0,23525	0,23461	0,23938	6777,4182	356,08869	6207,7407	389,68643	621,92795
Crea-18	0,09743	0,09947	0,23165	0,23104	0,23578	6863,8241	367,96045	6564,1693	397,80841	554,50565
Crea-19	0,09483	0,09694	0,23163	0,23103	0,23573	6904,7949	296,90436	6757,2425	351,61479	491,35776
Crea-20	0,06172	0,06246	0,24151	0,24087	0,24573	6911,2657	336,7887	6748,643	376,60054	477,17476
Crea-21	0,06356	0,0634	0,24513	0,24448	0,24948	6864,3834	368,19411	6525,8903	395,89565	514,0457
Crea-22	0,06256	0,06322	0,24802	0,24743	0,25241	6767,4573	326,00488	6111,97	381,76469	488,97
Crea-23	0,06657	0,06699	0,24689	0,24627	0,25126	6671,5856	342,26308	6074,3479	367,54984	486,71672
Crea-24	0,06659	0,06705	0,24343	0,2428	0,24773	6549,2938	322,06022	6072,2682	349,01854	421,4183
Crea-25	0,0619	0,06245	0,22302	0,22223	0,22713	6352,0286	330,58746	3768,2187	345,94331	517,24575
Crea-26	0,0512	0,05175	0,25237	0,25189	0,25685	6380,1338	318,8754	722,9562	316,44025	480,89025
Crea-27	0,06363	0,06446	0,26725	0,26891	0,27161	6465,6882	427,49342	3546,3543	461,03214	590,58921
Crea-28	0,11317	0,11529	0,2259	0,2254	0,23001	6522,8576	340,1718	4184,2115	348,74839	339,74185
Crea-29	0,0851	0,08753	0,2331	0,23255	0,23718	6552,4139	306,73591	4324,7923	337,71152	374,90276

Annexe 6: RMS crea1-29 CAPT 11-20

7.1.4. Facteur de crête crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20

CF-01	CAPT-01	CAPT-02	CAPT-03	CAPT-04	CAPT-05	CAPT-06	CAPT-07	CAPT-08	CAPT-09	CAPT-10
Crea-01	11,3834	32,3308	21,3306	24,9285	21,6764	32,6048	99,1066	242,4176	206,68	17,3
Crea-02	12,0477	32,0243	20,1033	25,7775	22,0563	31,4936	50,7908	143,7979	125,38	16,63
Crea-03	9,1316	20,6839	11,157	16,4712	13,0491	25,2602	51,0791	114,8893	110,91	13,32
Crea-04	9,6493	20,9284	12,1464	15,2985	14,6206	27,0004	53,0893	115,9768	106,24	10,02
Crea-05	77,8737	75,5957	77,8589	56,4532	71,8325	69,0478	6,7543	75,6351	73,8	13,13
Crea-06	566,8989	472,6127	332,7653	314,9603	276,2612	330,424	3,5263	464,1143	348,98	6,38
Crea-07	488,0761	405,7036	397,9976	-11,8884	294,7883	315,772	2,4896	379,7918	407,15	3,92
Crea-08	217,8649	226,26	178,8978	147,2483	200,4287	176,1136	3,4371	233,3717	147,81	7,01
Crea-09	249,2206	250,717	249,9394	186,807	255,524	240,6845	2,383	267,1014	105,42	7,72
Crea-10	120,0835	253,3542	273,2636	153,2109	270,2189	255,1646	2,4239	267,5042	44,43	7,63
Crea-11	115,6687	144,8948	125,59	90,141	112,6181	155,953	2,6695	280,7292	23,39	7,45
Crea-12	32,8963	68,7346	41,8391	29,7373	68,5215	58,932	2,2607	170,9051	10,56	7,74
Crea-13	20,5538	43,9539	30,8262	22,8073	40,7145	44,9581	3,7512	140,2326	9	7,11
Crea-14	11,5386	35,686	17,9202	12,8085	21,3835	25,3123	4,9239	164,4831	7,25	8,69
Crea-15	10,8403	24,983	13,4521	17,1313	16,0866	29,5537	6,807	156,4987	6,32	9,71
Crea-16	18,4532	40,7208	27,8452	20,0617	34,009	39,9035	8,5453	116,7218	10,64	8,28
Crea-17	42,904	67,8012	54,2642	38,0047	70,3966	70,8362	10,0164	114,8937	20,62	9,28
Crea-18	110,7367	132,9709	114,7486	94,9258	122,5292	117,2134	9,5472	136,7749	40,55	10,18
Crea-19	131,3836	129,0811	119,3689	96,984	131,9826	125,4981	8,9265	113,4943	64,6	10,49
Crea-20	118,1833	113,9746	125,3266	84,5437	109,0032	111,7341	36,1986	125,7316	72,82	16,18
Crea-21	138,7582	166,7253	142,2038	114,2902	126,9191	129,9405	17,6775	138,4218	117,65	10,71
Crea-22	87,3066	100,2515	97,9812	71,0889	85,7791	82,156	20,4364	98,6004	96,03	15,75
Crea-23	81,6704	100,5729	96,0132	76,6599	84,4115	97,1329	10,6977	123,7537	17,93	14,89
Crea-24	57,9952	77,1244	76,8164	61,8929	61,5988	74,2577	8,5697	112,6341	8,3	15,29
Crea-25	34,4786	58,951	52,2117	49,7617	40,7782	57,2587	7,2133	132,7704	4,22	16,21
Crea-26	25,1415	41,5632	35,5179	37,7583	31,609	35,6191	9,2299	119,7516	31,29	19,5
Crea-27	41,5064	59,9025	56,0973	55,9587	46,8377	60,6076	19,8431	89,1092	33,79	15,84
Crea-28	10,9072	25,875	13,8308	15,8203	16,5844	26,6992	6,0519	116,4109	6,86	7,24
Crea-29	12,5589	30,6493	15,1144	20,477	17,9181	31,8701	4,672	116,0596	5,37	11,19

Annexe 7: Facteur de crête crea1-29 CAPT1-10/ CAPT 11-20

Facteur de crête crea1-29 CAPT11-20

CF-02	CAPT-11	CAPT-12	CAPT-13	CAPT-14	CAPT-15	CAPT-16	CAPT-17	CAPT-18	CAPT-19	CAPT-20
Crea-01	17,5172	17,3212	4,9634	4,5606	4,8447	5,04785	140,97803	17,75854	146,80455	109,56062
Crea-02	16,1341	15,9334	4,843	4,9852	4,9321	5,04748	109,37622	16,78293	104,18473	63,02925
Crea-03	13,0004	12,9216	5,0218	5,0455	5,001	5,04456	107,16683	14,36607	102,41833	61,84149
Crea-04	9,81147	9,73375	5,158	5,0727	5,0809	5,04473	94,12305	12,51175	90,96487	57,20884
Crea-05	13,091	12,8491	4,4845	4,5147	4,3988	4,69001	78,7748	4,74061	74,83896	46,67946
Crea-06	11,7342	11,5399	4,2259	3,8931	4,2922	4,72747	72,7087	4,56619	260,25685	173,25135
Crea-07	7,94721	7,72081	4,8315	4,8895	4,6763	4,64563	272,25765	4,60247	146,38807	280,5171
Crea-08	7,06901	6,84858	4,4816	4,5443	4,2979	4,71042	198,76485	4,75314	123,09187	135,56186
Crea-09	7,90339	7,71659	4,9114	4,941	4,7878	4,71511	153,8214	4,77344	143,54968	141,7063
Crea-10	7,98226	7,93037	4,3543	4,1932	4,6346	4,66184	164,44277	4,82811	107,90294	116,70576
Crea-11	7,451	7,3485	4,5307	4,3706	4,5291	4,73596	141,30891	4,92452	120,6288	113,94522
Crea-12	7,82224	7,25571	4,9191	4,7407	4,805	4,77975	73,20247	5,06912	95,31029	91,50143
Crea-13	7,21818	6,90377	4,4411	4,3702	4,3017	4,84612	114,60457	5,1802	101,44382	73,38509
Crea-14	8,6295	8,45804	4,425	4,4224	4,3438	4,95507	102,41544	5,34777	93,6397	49,61354
Crea-15	9,96666	9,73518	4,2693	4,2352	4,1958	4,9642	104,88286	7,5662	97,11511	61,13293
Crea-16	8,2954	8,0491	4,1664	4,2175	4,1935	4,87619	87,39439	5,305	79,60916	48,77579
Crea-17	9,83553	9,46366	4,2307	4,2582	4,1713	4,82883	91,56708	5,26214	83,74682	51,89347
Crea-18	10,2494	10,0286	4,288	4,1734	4,2408	4,77358	88,72965	4,98448	82,22048	57,98679
Crea-19	10,5449	10,1442	4,2777	4,2389	4,2272	4,69369	109,9647	4,83466	92,87436	62,38631
Crea-20	16,1456	15,9114	4,1353	4,0758	4,0605	4,73242	96,78769	4,84823	86,455	68,5556
Crea-21	15,6959	15,1579	3,9037	3,697	3,9493	4,76722	88,80099	4,99763	82,36009	63,36596
Crea-22	15,9154	15,7593	3,9421	4,0182	3,8989	4,83461	99,99237	5,32005	85,55794	66,85891
Crea-23	15,0152	14,9224	4,024	3,9434	3,9009	4,89719	95,22207	5,37193	87,69695	66,72259
Crea-24	14,905	14,5261	4,0098	4,0548	4,0363	5,00161	101,74184	5,38695	93,23573	77,04696
Crea-25	16,106	16,0052	4,4461	4,1346	4,3363	5,1467	98,60628	8,68394	93,94603	62,7458
Crea-26	19,5259	19,1768	3,9055	3,6437	3,8132	5,03532	102,5573	45,20606	103,27384	68,01344
Crea-27	15,5495	15,4055	3,6968	3,59	3,382	5,05963	76,39884	9,09272	69,60469	53,88178
Crea-28	8,60543	8,5067	4,4223	4,2146	4,3194	4,93756	94,22886	7,51085	93,59757	95,37241
Crea-29	11,7487	10,8174	4,206	4,0979	3,9728	4,97542	106,28361	7,50533	95,11668	87,02523

Annexe 8: Facteur de crête crea1-29 CAPT11-20

7.2. Tableaux des indicateurs par accéléromètres « LaMCoS »

7.2.1. Acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
111	6	1300	2,8729	0,0316	0,8860	3,6454
		2300	2,8701	-0,0025	1,8354	3,7380
		4300	2,9877	0,0121	3,8909	3,9744
	12	1300	2,8093	0,0663	1,0046	3,8970
		2300	2,9961	0,0506	2,0787	4,8710
		4300	3,0148	0,0065	4,1450	3,8744

Annexe 9: Indicateurs scalaires essai 111 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
112	6	1300	2,6725	-0,0226	1,3749	3,6457
		2300	2,8888	0,0176	2,5770	3,6483
		4300	2,9640	0,0039	4,1823	3,8479
	12	1300	2,4698	-0,0973	1,6285	3,0872
		2300	2,9058	0,0502	2,9642	3,5279
		4300	2,9888	0,0350	4,4544	3,8658

Annexe 10: Indicateurs scalaires essai 112 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
113	6	1300	2,7388	0,1938	1,1784	3,6272
		2300	2,7377	0,0388	2,8390	4,0715
		4300	2,9816	0,0037	4,0131	4,0379
	12	1300	2,8629	0,2224	1,2886	3,8297
		2300	3,1333	0,1159	3,1747	3,9288
		4300	2,9971	0,0103	4,3625	3,9069

Annexe 11: Indicateurs scalaires essai 113 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
121	6	1300	2,8993	0,0669	1,0488	3,6764
		2300	2,8438	0,0027	2,3373	3,9908
		4300	2,9789	0,0112	4,5051	3,8011
	12	1300	2,9409	0,0385	1,1013	4,215
		2300	2,9185	0,0271	2,4924	4,3059
		4300	3,0537	0,0040	4,7116	4,249

Annexe 12: Indicateurs scalaires essai 121 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
122	6	1300	2,6207	-0,0979	1,3250	3,8018
		2300	2,7460	-0,0066	2,6907	3,4367
		4300	2,9798	0,0146	4,5903	3,5705
	12	1300	2,6737	-0,1864	1,5750	3,5934
		2300	2,7923	0,0312	2,8538	4,0549
		4300	2,9765	0,0036	4,7587	3,7542

Annexe 13: Indicateurs scalaires essai 122 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
123	6	1300	2,8889	0,1675	1,4751	4,1957
		2300	2,7009	0,0222	3,2972	3,6556
		4300	2,9920	-0,0168	4,6551	3,6190
	12	1300	2,8328	0,1682	1,5165	4,3842
		2300	2,7836	0,0504	3,5256	3,9257
		4300	3,0097	-0,0090	4,9301	3,9229

Annexe 14: Indicateurs scalaires essai 123 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
131	6	1300	2,8330	0,0643	1,1382	3,9658
		2300	2,8565	0,0307	2,6919	3,5064
		4300	2,9238	-0,0805	5,0171	4,2634
	12	1300	2,7868	0,0356	1,2386	3,5326
		2300	2,8749	0,0016	2,8252	4,4367
		4300	2,8499	-0,0552	4,7844	3,5830

Annexe 15: Indicateurs scalaires essai 131 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
132	6	1300	2,6456	-0,0315	1,3721	3,3563
		2300	2,7131	0,0189	3,0071	3,7208
		4300	2,9066	-0,0494	4,8992	3,7152
	12	1300	2,5525	-0,0846	1,6012	3,3464
		2300	2,7586	0,0044	3,0786	3,7497
		4300	2,9196	-0,0551	4,7817	3,3476

Annexe 16: Indicateurs scalaires essai 132 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
133	6	1300	2,5532	0,2800	1,4846	3,3872
		2300	2,6460	0,0199	3,1434	3,3396
		4300	3,0192	-0,0095	4,2893	3,8312
	12	1300	2,5655	0,2073	1,4706	3,3708
		2300	2,6309	0,0279	3,1698	3,9067
		4300	2,9550	-0,0259	4,5675	3,7343

Annexe 17: Indicateurs scalaires essai 133 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
211	6	1300	2,8544	0,0235	0,9126	4,0260
		2300	2,9076	0,0274	1,8640	3,9721
		4300	2,9258	0,0127	7,0103	3,6108
	12	1300	2,8792	0,1496	1,1611	3,9693
		2300	3,0738	0,0662	2,2412	4,5178
		4300	3,0973	0,0501	4,1623	4,1371

Annexe 18: Indicateurs scalaires essai 211 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
212	6	1300	2,6474	-0,0022	1,2598	3,7191
		2300	2,6134	-0,0046	3,0797	3,5148
		4300	2,8541	-0,0170	6,8107	3,4425
	12	1300	2,4614	-0,1086	1,7150	3,2374
		2300	2,5516	0,0338	3,4174	3,9109
		4300	3,0075	0,0302	4,2847	4,1069

Annexe 19: Indicateurs scalaires essai 212 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
213	6	1300	2,7568	0,1569	1,1678	3,6748
		2300	2,7395	-0,0057	2,9746	3,8103
		4300	2,9421	0,0091	4,2956	4,0081
	12	1300	2,8504	0,1570	1,3248	5,3187
		2300	3,2678	0,1540	3,0983	4,5448
		4300	3,4758	0,0070	5,0803	4,6782

Annexe 20: Indicateurs scalaires essai 213 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
221	6	1300	3,0115	-0,0676	1,0759	4,1725
		2300	2,9035	0,0053	2,3272	3,6381
		4300	2,9552	0,0034	4,5122	3,7787
	12	1300	2,9905	-0,0108	1,1755	3,7211
		2300	2,7805	0,0284	2,7256	3,8605
		4300	2,9755	0,0154	4,7356	3,1807

Annexe 21: Indicateurs scalaires essai 221 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
222	6	1300	2,8239	0,0370	1,3059	3,5927
		2300	2,4526	0,0099	3,3443	3,6733
		4300	2,9535	0,0142	4,6211	3,7257
	12	1300	2,4738	-0,2234	1,7436	3,2438
		2300	2,7333	-0,0167	3,1489	3,9071
		4300	2,9889	0,0177	4,7271	3,9857

Annexe 22: Indicateurs scalaires essai 222 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
223	6	1300	2,7358	0,1847	1,5037	4,4733
		2300	2,7646	0,0279	2,8777	3,8699
		4300	2,9595	0,0178	4,4666	3,8505
	12	1300	2,8846	0,1869	1,3667	4,2938
		2300	2,8430	0,0529	2,8531	4,6930
		4300	2,9639	0,0332	4,7269	3,6411

Annexe 23: Indicateurs scalaires essai 223 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
231	6	1300	3,0411	0,0231	1,1458	3,9493
		2300	2,8894	0,0059	2,5758	4,4133
		4300	2,9410	-0,0085	4,9472	4,1839
	12	1300	3,0504	0,0343	1,2989	4,3463
		2300	2,9026	0,0449	2,6457	3,5372
		4300	2,8972	-0,0168	5,0277	3,6295

Annexe 24: Indicateurs scalaires essai 231 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
232	6	1300	2,8402	0,0102	1,3473	3,7595
		2300	2,4706	-0,0320	3,5231	3,0514
		4300	2,8847	-0,0529	5,0707	3,5208
	12	1300	2,7901	-0,1010	1,5433	3,8679
		2300	2,4459	-0,0003	3,4790	3,0387
		4300	2,8267	-0,0396	5,2675	3,6869

Annexe 25: Indicateurs scalaires essai 232 acc1

acc1	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
233	6	1300	2,7621	0,0386	1,4189	3,4479
		2300	2,5185	-0,0131	3,3663	3,3687
		4300	3,0099	-0,0166	4,6583	4,3003
	12	1300	2,7339	0,0361	1,4362	3,7329
		2300	2,5455	0,0293	3,2253	3,0576
		4300	2,9015	-0,0367	5,0551	3,6427

Annexe 26: Indicateurs scalaires essai 233 acc1

7.2.2. Acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
111	6	1300	2,8026	0,0424	0,9731	3,7103
		2300	2,6869	0,0032	2,3497	4,2971
		4300	2,7801	0,0094	5,4486	3,2313
	12	1300	2,9050	0,0601	1,0790	4,3326
		2300	2,7281	0,0330	2,5748	3,9216
		4300	2,7462	-0,0121	5,4879	3,3437

Annexe 27: Indicateurs scalaires essai 111 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
112	6	1300	2,7868	0,0184	1,1640	4,0458
		2300	2,6596	-0,0108	3,4574	3,7394
		4300	2,6272	-0,0253	6,5787	3,6540
	12	1300	2,6992	-0,0040	1,1942	3,9085
		2300	2,6398	0,0278	3,5520	3,2886
		4300	2,6030	0,0202	6,8725	3,6730

Annexe 28: Indicateurs scalaires essai 112 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
113	6	1300	2,7939	0,0587	1,0819	3,7040
		2300	2,6744	0,0379	3,2661	3,7440
		4300	2,7173	-0,0816	5,8761	3,3942
	12	1300	2,7910	0,0364	1,0439	3,7070
		2300	2,7117	0,0588	3,1463	3,2878
		4300	2,7296	-0,0829	5,5743	3,1821

Annexe 29: Indicateurs scalaires essai 113 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
121	6	1300	3,3519	0,0547	1,1904	4,8825
		2300	3,4589	-0,0378	3,5030	4,5734
		4300	2,9929	0,0466	7,8908	3,8868
	12	1300	3,4724	0,0662	1,2968	4,7018
		2300	3,3559	-0,0238	3,2690	3,7876
		4300	2,8684	0,0202	7,9077	3,9197

Annexe 30: Indicateurs scalaires essai 121 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
122	6	1300	3,1525	0,0371	1,2355	5,1838
		2300	3,2272	-0,0691	3,5870	4,4242
		4300	2,8961	0,0113	7,7862	3,9856
	12	1300	3,0266	0,0639	1,2425	4,1412
		2300	3,1892	-0,0072	3,3913	4,3217
		4300	2,8298	0,0281	7,6658	3,5351

Annexe 31: Indicateurs scalaires essai 122 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
123	6	1300	2,8867	0,0395	1,4240	4,2885
		2300	2,7965	-0,0122	3,9061	3,9180
		4300	2,7169	0,0113	7,6243	3,3979
	12	1300	2,8399	0,0227	1,2515	4,0734
		2300	2,7656	-0,0248	3,6028	3,4862
		4300	2,7742	0,0209	7,2529	3,4253

Annexe 32: Indicateurs scalaires essai 123 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
131	6	1300	2,8372	0,0462	0,9727	3,9049
		2300	2,8331	-0,0079	2,6762	3,4611
		4300	3,0285	0,0024	6,4838	3,8932
	12	1300	3,0266	0,0194	1,0903	3,8456
		2300	2,8375	0,0542	2,6493	3,5241
		4300	3,0207	-0,0108	6,5618	3,8469

Annexe 33: Indicateurs scalaires essai 131 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
132	6	1300	2,8307	0,0193	1,2073	3,7827
		2300	2,7269	-0,0001	3,6069	4,0676
		4300	2,8765	0,0259	8,6449	4,0924
	12	1300	2,7989	0,0311	1,2543	4,3602
		2300	2,7413	-0,0376	3,5287	3,8355
		4300	2,9712	0,0259	8,3933	4,3945

Annexe 34: Indicateurs scalaires essai 132 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
133	6	1300	2,8306	0,0079	1,0710	3,8450
		2300	2,7547	0,0136	3,4905	3,8484
		4300	3,0614	0,0212	8,0231	3,6886
	12	1300	2,8551	0,0450	1,0044	3,8062
		2300	2,8567	0,0090	3,2759	3,7018
		4300	3,1821	0,0143	7,5540	3,7941

Annexe 35: Indicateurs scalaires essai 133 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
211	6	1300	8,2671	-0,6038	0,8453	4,7599
		2300	10,8173	-0,3740	2,6359	6,6899
		4300	7,0242	0,0096	24,6930	4,0891
	12	1300	6,4886	-0,3714	0,8951	4,7405
		2300	10,5166	-0,2727	2,6956	7,1733
		4300	7,9114	-0,2450	9,3966	5,0183

Annexe 36: Indicateurs scalaires essai 211 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
212	6	1300	3,9332	-0,1825	1,1570	4,7726
		2300	6,9942	-0,1550	3,0751	6,3890
		4300	6,9052	-0,0144	28,5926	3,5314
	12	1300	4,2031	-0,2252	1,1246	3,7786
		2300	8,6111	-0,2298	2,8646	6,4335
		4300	6,7935	-0,2141	10,0172	5,2497

Annexe 37: Indicateurs scalaires essai 212 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
213	6	1300	5,2944	-0,2828	1,0794	4,7738
		2300	7,2670	-0,1596	3,5965	6,0122
		4300	7,1849	-0,2804	10,2163	5,4122
	12	1300	6,5925	-0,4255	0,9484	5,5555
		2300	8,2254	-0,1547	3,2701	7,0708
		4300	7,4292	-0,2302	9,4849	5,5833

Annexe 38: Indicateurs scalaires essai 213 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
221	6	1300	6,0222	-0,1543	1,3113	5,2776
		2300	4,7822	-0,1046	3,4203	5,0191
		4300	8,3544	-0,0511	10,4033	6,2838
	12	1300	5,0372	-0,0970	1,4195	5,2044
		2300	4,8813	-0,0890	3,4948	4,7572
		4300	8,8848	0,0105	10,4174	6,5160

Annexe 39: Indicateurs scalaires essai 221 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
222	6	1300	5,3765	-0,1051	1,4530	4,9724
		2300	4,2646	-0,1083	3,5454	4,5376
		4300	8,9872	-0,0538	10,2183	7,0050
	12	1300	4,2103	-0,0189	1,5885	5,1421
		2300	4,7701	-0,1088	3,3934	5,0624
		4300	9,0296	-0,0226	10,3347	6,8096

Annexe 40: Indicateurs scalaires essai 222 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
223	6	1300	5,5844	-0,0850	1,3683	5,6395
		2300	4,4650	-0,0987	3,5106	5,2138
		4300	10,5599	-0,0547	9,5530	7,2652
	12	1300	5,6723	-0,0793	1,2655	5,4614
		2300	4,9167	-0,0895	3,3772	6,5108
		4300	10,8187	-0,0794	9,3829	7,3995

Annexe 41: Indicateurs scalaires essai 223 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
231	6	1300	12,8457	-0,8723	0,8029	6,4113
		2300	15,1384	-0,6474	2,5226	7,1548
		4300	11,4229	-0,2279	7,7103	6,3071
	12	1300	7,3613	-0,3164	0,8782	5,6937
		2300	10,9935	-0,2452	2,4677	6,4634
		4300	10,0405	-0,1043	7,7796	6,4895

Annexe 42: Indicateurs scalaires essai 231 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
232	6	1300	7,4091	-0,4538	1,0683	6,2767
		2300	7,2821	-0,3172	3,3681	5,9673
		4300	6,1030	-0,1108	9,3738	5,3858
	12	1300	5,6419	-0,1966	1,1517	6,1744
		2300	6,4594	-0,1621	3,2777	5,8309
		4300	6,9722	-0,0440	8,7467	5,6019

Annexe 43: Indicateurs scalaires essai 232 acc2

acc2	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
233	6	1300	8,4118	-0,5108	0,9401	6,6915
		2300	6,9556	-0,1834	2,8468	7,4853
		4300	9,3723	-0,1575	7,5309	6,2199
	12	1300	9,0673	-0,4273	0,7893	7,1716
		2300	7,8794	-0,1273	2,4606	6,6732
		4300	9,0226	0,0179	7,2825	6,6843

Annexe 44: Indicateurs scalaires essai 233 acc2

7.2.3. Acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
111	6	1300	2,9670	0,0042	0,7212	3,6379
		2300	2,8204	0,0213	1,9919	3,8328
		4300	3,0238	-0,0218	1,7338	3,6003
	12	1300	3,1533	0,0091	0,7920	4,0411
		2300	2,9423	0,0130	2,4995	4,0327
		4300	3,0523	-0,0637	1,8446	3,9691

Annexe 45: Indicateurs scalaires essai 111 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
112	6	1300	3,0307	0,0767	0,7737	4,2242
		2300	2,8579	0,0229	2,5164	3,8687
		4300	2,8787	0,0792	2,5048	3,3441
	12	1300	2,9739	0,0313	0,8516	4,1624
		2300	2,7854	0,0688	2,1954	3,5717
		4300	2,6953	0,0985	2,8206	3,4036

Annexe 46: Indicateurs scalaires essai 112 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
113	6	1300	2,9333	0,1308	0,6813	3,8073
		2300	2,7389	-0,0301	2,1641	3,4457
		4300	2,7146	-0,0034	2,4760	3,8722
	12	1300	2,9247	0,0596	0,7416	3,8016
		2300	2,7198	-0,0548	2,0907	3,6372
		4300	2,7216	0,0412	2,3202	3,7307

Annexe 47 : Indicateurs scalaires essai 113 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
121	6	1300	16,5115	0,1336	2,1558	11,3595
		2300	6,6062	0,2258	4,9557	8,0018
		4300	8,1958	-0,1122	11,9697	6,1578
	12	1300	14,5335	0,1533	2,1668	13,8901
		2300	6,7357	0,2818	4,8227	7,5338
		4300	8,6611	-0,0936	11,8969	6,1101

Annexe 48: Indicateurs scalaires essai 121 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
122	6	1300	14,5244	0,1801	2,1278	10,5553
		2300	6,5271	0,2609	4,8424	6,6066
		4300	8,0520	-0,0537	11,5002	6,3022
	12	1300	14,1223	0,1593	2,1231	11,0016
		2300	6,4535	0,2614	4,7611	6,6703
		4300	8,5168	-0,0739	11,4310	6,4964

Annexe 49: Indicateurs scalaires essai 122 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
123	6	1300	16,5855	0,1966	2,0470	14,2403
		2300	7,1392	0,3183	4,5635	8,4145
		4300	8,4622	-0,0356	10,9748	6,1052
	12	1300	18,0264	0,0414	2,0087	12,4423
		2300	7,4317	0,3527	4,4891	8,4390
		4300	8,5280	-0,0233	10,9544	5,9173

Annexe 50: Indicateurs scalaires essai 123 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
131	6	1300	4,0441	0,0006	2,3513	5,8535
		2300	3,5437	0,0171	5,6515	4,4589
		4300	3,3036	-0,0137	10,9683	4,5949
	12	1300	3,9889	0,0149	2,3955	6,4915
		2300	3,2591	-0,0004	5,6383	4,2566
		4300	3,2908	-0,0155	10,8393	4,3540

Annexe 51: Indicateurs scalaires essai 131 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
132	6	1300	3,6452	-0,0186	2,2411	5,7270
		2300	3,2974	-0,0384	5,3522	4,7082
		4300	3,3371	-0,0275	10,4723	4,7480
	12	1300	3,7358	-0,0636	2,2422	6,2948
		2300	3,2460	0,0062	5,2399	4,3191
		4300	3,2350	-0,0062	10,3563	4,8665

Annexe 52: Indicateurs scalaires essai 132 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
133	6	1300	4,0441	0,0006	2,3513	5,8535
		2300	3,5437	0,0171	5,6515	4,4589
		4300	3,3036	-0,0137	10,9683	4,5949
	12	1300	3,9889	0,0149	2,3955	6,4915
		2300	3,2591	-0,0004	5,6383	4,2566
		4300	3,2908	-0,0155	10,8393	4,3540

Annexe 53: Indicateurs scalaires essai 133 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
211	6	1300	3,0322	0,0395	0,7278	3,9882
		2300	2,9571	0,0233	2,2861	4,4090
		4300	3,0867	-0,0089	2,7398	3,6790
	12	1300	3,2503	-0,0161	0,8227	4,2204
		2300	2,8511	0,0223	1,9392	3,8818
		4300	3,6203	0,0144	1,4769	4,1867

Annexe 54: Indicateurs scalaires essai 211 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
212	6	1300	3,0421	0,0231	0,9179	4,1633
		2300	2,9332	0,0066	1,7888	4,2342
		4300	3,1059	0,0200	25,3982	3,7691
	12	1300	2,9760	0,0202	0,9600	3,9693
		2300	2,9010	-0,0191	1,6959	4,7223
		4300	3,0087	-0,0059	8,5478	3,8405

Annexe 55: Indicateurs scalaires essai 212 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
213	6	1300	3,0898	-0,0144	0,6987	4,1423
		2300	2,8578	-0,0194	1,7653	3,7980
		4300	3,0503	0,0204	7,2770	4,0929
	12	1300	2,9343	-0,0102	0,7308	4,5075
		2300	2,8414	-0,0257	1,6633	4,1411
		4300	3,0930	-0,0189	5,7193	4,0721

Annexe 56: Indicateurs scalaires essai 213 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
221	6	1300	22,1303	-0,1216	3,1124	10,9149
		2300	6,4996	0,0592	7,8960	6,3555
		4300	6,2071	0,0082	18,2987	5,9386
	12	1300	21,8380	-0,1629	3,0247	11,2642
		2300	6,1418	0,0970	7,8213	7,3991
		4300	5,9375	0,0213	18,5727	5,5348

Annexe 57: Indicateurs scalaires essai 221 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
222	6	1300	18,3268	-0,2200	2,9101	11,5428
		2300	6,8246	-0,1104	8,3012	5,8630
		4300	5,9614	-0,0350	17,3669	5,8234
	12	1300	17,4398	-0,2418	2,9751	10,3068
		2300	6,6745	-0,0885	8,2663	6,6214
		4300	5,6413	-0,0352	17,7395	5,5382

Annexe 58: Indicateurs scalaires essai 222 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
223	6	1300	19,1312	-0,1440	2,8413	10,1903
		2300	6,6999	-0,0927	8,0815	6,8641
		4300	6,0974	0,0031	17,6949	5,6755
	12	1300	21,0021	-0,0040	2,8103	15,1826
		2300	6,6071	-0,0605	8,0164	6,0806
		4300	5,7401	0,0585	17,2435	5,6957

Annexe 59: Indicateurs scalaires essai 223 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
231	6	1300	6,2185	0,0612	1,5104	14,5017
		2300	3,6674	-0,0416	4,1502	4,8804
		4300	3,0850	-0,0076	13,3595	3,7725
	12	1300	3,5102	0,0078	1,4566	5,1763
		2300	3,5675	-0,0118	4,3888	5,5028
		4300	3,0893	-0,0110	13,3247	3,7823

Annexe 60: Indicateurs scalaires essai 231 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
232	6	1300	4,1393	-0,0472	2,0265	6,2562
		2300	3,2787	-0,0348	4,7620	5,1354
		4300	3,2738	-0,0492	10,2211	5,1372
	12	1300	3,5818	-0,0095	1,9458	5,4836
		2300	3,3751	-0,0125	4,8634	5,1239
		4300	3,2541	-0,0467	9,9593	4,5251

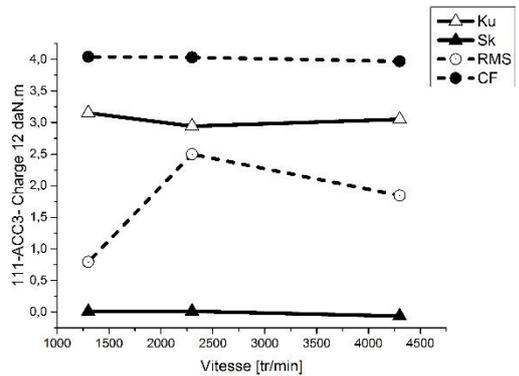
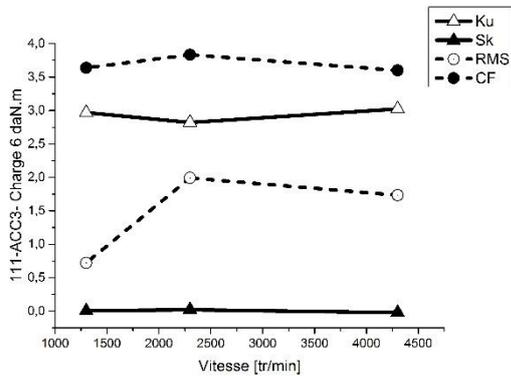
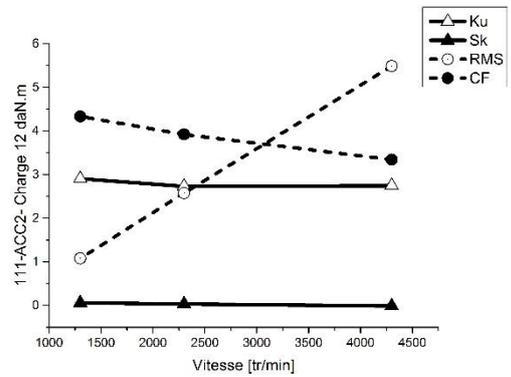
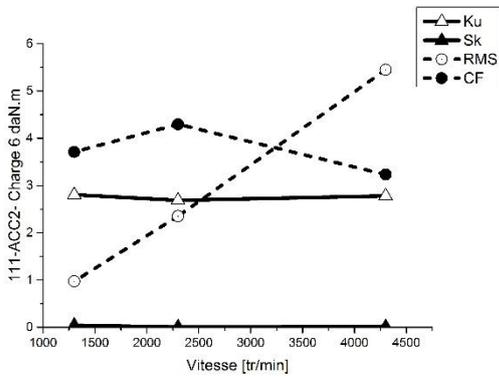
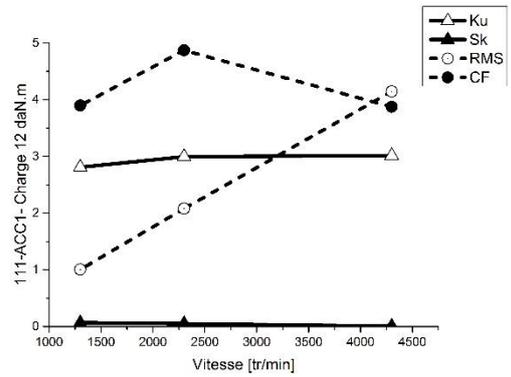
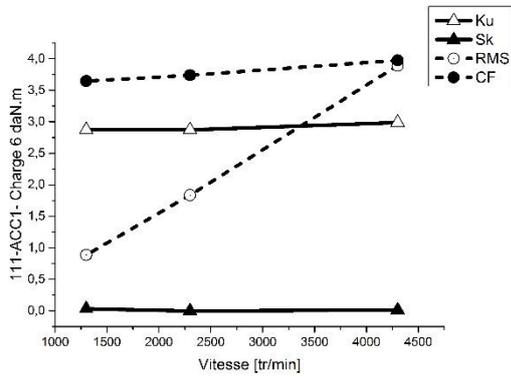
Annexe 61: Indicateurs scalaires essai 232 acc3

acc3	Charge [daN.m]	Vitesse [tr/min]	Ku	Sk	RMS	CF
233	6	1300	4,1627	-0,0581	1,9539	5,3460
		2300	3,3995	-0,0344	4,6614	5,2318
		4300	3,3761	-0,0153	9,5251	4,6603
	12	1300	5,0479	-0,0772	1,9383	6,1061
		2300	3,5414	-0,0645	4,6572	4,5459
		4300	3,4158	-0,0010	9,2597	4,2958

Annexe 62: Indicateurs scalaires essai 233 acc3

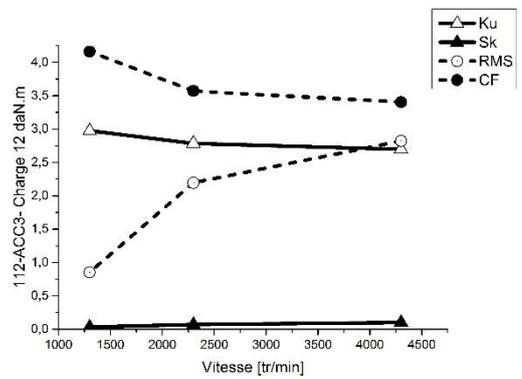
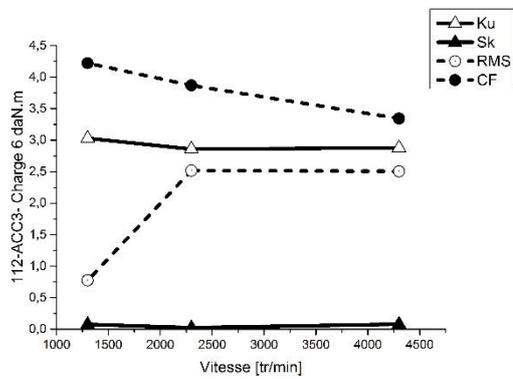
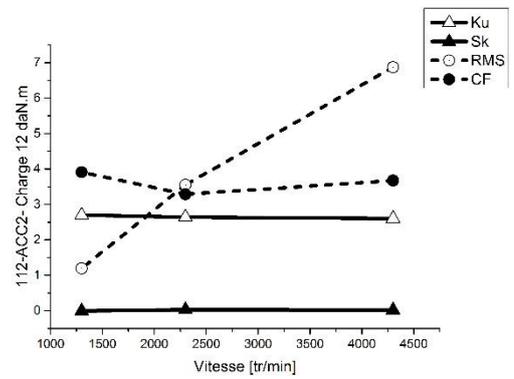
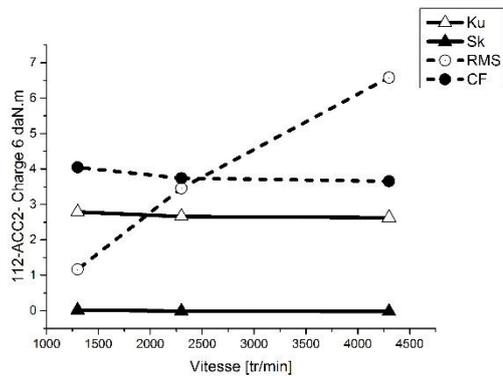
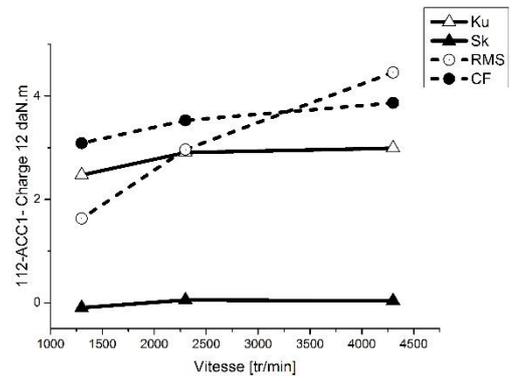
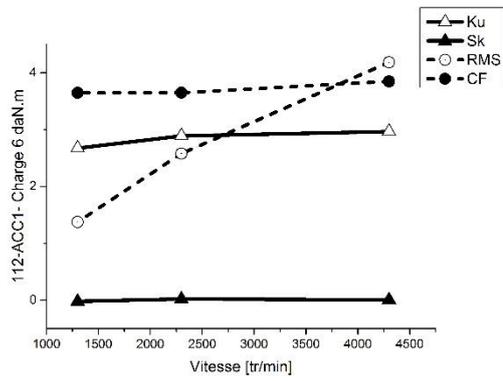
7.3. Variation des indicateurs

1- Test 111 :



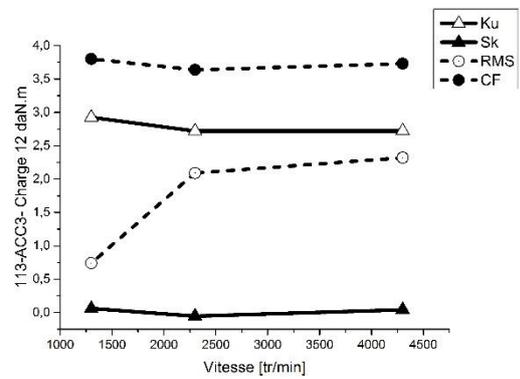
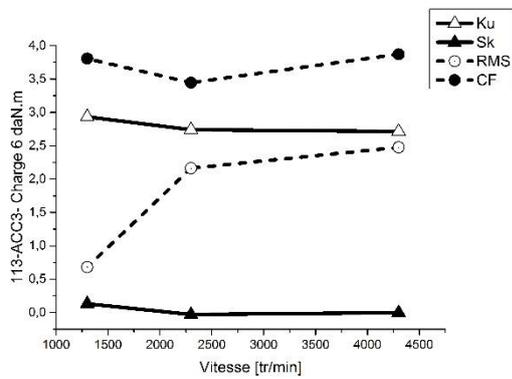
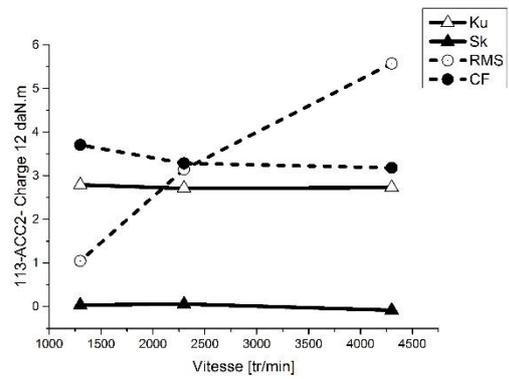
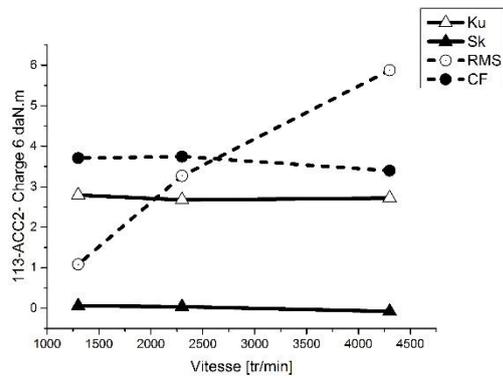
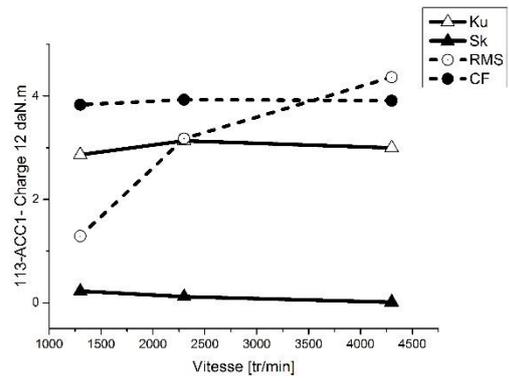
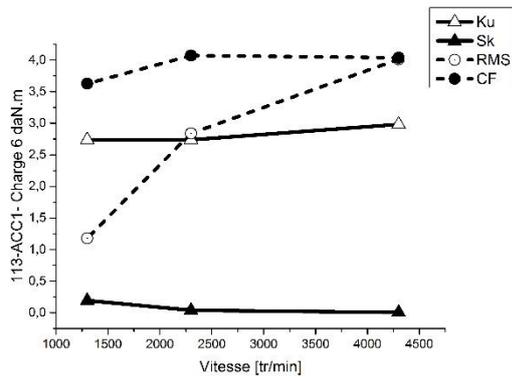
Annexe 63: Variation des indicateurs Test 111

2- Test 112 :



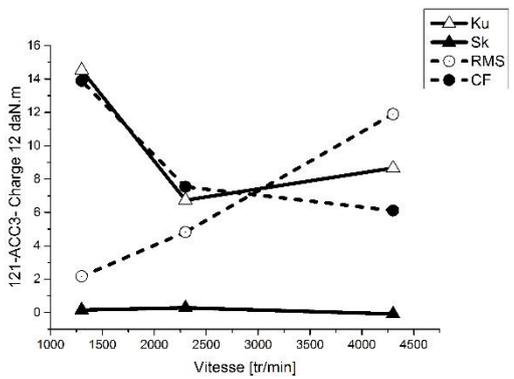
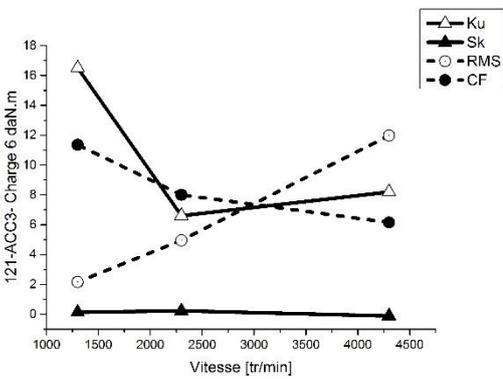
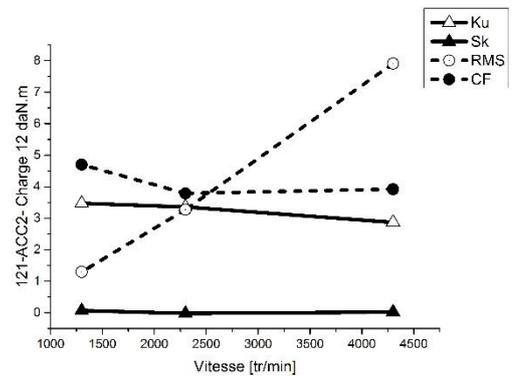
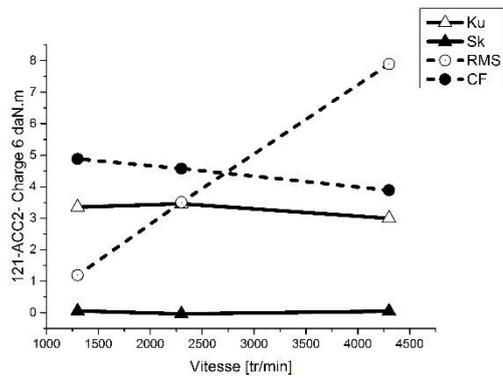
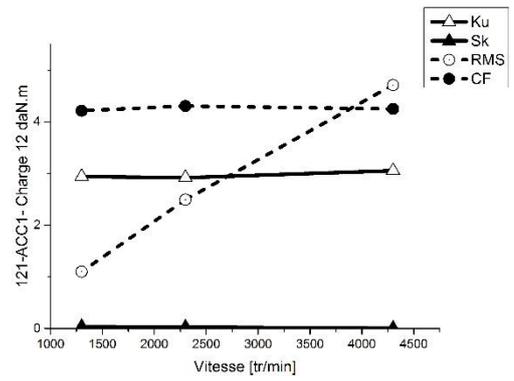
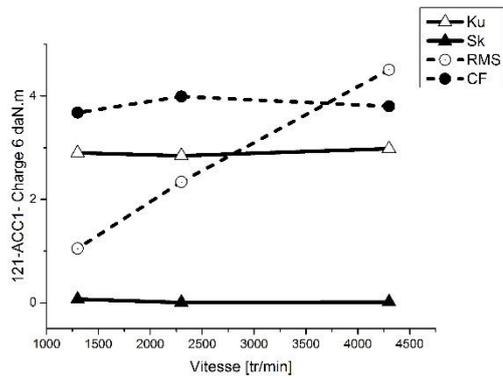
Annexe 64: Variation des indicateurs Test 112

3- Test 113 :



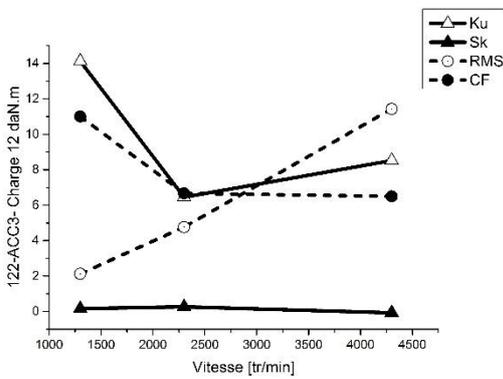
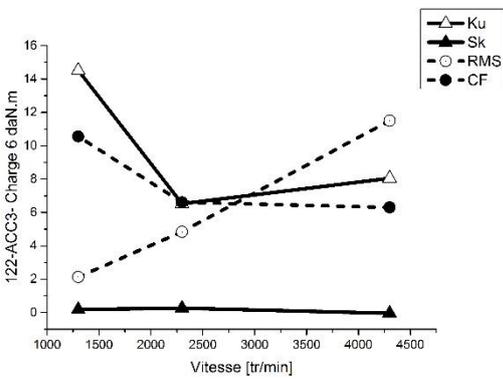
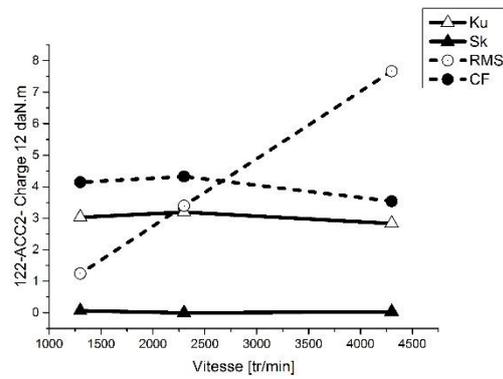
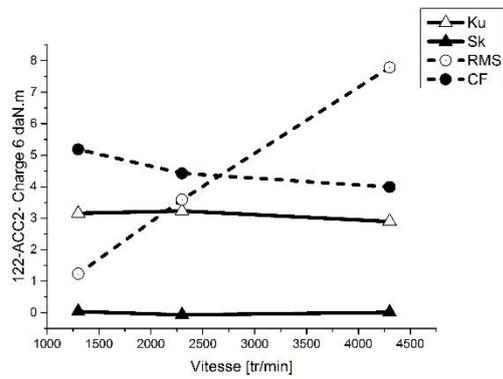
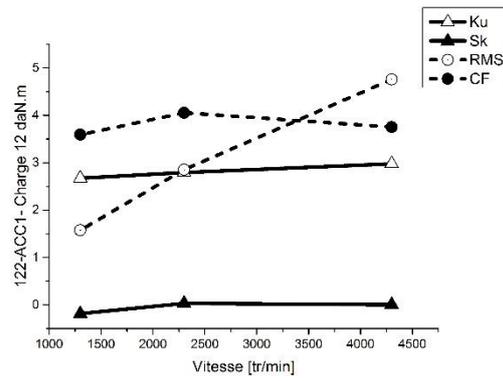
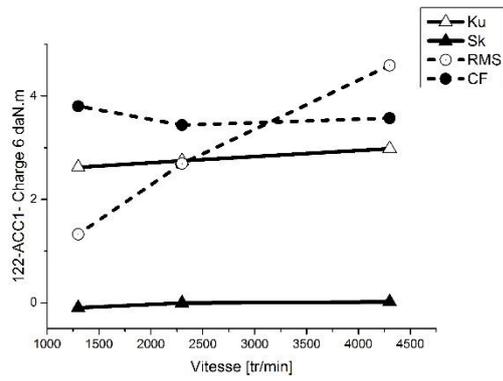
Annexe 65: Variation des indicateurs Test 113

4- Test 121 :



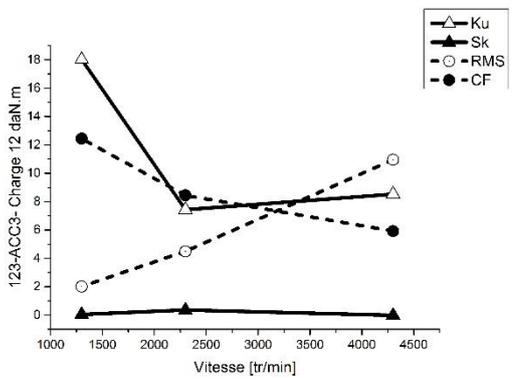
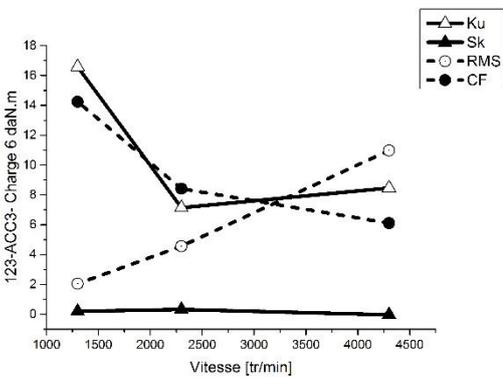
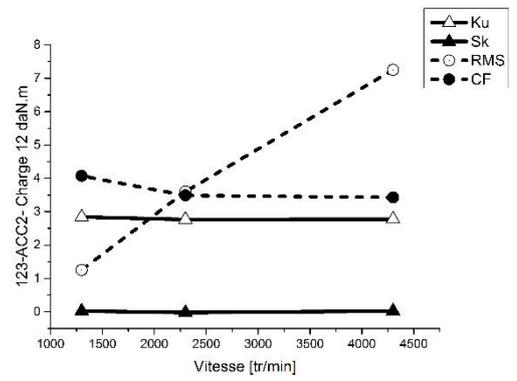
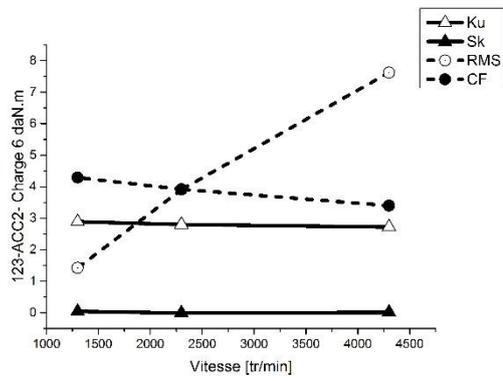
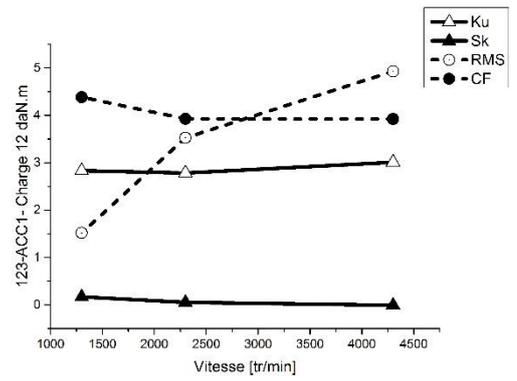
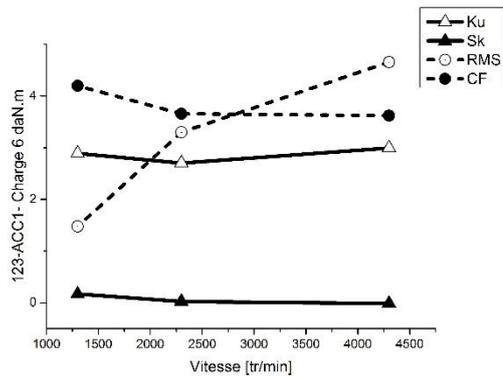
Annexe 66: Variation des indicateurs Test 121

5- Test 122 :



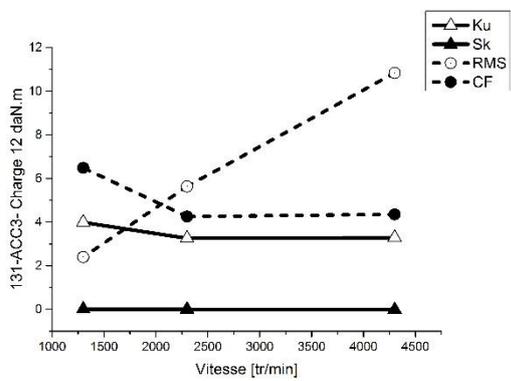
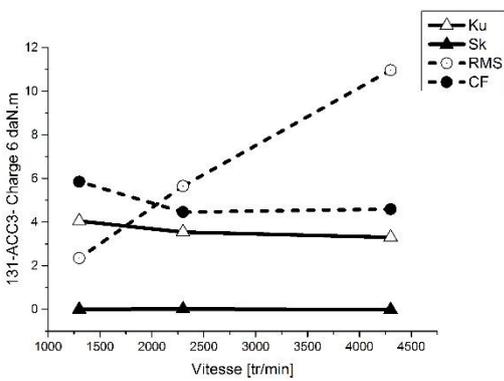
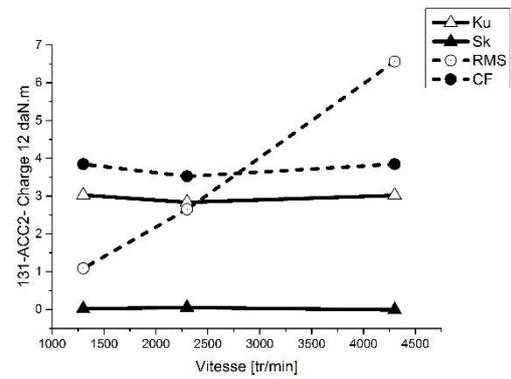
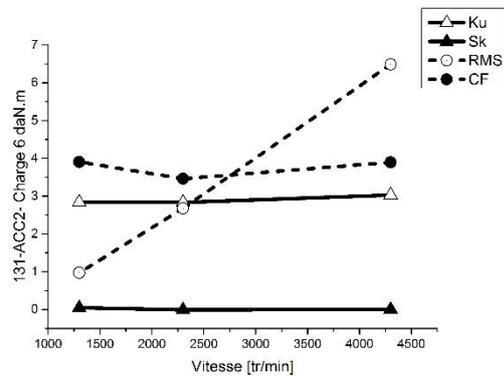
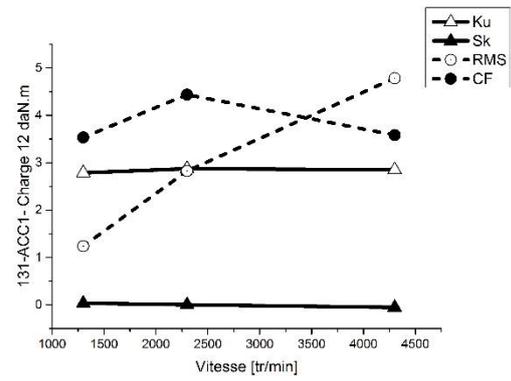
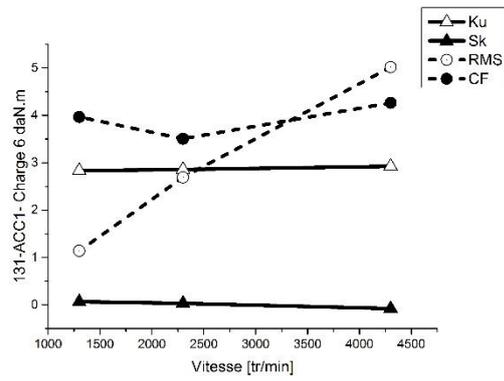
Annexe 67: Variation des indicateurs Test 122

6- Test 123 :



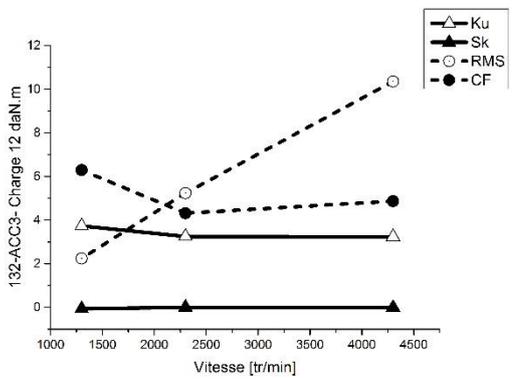
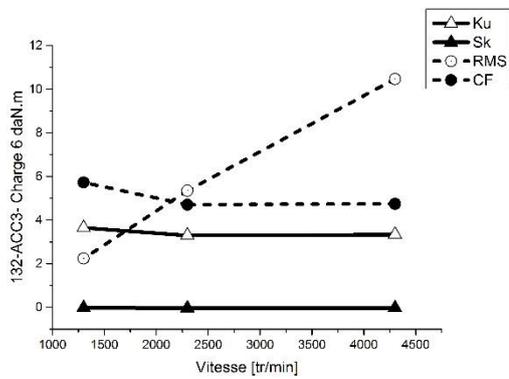
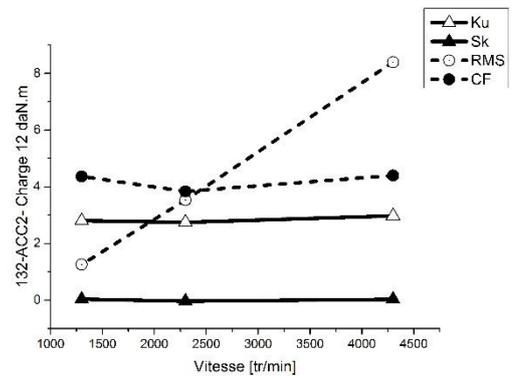
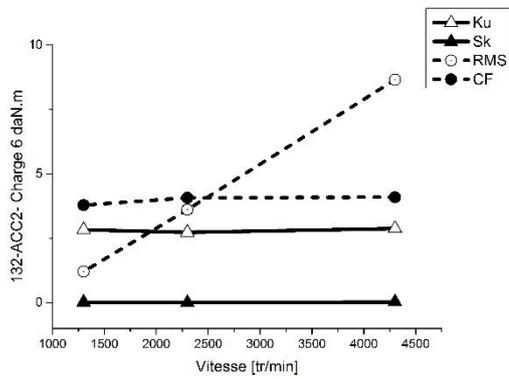
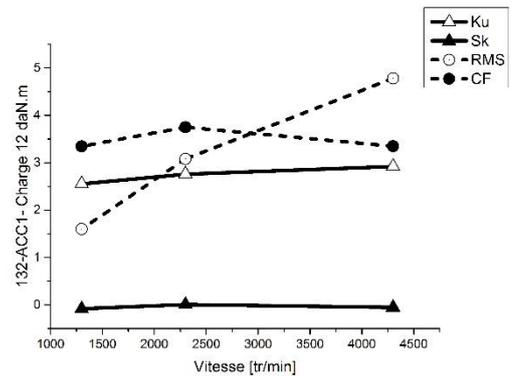
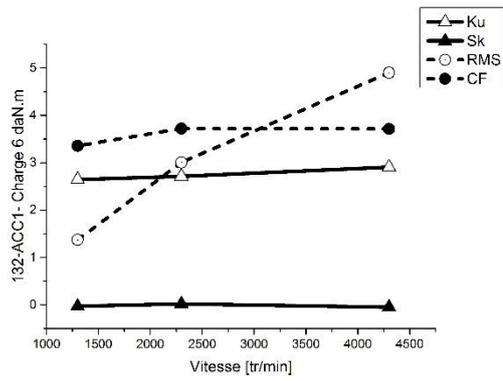
Annexe 68: Variation des indicateurs Test 123

7- Test 131 :



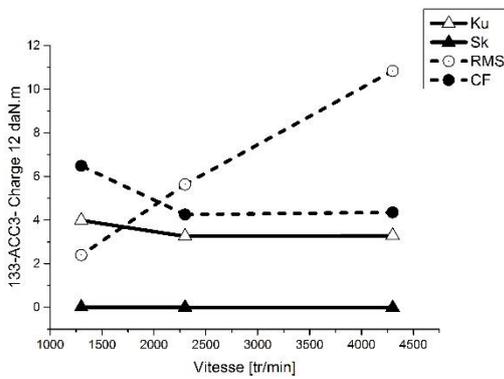
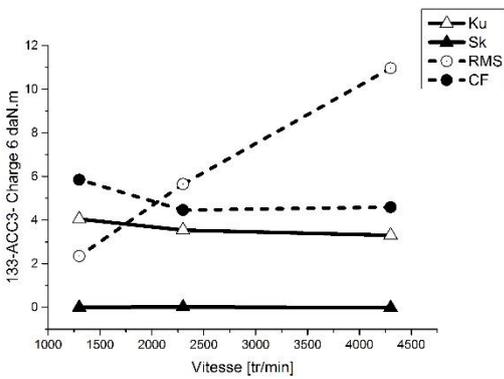
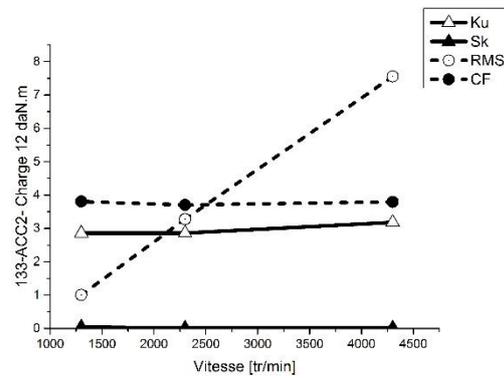
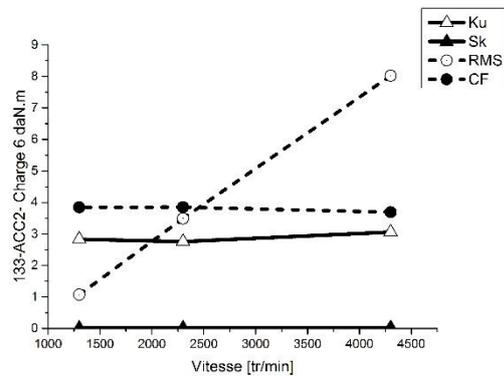
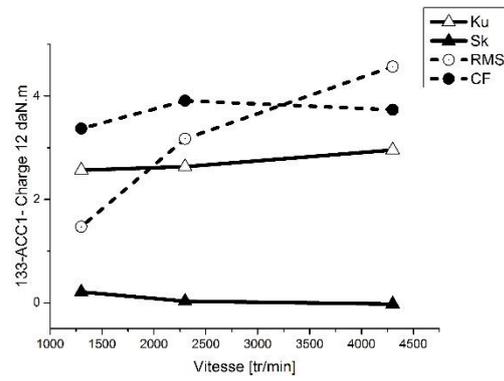
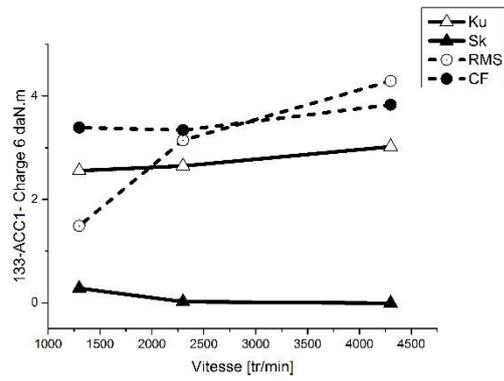
Annexe 69: Variation des indicateurs Test 131

8- Test 132 :



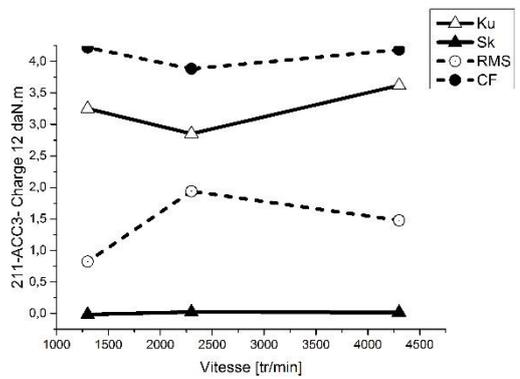
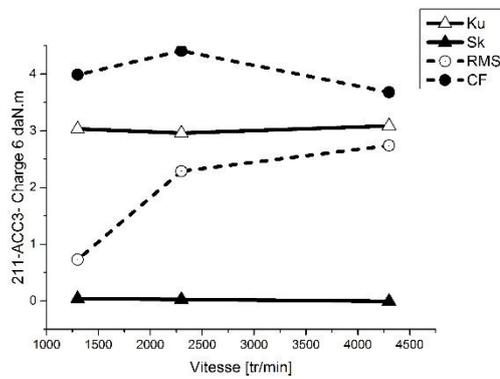
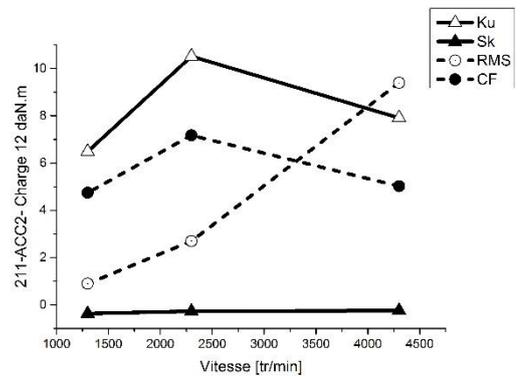
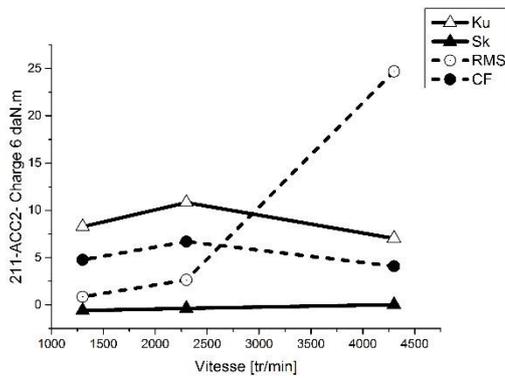
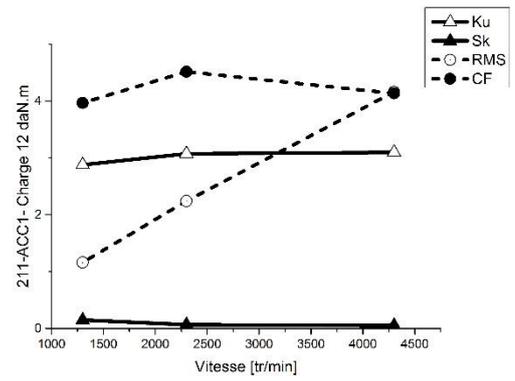
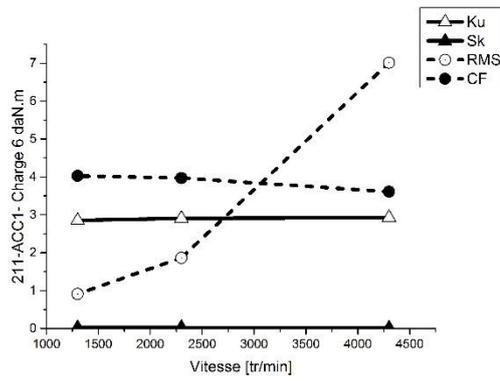
Annexe 70: Variation des indicateurs Test 132

9- Test 133 :



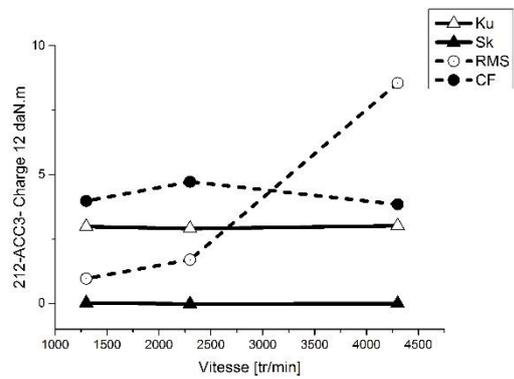
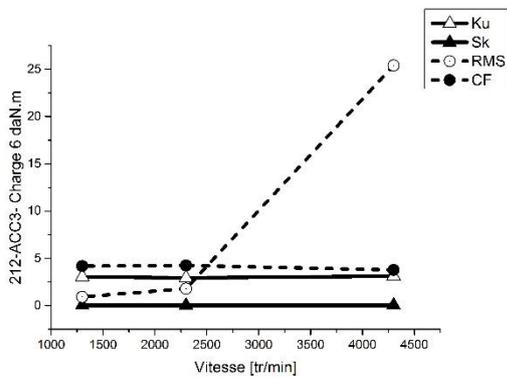
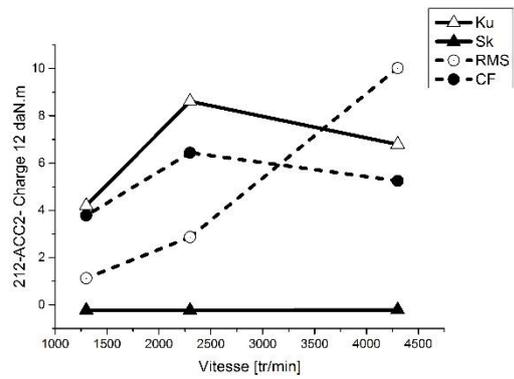
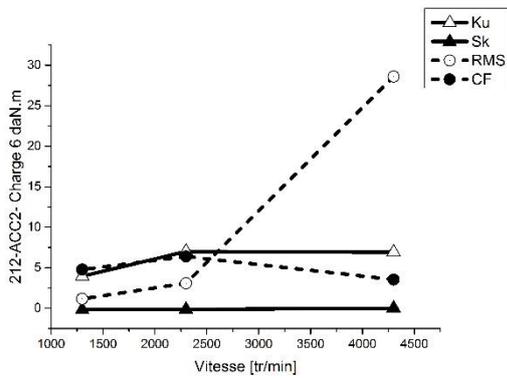
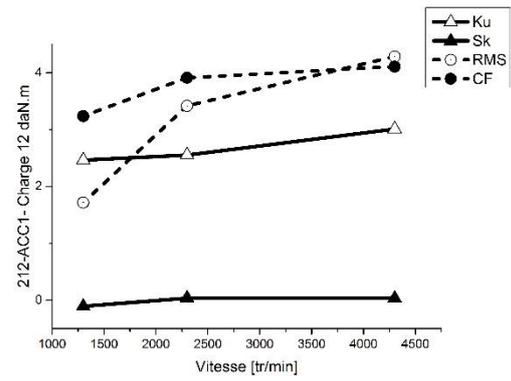
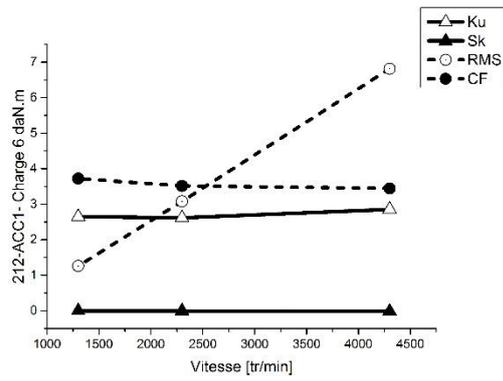
Annexe 71: Variation des indicateurs Test 133

10-Test 211 :



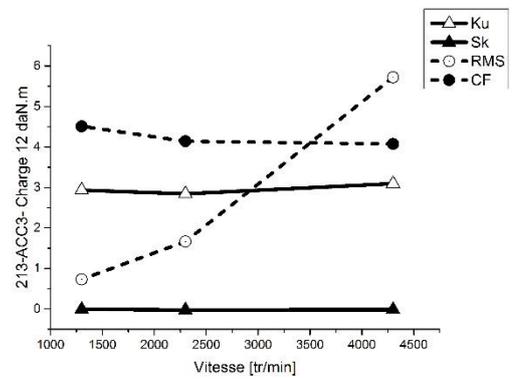
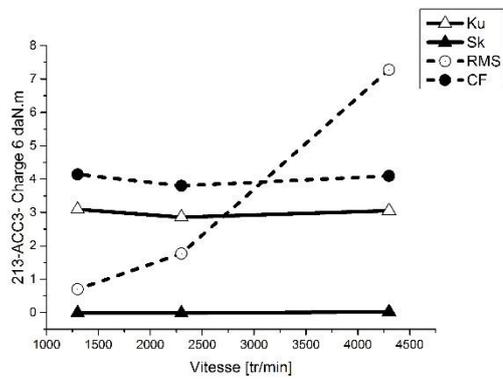
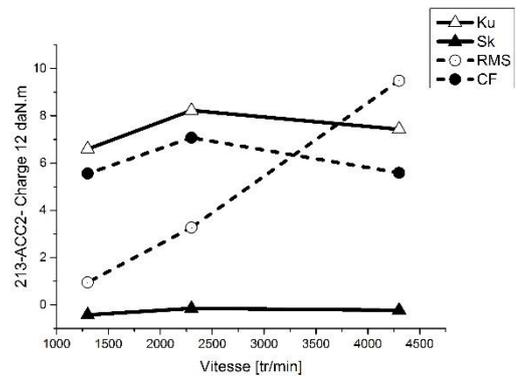
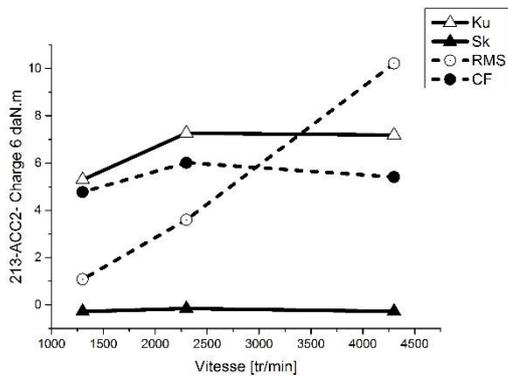
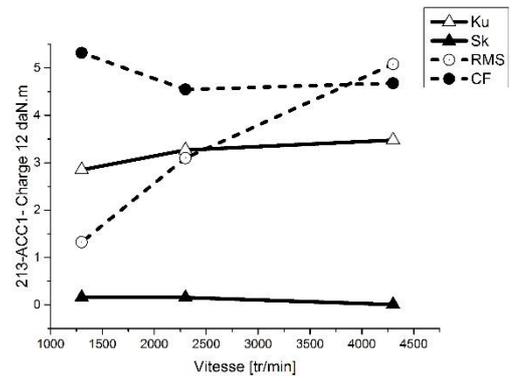
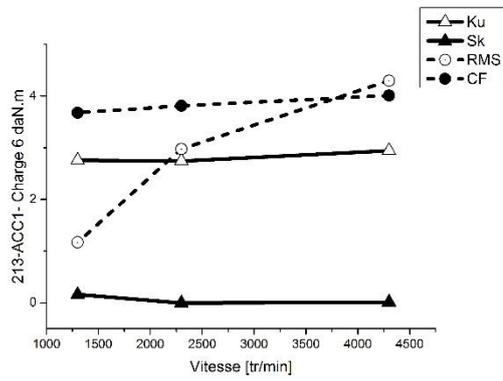
Annexe 72: Variation des indicateurs Test 211

11-Test 212 :



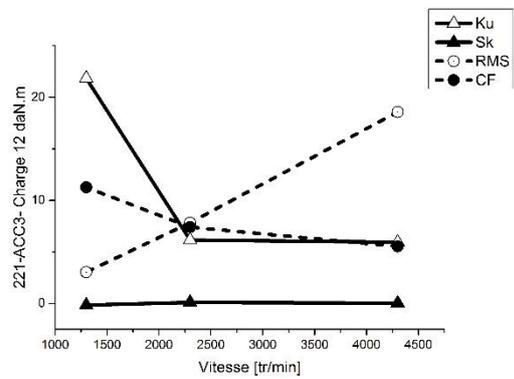
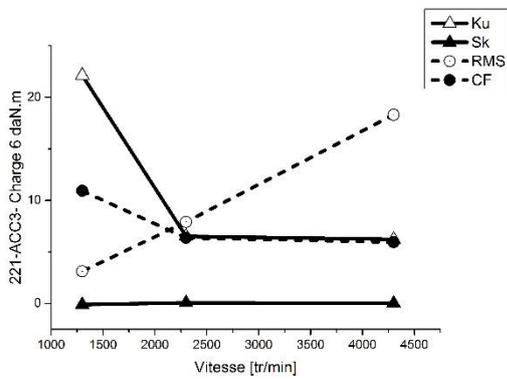
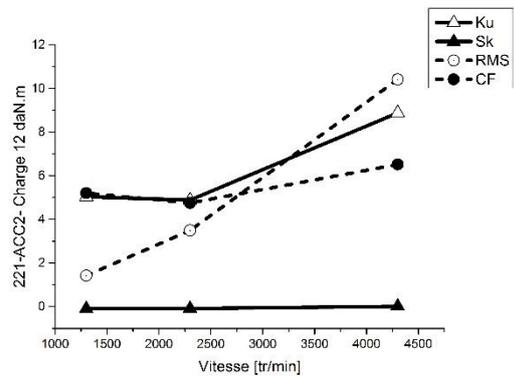
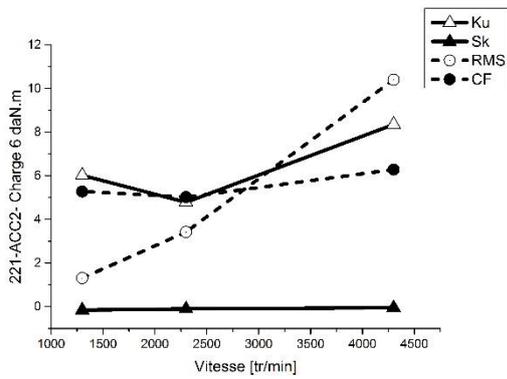
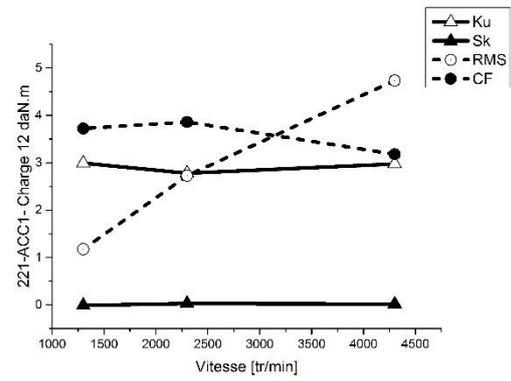
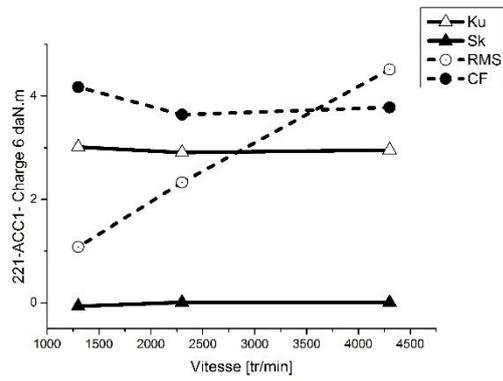
Annexe 73: Variation des indicateurs Test 212

12-Test 213 :



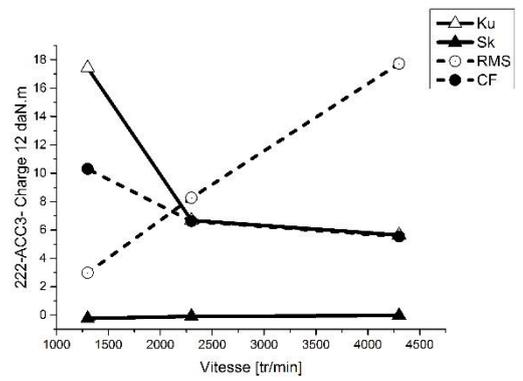
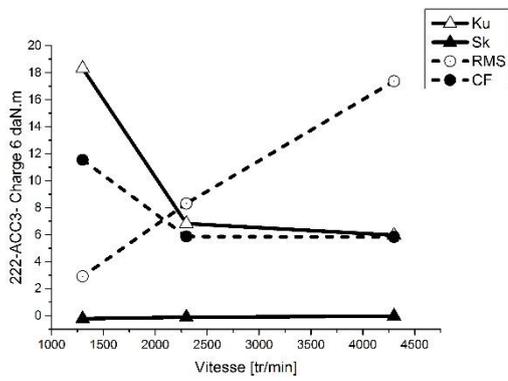
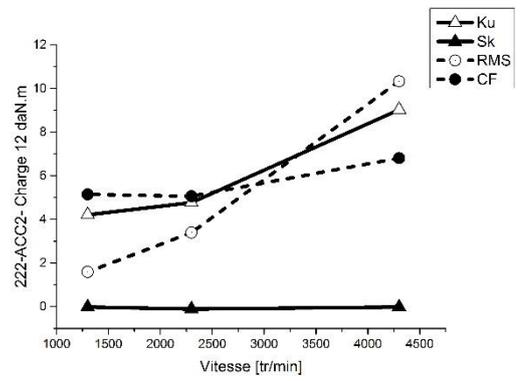
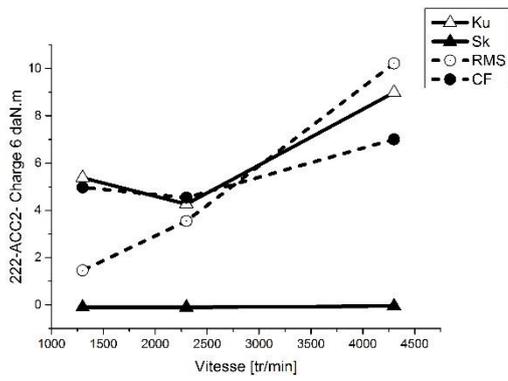
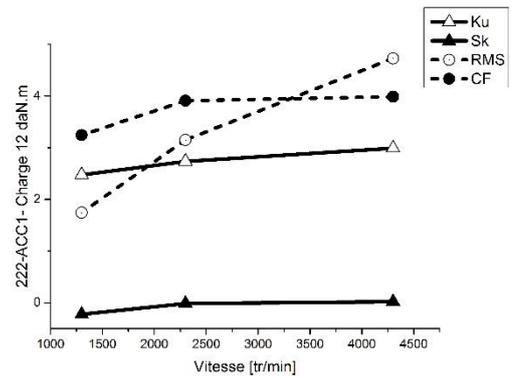
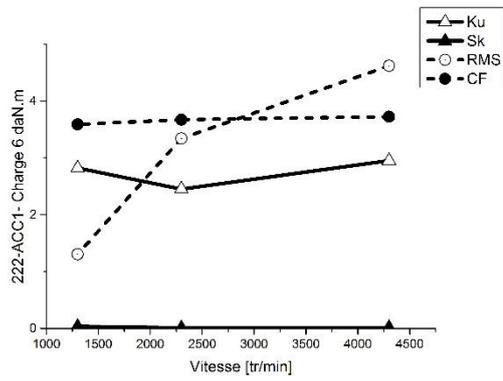
Annexe 74: Variation des indicateurs Test 213

13-Test 221:



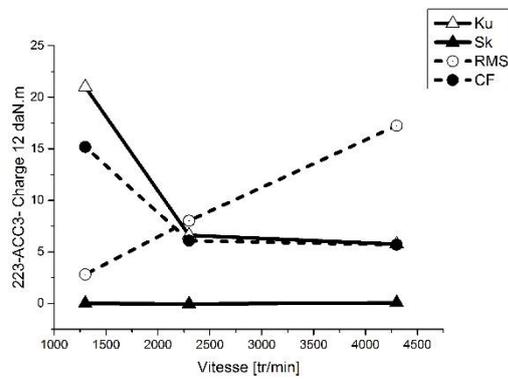
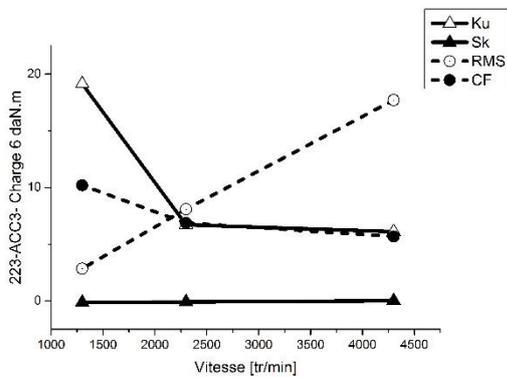
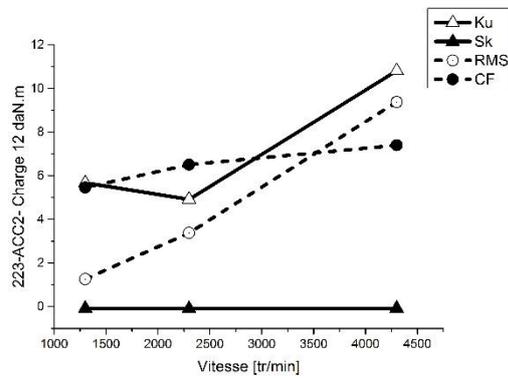
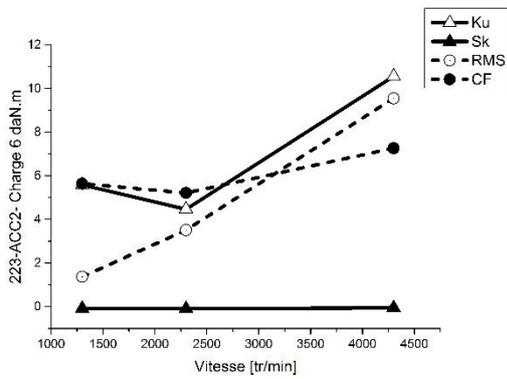
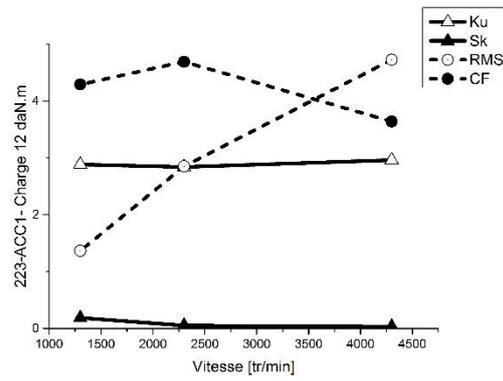
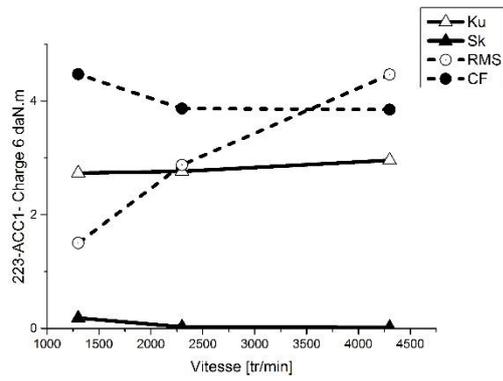
Annexe 75: Variation des indicateurs Test 221

14-Test 222 :



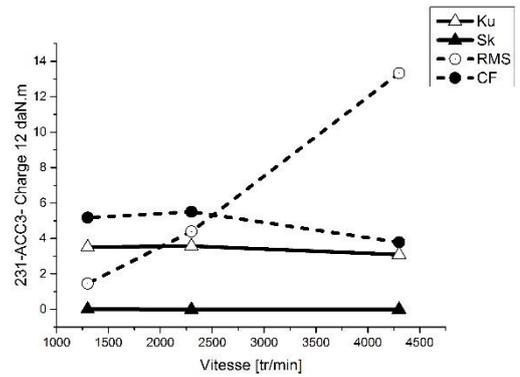
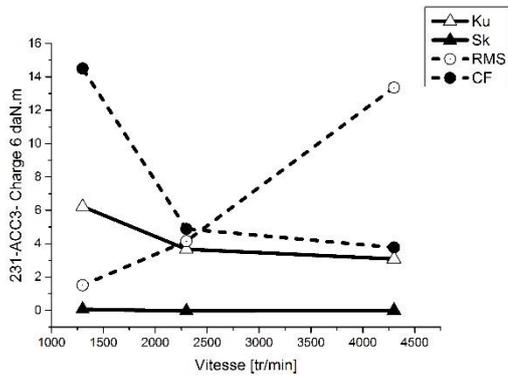
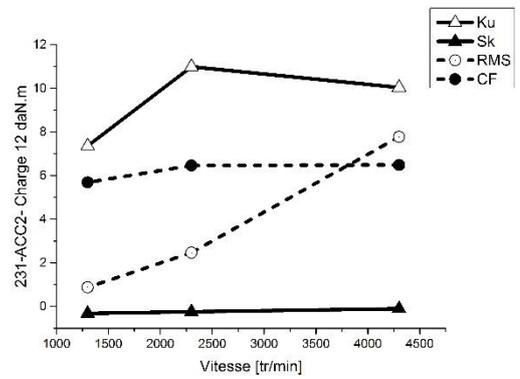
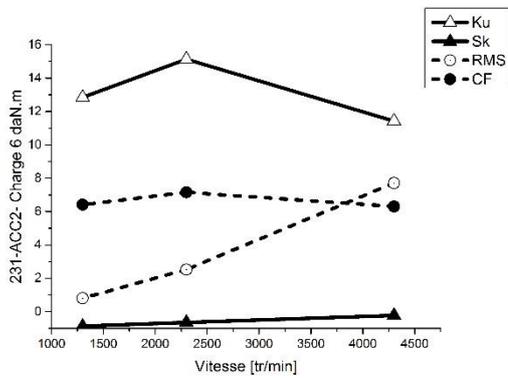
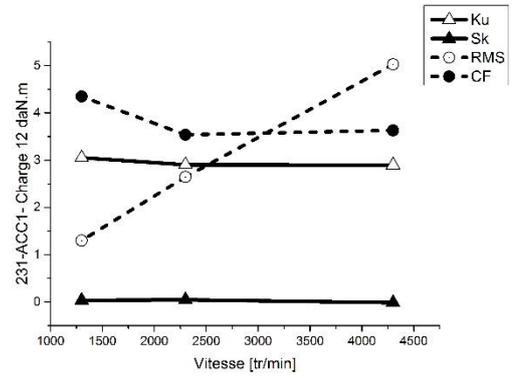
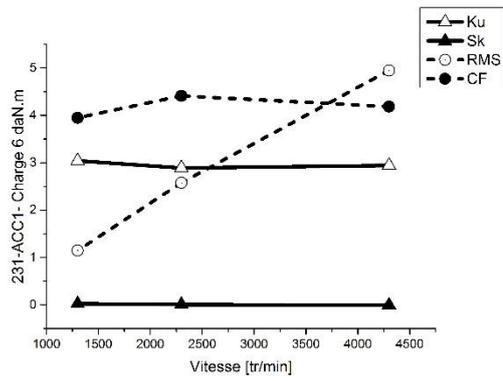
Annexe 76: Variation des indicateurs Test 222

15-Test 223 :



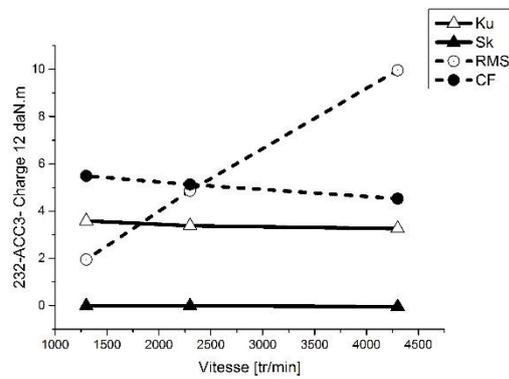
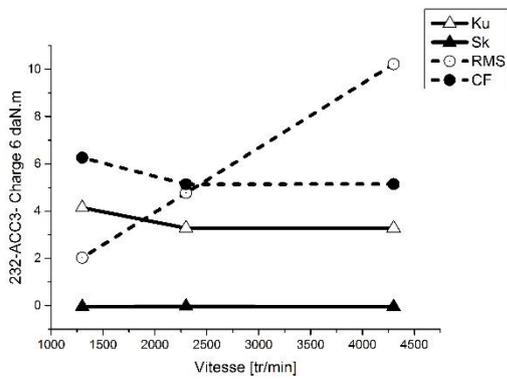
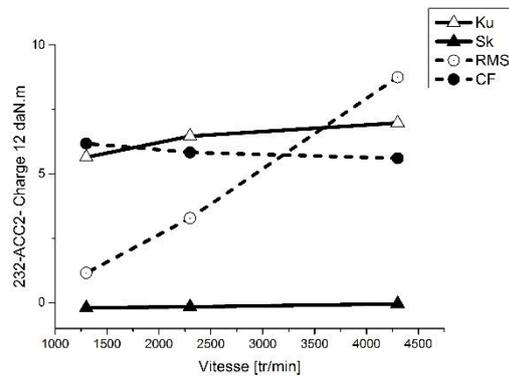
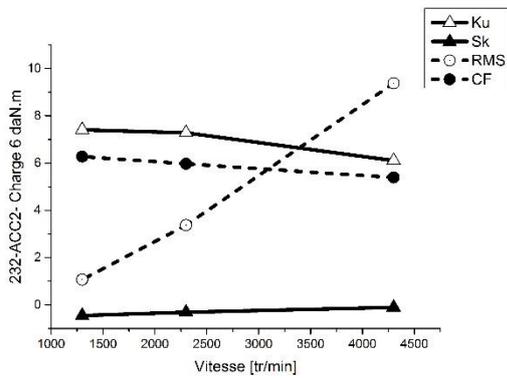
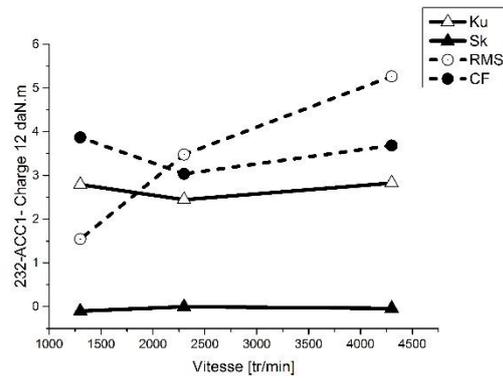
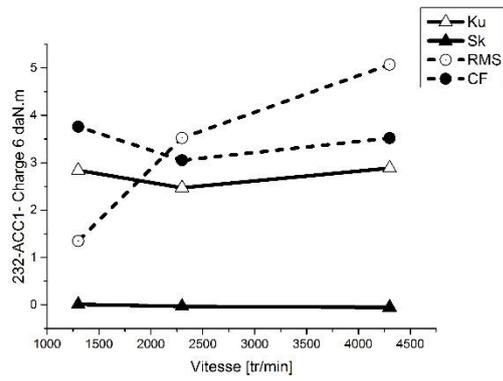
Annexe 77: Variation des indicateurs Test 223

16-Test 231 :



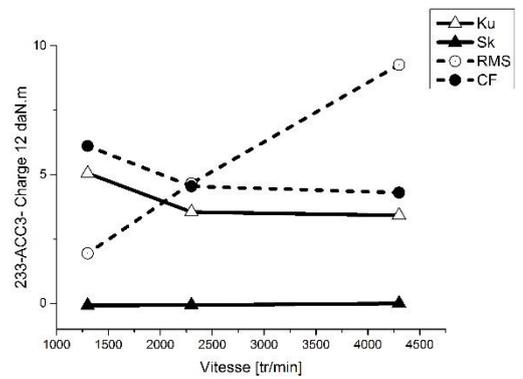
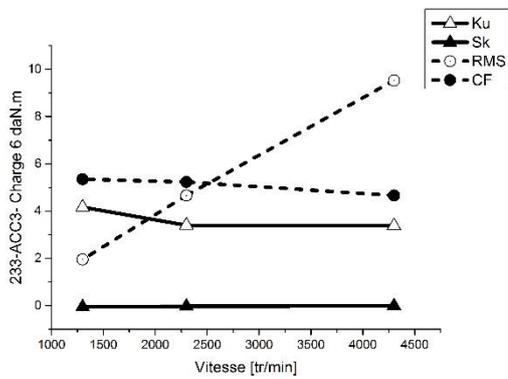
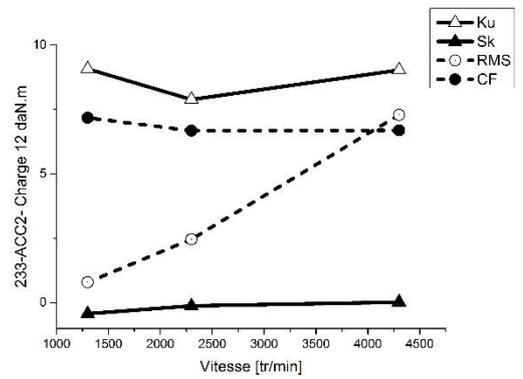
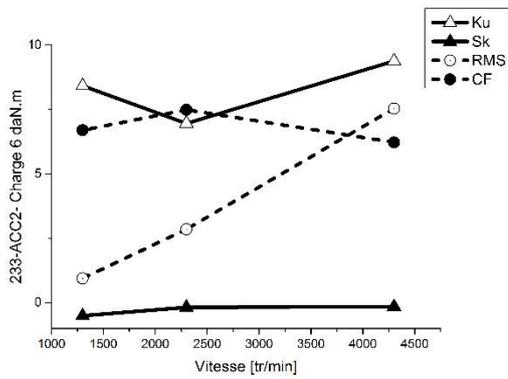
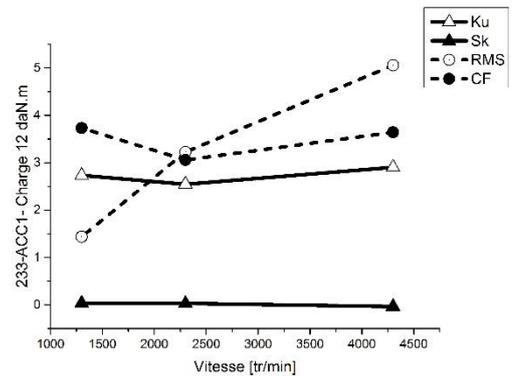
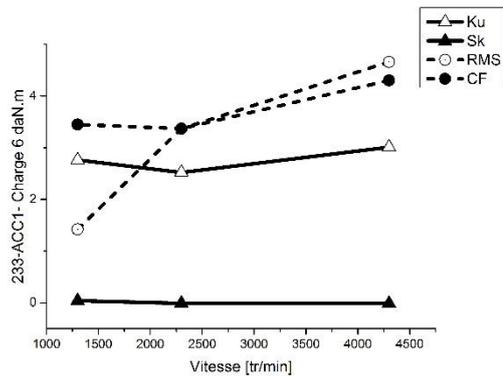
Annexe 78: Variation des indicateurs Test 231

17-Test 232 :



Annexe 79: Variation des indicateurs Test 232

18-Test 233 :



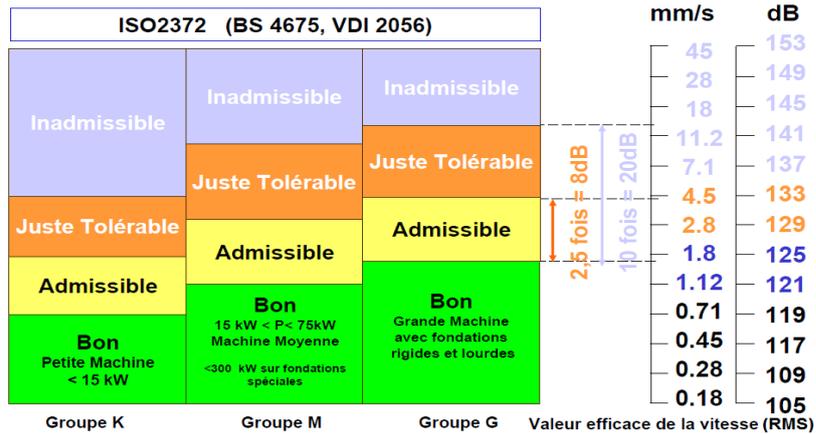
Annexe 80: Variation des indicateurs Test 233

7.4. Interface utilisateur Matroule



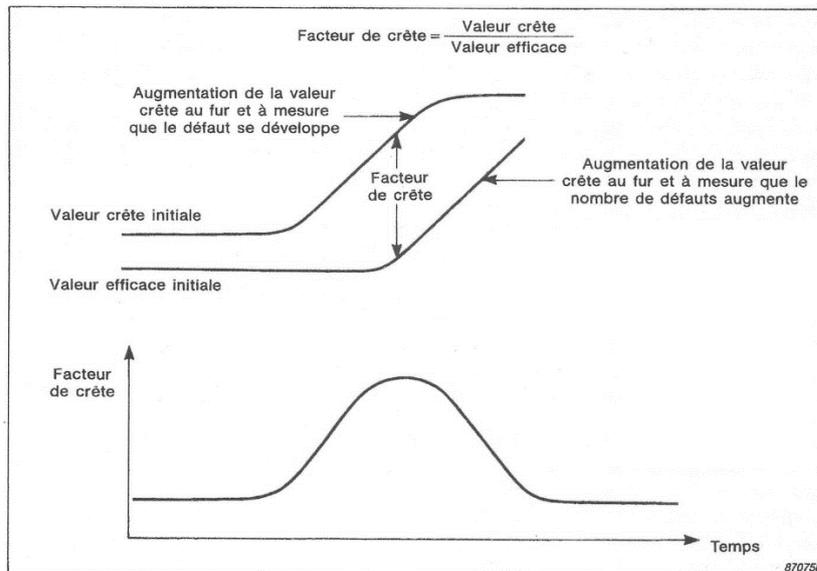
Annexe 81: Interface utilisateur Matroule

7.5. Valeurs normalisées du Niveau vibratoire, RMS et CF



Niveaux vibratoires	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Amplitude efficace de la Vitesse Vibratoire (mm/s rms)	28	18	11.2	7.1
Bande passante adaptée au type de la machine	4.5	2.8	1.8	0.71
	D	D	D	D
	C	C	C	C
	B	B	B	B
	A	A	A	A

Niveaux vibratoires admissibles Norme ISO 10816-2 Turbo alternateurs – Puissance supérieure à 50 MW			
Amplitude efficace de la Vitesse Vibratoire en mm/s eff dans la bande 10 Hz à au moins 500 Hz			
Vitesse de rotation 1500 – 1800 trs/min		Vitesse de rotation 3000 – 3600 trs/min	
8.5	D	11.8	D
5.3	C	7.5	C
2.8	B	3.8	B
	A		A



Annexe 82: Valeurs normalisées du niveau vibratoire, RMS et CF

8. Biographie



Biographie 1: Abraham Wald
1902-1950
Mathématicien- Américain (Hongrois)
Columbia University



Biographie 2: Milton Sobel
1919–2002
Statisticien Américain (Hongrois)
Columbia University



Biographie 3: Jacob Wolfowitz
1910-1981
Statisticien-Américain (Polonais)
New York University



Biographie 4: Herald Cramér
1893- 1985
Mathématicien Suédois
Stockholm University



Biographie 5: Jerzy Neyman
1894- 1981
Mathématicien Américain (Polonais)
Université de Californie à Berkeley



Biographie 6: Karl Pearson
1857–1936
Mathématicien -Britannique
University College de Londres



*Biographie 7: Edmund Alfred Cornish
1909-1973
Statisticien Australien
Adelaide University*



*Biographie 8: Ronald Aylmer Fisher
1890-1962
Statisticien Britannique
Adelaide University*



*Biographie 9: Joseph Berkson
1899 – 1982
Biostatisticien – Américain
Johns Hopkins University*



*Biographie 10: Lucien Le Cam
1924-2000
Statisticien Français
Université de Californie à Berkeley*

ملخص / Abstract / Résumé

الهدف الرئيسي من هاته الأطروحة هو الكشف والتشخيص للعيوب في المدحرجات تحت مختلف أنماط التشغيل من حمولات وسرعات متغيرة. فبالإضافة إلى تحليل الترددات ومؤشرات الكشف الكلاسيكي "كيرتوسيس، سكيو إلخ..."، تم اقتراح طريقتين لتحليل الإشارات والتي ستكون موضوع مواجهة تجريبية بإشارات حقيقية. التجارب أجريت في مختبرين فرنسيين هما: جيبسا-لاب م. و. م. ت. - غرونوبل و: لامكوس م. و. ع. ت. - ليون، والتي تستخدم للتحقق التجريبي من أجل تحسين نوعية التشخيص. أحد هاتين الطريقتين تقوم على مبادئ التحليل التسلسلي خصيصا إختبار الفرضية المركبة ل: فالد، والطريقة الأخرى، تقوم على مبدأ الفصل المصدرى الأعمى والذي يتم تطبيقه لفصل الإشارات المختلفة للمدحرجات والعجلات المسننة المحصل عليها من طاولة التجارب البحثية.

ولقد أظهرت النتائج الرئيسية لهذا العمل فعالية طريقة فالد في تجاوز مشكلة الكشف عن الأخطاء الميكانيكية لإشارات الإهتزاز ذات النطاق العريض وأيضاً إقتصاد في عدد العينات اللازمة لتحليل البيانات ومعالجتها. كما أظهرت النتائج محدودية طريقة الفصل المصدرى الأعمى خلال ضجيج التشغيل. أخيراً، ومن أجل الحسابات المختلفة تم برمجة حوارزميات تحت ماتلاب والتي يمكن أن تكون مصدر لبرامج صيانة تنبؤية.

كلمات دلالية: تشخيص، فحص، مدحرجات، عيوب، الفحص التسلسلي لفالد.

The main objective of this thesis is the detection and the diagnosis of the defects in the bearings under different modes of operation, loads and variable speeds.

In addition to frequency analysis and classical detection indicators "Kurtosis, Skew etc ..." two methods have been proposed for the analysis of the signals and which will be the object of an experimental confrontation by real signals. These signals were carried out in two French laboratories: Gipsa-lab INP-Grenoble and LaMCoS INSA-Lyon, which are used for experimental validation in the interest of improving the quality of the diagnosis. One of these two methods is based on the sequential analysis specially the composite hypothesis test of Wald, the other method, is the blind source separation which is applied to separate the different signals from the bearings and gears of the benches test.

The main results of this work have shown the effectiveness of the Wald method in overcoming the problem of fault detection for broadband vibration signals and also the gain in the number of samples for data analysis and processing, also, the results have shown the limitation of the blind separation with respect to operating noise. Finally, for the different calculations, algorithms have been programmed under Matlab and which can be the object of a predictive maintenance software.

Keywords: diagnosis, detection, rolling element bearing, defect, Wald sequential test

L'objectif principal de cette thèse est la détection et le diagnostic des défauts dans les roulements sous différents régimes de fonctionnement charges et vitesses variables.

En plus de l'analyse fréquentielle et les indicateurs classiques de détection « Kurtosis, Skew etc... », deux méthodes ont été proposées pour l'analyse des signaux et qui seront l'objet d'une confrontation expérimentale par des signaux réels. Ces signaux ont été effectués en deux laboratoires Français : Gipsa-lab INP-Grenoble et LaMCoS INSA-LYON et qui sont utilisés pour la validation expérimentale dans l'intérêt d'améliorer la qualité du diagnostic. L'une de ces deux méthodes est basée sur l'analyse séquentielle et plus particulièrement les hypothèses test composées de Wald, l'autre méthode, est la séparation aveugle de source qui est appliquée pour séparer les différents signaux des roulements et engrenages des bancs d'essais.

Les principaux résultats du présent travail ont montré l'efficacité de la méthode Wald pour palier le problème de la détection des défauts pour les signaux à bande large et aussi le gain du nombre d'échantillon pour l'analyse et le traitement des données et par conséquent un gain considérable du temps, les résultats ont aussi montré la limitation de la séparation aveugle vis-à-vis au bruit de fonctionnement. Enfin pour les différents calculs, des algorithmes ont été programmés sous Matlab et qui peuvent être objet d'un logiciel de maintenance prédictive.

Mots Clés : Diagnostic, détection, roulement, défaut, Test séquentiel de Wald.

ملخص / Abstract / Résumé

الهدف الرئيسي من هاته الأطروحة هو الكشف والتشخيص للعيوب في المدحرجات تحت مختلف أنماط التشغيل من حملات وسرعات متغيرة.

فبالإضافة إلى تحليل الترددات ومؤشرات الكشف الكلاسيكي "كبرتوزيس، سكيو إلخ..."، تم اقتراح طريقتين لتحليل الإشارات والتي ستكون موضوع مواجهة تجريبية بإشارات حقيقية. التجارب أجريت في مختبرين فرنسيين هما: جيبسا-لاب م. و. م. ت. - غرونوبل و: لامكوس م. و. ع. ت. - ليون، والتي تستخدم للتحقق التجريبي من أجل تحسين نوعية التشخيص. أحد هاتين الطريقتين تقوم على مبادئ التحليل التسلسلي خصيصا إختيار الفرضية المركبة ل: فالد، والطريقة الأخرى، تقوم على مبدأ الفصل المصدري الأعمى والذي يتم تطبيقه لفصل الإشارات المختلفة للمدحرجات والعجلات المسننة المحصل عليها من طاولة التجارب البحثية. ولقد أظهرت النتائج الرئيسية لهذا العمل فعالية طريقة فالد في تجاوز مشكلة الكشف عن الأخطاء الميكانيكية لإشارات الإهتزاز ذات النطاق العريض وأيضا إقتصاد في عدد العينات اللازمة لتحليل البيانات ومعالجتها. كما أظهرت النتائج محدودية طريقة الفصل المصدري الأعمى خلال ضجيج التشغيل. أخيرا، ومن أجل الحسابات المختلفة تم برمجة خوارزميات تحت ماتلاب والتي يمكن أن تكون مصدر لبرامج صيانة تنبؤية.

كلمات دلالية: تشخيص، فحص، مدحرجات، عيوب، الفحص التسلسلي لفالد.

The main objective of this thesis is the detection and the diagnosis of the defects in the bearings under different modes of operation, loads and variable speeds.

In addition to frequency analysis and classical detection indicators "Kurtosis, Skew etc ..." two methods have been proposed for the analysis of the signals and which will be the object of an experimental confrontation by real signals. These signals were carried out in two French laboratories: Gipsa-lab INP-Grenoble and LaMCoS INSA-Lyon, which are used for experimental validation in the interest of improving the quality of the diagnosis. One of these two methods is based on the sequential analysis specially the composite hypothesis test of Wald, the other method, is the blind source separation which is applied to separate the different signals from the bearings and gears of the benches test.

The main results of this work have shown the effectiveness of the Wald method in overcoming the problem of fault detection for broadband vibration signals and also the gain in the number of samples for data analysis and processing, also, the results have shown the limitation of the blind separation with respect to operating noise. Finally, for the different calculations, algorithms have been programmed under Matlab and which can be the object of a predictive maintenance software.

Keywords: diagnosis, detection, rolling element bearing, defect, Wald sequential test

L'objectif principal de cette thèse est la détection et le diagnostic des défauts dans les roulements sous différents régimes de fonctionnement charges et vitesses variables.

En plus de l'analyse fréquentielle et les indicateurs classiques de détection « Kurtosis, Skew etc... », deux méthodes ont été proposées pour l'analyse des signaux et qui seront l'objet d'une confrontation expérimentale par des signaux réels. Ces signaux ont été effectués en deux laboratoires Français : Gipsa-lab INP-Grenoble et LaMCoS INSA-LYON et qui sont utilisés pour la validation expérimentale dans l'intérêt d'améliorer la qualité du diagnostic. L'une de ces deux méthodes est basée sur l'analyse séquentielle et plus particulièrement les hypothèses test composées de Wald, l'autre méthode, est la séparation aveugle de source qui est appliquée pour séparer les différents signaux des roulements et engrenages des bancs d'essais.

Les principaux résultats du présent travail ont montré l'efficacité de la méthode Wald pour palier le problème de la détection des défauts pour les signaux à bande large et aussi le gain du nombre d'échantillon pour l'analyse et le traitement des données et par conséquent un gain considérable du temps, les résultats ont aussi montré la limitation de la séparation aveugle vis-à-vis au bruit de fonctionnement. Enfin pour les différents calculs, des algorithmes ont été programmés sous Matlab et qui peuvent être objet d'un logiciel de maintenance prédictive.

Mots Clés : Diagnostic, détection, roulement, défaut, Test séquentiel de Wald.