

THÈSE

SURVEILLANCE ANGULAIRE D'UNE LIGNE D'ARBRE D'ÉOLIENNE SOUS CONDITIONS NON STATIONNAIRES

Présentée devant

l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

pour obtenir

le GRADE DE DOCTEUR

École doctorale :

Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique

Spécialité :

MÉCANIQUE - GÉNIE MÉCANIQUE - GÉNIE CIVIL

par

Hugo ANDRÉ

Ingénieur Génie Mécanique

Thèse soutenue le 9 Décembre 2011 devant la Commission d'examen

Jury

JÉRÔME ANTONI	Professeur	Président
ROBERT RANDALL	Professeur Émérite	Rapporteur
JEAN-PAUL DRON	Professeur	Rapporteur
FENGSHOU GU	Docteur	Examineur
NICOLAS GIRARD	Ingénieur	Invité
DIDIER RÉMOND	Professeur	Directeur de thèse
ADELINÉ BOURDON	Maître de Conférences	Directeur de thèse

LaMCoS - UMR CNRS 5514 - INSA de Lyon
20, avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex (FRANCE)

**INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales - Quadriennal
2007-2010**

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://sakura.cpe.fr/ED206 M. Jean Marc LANCELIN Insa : R. GOURDON	M. Jean Marc LANCELIN Université Claude Bernard Lyon 1 Bât CPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 Fax : lancelin@hikari.cpe.fr
E.E.A.	ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://www.insa-lyon.fr/eea M. Alain NICOLAS Insa : C. PLOSSU ede2a@insa-lyon.fr Secrétariat : M. LABOUNE AM. 64.43 - Fax : 64.54	M. Alain NICOLAS Ecole Centrale de Lyon Bâtiment H9 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60 97 Fax : 04 78 43 37 17 eea@ec-lyon.fr Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN
E2M2	EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION http://biomserv.univ-lyon1.fr/E2M2 M. Jean-Pierre FLANDROIS Insa : H. CHARLES	M. Jean-Pierre FLANDROIS CNRS UMR 5558 Université Claude Bernard Lyon 1 Bât G. Mendel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.26 23 59 50 Fax 04 26 23 59 49 06 07 53 89 13 e2m2@biomserv.univ-lyon1.fr
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES- SANTÉ Sec : Safia Boudjema M. Didier REVEL Insa : M. LAGARDE	M. Didier REVEL Hôpital Cardiologique de Lyon Bâtiment Central 28 Avenue Doyen Lépine 69500 BRON Tél : 04.72.68 49 09 Fax :04 72 35 49 16 Didier.revel@creatis.uni-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES http://infomaths.univ-lyon1.fr M. Alain MILLE	M. Alain MILLE Université Claude Bernard Lyon 1 LIRIS - INFOMATHS Bâtiment Nautibus 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 44 82 94 Fax 04 72 43 13 10 infomaths@bat710.univ-lyon1.fr - alain.mille@liris.cnrs.fr
Matériaux	MATERIAUX DE LYON M. Jean Marc PELLETIER Secrétariat : C. BERNAVON 83.85	M. Jean Marc PELLETIER INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Blaise Pascal 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cédex Tél : 04.72.43 83 18 Fax 04 72 43 85 28 Jean-marc.Pelletier@insa-lyon.fr
MEGA	MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE M. Jean Louis GUYADER Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 -Fax : 87.12	M. Jean Louis GUYADER INSA de Lyon Laboratoire de Vibrations et Acoustique Bâtiment Antoine de Saint Exupéry 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél :04.72.18.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 mega@lva.insa-lyon.fr
ScSo	ScSo* M. OBADIA Lionel Insa : J.Y. TOUSSAINT	M. OBADIA Lionel Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.77.23.88 Fax : 04.37.28.04.48 Lionel.Obadia@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

À mes parents.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Jean-Paul Dron et tout particulièrement Robert Randall d'avoir accepté de relire ce rapport et d'y apporter leur commentaires. Les questions pertinentes qu'ils soulèvent consolident cette passion que j'ai naturellement héritée de mon vénérable directeur de thèse, un chercheur remarquable au sourire insatiable. J'espère sincèrement poursuivre des travaux de recherche avec Didier Rémond et Adeline Bourdon, dont la collaboration se montre aussi fructueuse qu'agréable. Je tiens aussi à remercier Jérôme Antoni, dont l'excellence reconnue ne mérite pas autant d'éloge que ses qualités humaines, pour m'avoir initié à quelques secrets de Fourier, au fil de correspondances passionnantes et enrichissantes¹.

À Andréa, Marta, Mathieu, Rémi, Younés et tout particulièrement Clarisse Beau et Chen Chen, qui ont accompagné la kyrielle de campagnes expérimentales et apporté les clés de voute des solutions d'acquisition et de traitement. Cette aide, partiellement valorisée dans le dernier chapitre de ce manuscrit, traduit la confiance et l'effort investi par le laboratoire et le département dans ce projet, capables d'armer un doctorant d'une véritable petite équipe de recherche... J'en profite pour remercier Fabrice Ville, Régis Dufour, Georges Hugueny, Michel Querry et plus globalement, l'ensemble du laboratoire², dont les membres n'ont pas hésité à partager l'expertise qui justifie son excellente réputation. je suis fier et honoré d'y avoir trouvé de véritables amis.

Mes remerciement s'adressent aussi à toute l'équipe de Maia Eolis, dont l'esprit familial, la démarche réaliste bien que durable ainsi que la curiosité scientifique ont achevé de me convaincre à poursuivre cette carrière scientifique dans l'univers industriel. Je pense particulièrement à Nicolas Girard, Damien Bruyère et Régis Blanc qui m'ont soutenu à tout moment et formé sur la rigueur dont peut parfois manquer l'univers académique.

Et si je prend l'initiative de ne pas mentionner mes proches par soucis d'intimité³, je me dois de remercier la douce lumière qui illumine mon petit chemin, notamment pour la ténacité et la bravoure dont elle a fait preuve dans l'éviction impitoyable des fautes d'orthographe qui infestaient ce mémoire. Dieu merci⁴, je ne suis pas une faute d'orthographe...

¹ Surtout pour moi, j'en ai peur...

² en prenant soin d'inclure le redouté mais efficace service informatique.

³ et car ils préfèrent le vin

⁴ Ouf ! j'ai failli l'oublier.

Résumé

Dans le cadre de la maintenance conditionnelle, l'analyse vibratoire temporelle repose sur 50 ans d'expérience et jouit, de fait, d'une représentativité importante dans le secteur éolien. Cette analyse, appliquée sous des conditions de fonctionnement non stationnaires, fait néanmoins preuve d'un manque de précision dans la détection de défauts mécaniques. Afin de synchroniser l'échantillonnage avec les défauts des éléments tournants de la ligne d'arbre, il est alors nécessaire de s'appuyer sur une discrétisation angulaire du vecteur d'information. L'objet de cette étude est le développement d'un outil de surveillance disposant de cette qualité et s'appuyant sur les variations que présente la vitesse instantanée de la machine tournante pour évaluer l'état des éléments tournants.

La vitesse angulaire instantanée, associée à l'analyse spectrale, est assujettie à des perturbations dont les origines sont identifiées et les influences quantifiées. Ainsi, il est envisageable de dimensionner un système de mesure en fonction des caractéristiques de la chaîne cinématique sous surveillance. Ce document propose également plusieurs outils de traitement originaux qui permettent, sous des conditions de fonctionnement non stationnaires, d'améliorer suffisamment l'observation pour que l'utilisation d'un seul capteur soit envisageable pour assurer la surveillance de la ligne d'arbre dans sa totalité. Ces outils mettent en exergue la dualité temporelle angulaire de la surveillance de machines tournantes et tirent parti des conditions de fonctionnement non stationnaires par la connaissance de la vitesse instantanée.

Les procédés d'acquisition combinés aux outils de traitement sont mis à l'épreuve sur plusieurs banc d'essais. Sensible au degrés de désalignement, au type de défaut d'engrènement et à la gravité d'un écaillage, la vitesse angulaire instantanée est dorénavant une alternative confirmée à la surveillance vibratoire, même angulaire. Une vaste campagne de mesures a été lancée en parallèle et en continu sur une éolienne dans l'objectif ambitieux de mettre en place un procédé de pronostic. Les diverses conditions de fonctionnement sont prises en compte par une approche statistique permettant d'utiliser avantageusement leurs influences sur les mesures qui en sont issues. Ces travaux constituent une première étape dans la réalisation d'un modèle de surveillance multi-niveau adapté aux machines à fonctionnement variable dont les éoliennes sont un parfait exemple de complexité.

MOTS CLÉS: Éolienne, Surveillance, Diagnostique, Non Stationnaire, Angulaire, Vibrations, Vitesse instantanée, Traitement du signal

Table des matières

Table des matières	i
Introduction Générale	1
1 Surveillance par Mesures Vibratoires	5
1.1 Introduction	7
1.2 État de l'art du diagnostique vibratoire	8
1.2.1 Les indicateurs vibratoires	8
1.2.2 Les outils de traitement vibratoire	11
1.3 Étude des procédés d'acquisition	14
1.3.1 Méthodologies d'order tracking	14
1.3.1.1 Échantillonnage angulaire direct	14
1.3.1.2 Rééchantillonnage angulaire	16
1.3.2 Comparaison qualitative des procédés d'acquisition	19
1.3.2.1 Matériel et méthodes	19
1.3.2.2 Résultats	22
1.3.3 Conclusion	25
1.4 Ouverture vers l'analyse de vitesse instantanée	26
2 Introduction aux Mesures de Vitesse Angulaire Instantanée	27
2.1 Introduction	29
2.2 Particularités du système d'acquisition	30
2.2.1 Principe d'acquisition des signaux	30
2.2.1.1 Le choix d'un capteur angulaire	30
2.2.1.2 Méthodes temporelles	33
2.2.1.3 Méthodes angulaires	35
2.2.1.4 Une méthode angulaire pour une mesure angulaire.	37
2.2.2 Fondamentaux de l'observation angulaire	37
2.2.2.1 Observation spatiale	38
2.2.2.2 Observation spectrale	39
2.2.3 Nature du signal vitesse instantanée	40
2.2.3.1 Transformée de Fourier sur le signal brut	40

2.2.3.2	Conversion entre les signaux « vitesse » et « écart temporel »	43
2.3	Détermination de la précision d'une mesure de vitesse instantanée par écart temporel	45
2.3.1	Erreur de quantification	46
2.3.1.1	Vitesse angulaire constante	46
2.3.1.2	Vitesse angulaire variable	50
2.3.2	Erreur géométrique	57
2.3.2.1	Généralités	57
2.3.2.2	Caractérisation statistique	57
2.3.2.3	Composante déterministe	62
2.3.3	Erreur électrique	63
2.3.4	Validation expérimentale	65
2.3.4.1	Erreur de quantification	65
2.3.4.2	Erreur géométrique	67
2.3.4.3	L'erreur électrique ?	69
2.4	Conclusion	74
3	Développement d'Outils Originaux pour l'Analyse Angulaire	77
3.1	Introduction	79
3.2	Localisation fréquentielle du défaut et augmentation de la résolution	80
3.2.1	Motivation	80
3.2.2	Fonction de repérage événementiel	81
3.2.3	Réduction de résolution	85
3.3	Traitement de la tendance macroscopique	90
3.3.1	Présentation de la perturbation	90
3.3.2	Analyse de l'accélération angulaire instantanée	92
3.3.3	Adaptation des techniques de fenêtrage	95
3.3.4	Bilan	97
3.4	Adaptation des outils de traitement vibratoire	99
3.4.1	Vers un meilleur estimateur de la DSP	99
3.4.2	Enveloppe Spectrale et approche cyclo-non stationnaire	100
3.5	Observation angle / fréquence cyclique	105
3.5.1	Adaptation de la TFCT aux signaux angulaires	105
3.5.2	Distinctions des phénomènes cycliques, temporels et « autres »	106
3.5.3	Relocalisation d'un phénomène temporel replié	107
3.5.4	Validation sur l'éolienne	111
3.5.5	Proposition pour les phénomènes cycliques repliés	112
3.6	Conclusion	115
4	Étude Expérimentale	117
4.1	Introduction	119
4.2	Défaut de désalignement	120

4.2.1	La modélisation du joint de cardan	121
4.2.2	Résultats expérimentaux	123
4.2.3	Bilan	124
4.3	Défaut d'engrènement	126
4.3.1	Étude de la forme des défauts d'engrènement	126
4.3.2	Application expérimentale	129
4.3.2.1	Protocole expérimental	129
4.3.2.2	Présentation des indicateurs	130
4.3.2.3	Résultats	131
4.3.3	Bilan	132
4.4	Défaut de roulement	134
4.4.1	Analyse théorique et prospective des manifestations de défaut sur la vitesse instantanée	134
4.4.1.1	Localisation fréquentielle du défaut de roulement	134
4.4.1.2	Diagnostic d'un élément sous différentes conditions de fonctionnement.	137
4.4.1.3	Génération d'un défaut de roulement naturel	138
4.4.2	Protocole expérimental	140
4.4.2.1	Campagne sur les conditions de fonctionnement	140
4.4.2.2	Campagne sur les degrés de gravité du défaut	141
4.4.3	Analyse des résultats	142
4.4.3.1	Usure collatérale du banc d'essais	142
4.4.3.2	Le cas particulier de la bague fixe	144
4.4.3.3	Influence de la forme du défaut sur la surveillance	145
4.4.3.4	Influence des conditions de fonctionnement	147
4.4.4	Bilan	150
4.5	Suivi long terme d'une machine tournante sous conditions non-stationnaires	152
4.5.1	Développement d'une méthode de surveillance sous conditions non-stationnaires	152
4.5.1.1	De l'analyse mécanique à l'approche statistique	152
4.5.1.2	Caractérisation des conditions de fonctionnement de l'éolienne	154
4.5.1.3	Calcul des indicateurs de surveillance	156
4.5.1.4	Mise en place de la normalisation des indicateurs	157
4.5.2	Surveillance d'un roulement de génératrice	159
4.5.2.1	Présentation du roulement	159
4.5.2.2	Résultats vibratoires	159
4.5.2.3	Résultats en vitesse angulaire instantanée	160
4.5.2.4	Résultats sur une autre éolienne	161
4.5.2.5	Utilisation de la loi normale paramétrique	162
4.5.2.6	Discussion	162
4.5.3	Surveillance d'un engrènement défectueux	162
4.5.3.1	Présentation du cas d'étude	162
4.5.3.2	Diagnostic de la surveillance angulaire	164

4.5.3.3	Comparaison aux résultats du suivi long-terme	168
4.5.4	Bilan	170
4.6	Conclusion	172
Conclusion Générale		175
A Surveillance Vibratoire		179
A.1	Quelques indicateurs vibratoires	179
A.1.1	Indicateurs basés sur le moment d'ordre 2	179
A.1.2	Indicateurs basés sur le moment d'ordre 4	181
A.2	Quelques outils de traitement	183
A.2.1	Méthodes de réduction de bruit	183
A.2.2	Méthode d'enveloppe	185
A.2.3	Analyse cepstrale	187
A.2.4	Méthodes temps-fréquence	187
A.2.5	Outils cyclo-stationnaires	189
A.3	Correction de rééchantillonnage	189
A.3.1	Notations et hypothèses	190
A.3.2	Influence de l'erreur sur le signal Vitesse Angulaire Instantanée.	190
A.3.3	Influence de l'erreur sur le signal vibratoire.	191
A.3.4	Correction de l'erreur sur le signal vibratoire.	194
B Surveillance par mesure de vitesse instantanée		197
B.1	Nature du signal vitesse instantanée	197
B.1.1	Estimations de vitesse par la transformée de Fourier	197
B.2	Généralités statistiques	198
B.2.1	Introduction des notations, concepts et autres approximations	198
B.2.1.1	Notations.	198
B.2.1.2	Variables, signaux aléatoires.	198
B.2.1.3	Quelques mots sur la densité spectrale de puissance	199
B.2.2	Loi de probabilité	199
B.2.2.1	Théorème centrale limite	199
B.2.2.2	Loi de Khi2	200
C Outils d'analyse pour l'observation de la vitesse instantanée		201
C.1	Traitement de la tendance macroscopique	201
D Etude Expérimentale		203
D.1	Présentation des bancs d'essais	203
D.1.1	Banc d'essais : boîte de vitesses automobile	203
D.1.1.1	Description technique	203
D.1.1.2	Utilité du banc d'essais	204
D.1.1.3	Réalisation des défauts de roulement	205
D.1.1.4	Fréquences caractéristiques de roulement conique	209

D.1.2	Banc GDS	211
D.1.2.1	Description technique	211
D.1.2.2	Utilité du banc d'essais	212
D.1.3	Instrumentation de éolienne	213
D.1.3.1	Présentation générale	213
D.1.3.2	Dissection de la ligne d'arbre	213
D.1.3.3	Le système d'acquisition	218
D.1.3.4	Les éléments sous surveillance	220
D.2	Approche tribologique	221
Bibliographie		223

Introduction Générale

“We shall have to say goodbye to the option of nuclear power station and commit ourselves to renewable energies.”

Propos tenus par M. Berlusconi, Premier Ministre, lors d'une conférence de presse à Rome en juin 2011, engageant ainsi son gouvernement à recourir aux énergies renouvelables !..

Contexte général

Le secteur éolien se développe rapidement, aussi bien en quantité d'éoliennes qu'en terme de capacité unitaire de production. La taille croissante des éoliennes augmente progressivement l'amplitude des charges supportées par les éléments constitutifs des machines. Eu égard aux investissements initiaux et coûts opérationnels qui sont actuellement pratiqués, les exploitants éoliens visent à réduire les temps d'arrêt au maximum. Aujourd'hui, les constructeurs s'accordent contractuellement avec les exploitants pour respecter des taux de disponibilité qui dépassent 97% de leur cycle de vie. En outre, des fiabilités de même valeurs sont attendues pour les éoliennes offshore, bien que les problèmes d'accessibilité soient plus lourds que ceux connus pour les éoliennes terrestres et alourdissent, par conséquent, les temps d'arrêt en cas de réparation majeure.

Afin de se conformer aux attentes relatives à la réduction des temps d'arrêt, à la prévision des dommages futurs et à la planification des interventions locales pour éviter la génération de dégâts collatéraux, la surveillance conditionnelle continue d'une éolienne devient indispensable. Aujourd'hui, les opérations réalisées en fonctionnement sont préférées à celles réalisées en différé qui nécessitent des arrêts programmés du système.

Parmi les méthodes de surveillance de système en fonctionnement, on citera tout d'abord les mesures de température, de pression et d'hygrométrie. Ces mesures, effectuées en continu ou à intervalle programmé, fournissent une indication sur l'état global du système, à condition de connaître les ordres de grandeurs de ces quantités dans les cas de fonctionnement normal. Les résultats permettent de déceler un état anormal du système sans toutefois renseigner précisément l'origine du dysfonctionnement ni fournir un diagnostic précoce.

L'analyse de lubrifiant constitue un moyen efficace de surveillance de systèmes

comprenant des transmissions par engrenages. Les modifications des caractéristiques d'un lubrifiant peuvent être de deux natures principales : la dégradation, liée à l'oxydation du lubrifiant, ou la contamination, liée à la présence de débris d'usure provenant des organes mécaniques du système. Le contrôle de la contamination fournit des informations concernant la présence et l'identification de métaux, ainsi qu'un ordre de grandeur de la taille des particules trouvées. Ces données permettent d'apprécier la sévérité d'endommagement d'organes mécaniques difficilement identifiables à partir d'une analyse vibratoire, tel que le *micropitting*. Cependant, il est souvent impossible d'isoler le ou les composants incriminés, puisque le nombre d'éléments d'un système susceptibles de produire des particules métalliques est important. Ensuite, les avaries à évolution rapide ne peuvent être suivies par analyse de lubrifiant que si la mesure est réalisée en continu. L'analyse de lubrifiant, généralement réalisée en différé, ne peut être appliquée en continu qu'avec l'instrumentation systématique d'un système d'analyse relativement couteux.

Dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle, l'analyse vibratoire est une technique très répandue. Elle est réalisée par l'analyse de signaux recueillis sur le système en fonctionnement par des capteurs le plus souvent piézoélectriques. L'utilisation des signaux mesurés peut être réalisée à différents niveaux. Certains cas nécessitent simplement un relevé de niveau global et une comparaison avec un seuil, d'autres, une analyse plus fine par outils de traitement du signal, afin d'identifier le ou les éléments défectueux par recherche de caractéristiques émergentes, comme une augmentation d'amplitude à une fréquence particulière. La complexité d'une ligne d'arbre d'éolienne ne fait évidemment pas partie du premier niveau d'utilisation.

Pour éviter que le marché éolien, extrêmement actif, ne soit inondé par des systèmes de surveillance inadaptés, des normes de qualité sont définies pour certifier la disposition d'un système CMS⁵ à surveiller une ligne d'arbre d'éolienne. En meilleur exemple, Germanisher Lloyd [Ger07] ne certifie depuis 2007 que les systèmes qui comprennent au moins 6 capteurs accélérométriques, et dont les trains épicycloïdaux doivent être instrumentés d'au moins 3 capteurs respectivement positionnés au niveau de la couronne, du solaire et de l'arbre de sortie. Les mesures vibratoires doivent être échantillonnées sur une base temporelle, et peuvent éventuellement être rééchantillonnées *a posteriori* dans le domaine angulaire. En outre, les mesures vibratoires doivent notamment être associées à une mesure de la vitesse du vent.

Motivations

La définition que délivre la société Germanisher Lloyd du « système CMS adapté au marché de l'éolien » donne un aperçu représentatif des systèmes proposés dans le commerce associé à ce domaine industriel. Soupçonnée d'être le fruit d'une adaptation directe des méthodes historiquement usitées par l'industrie traditionnelle, cette approche

⁵Condition Monitoring System

peut être remise en question sous de nombreux aspects.

Il est par exemple reconnu que la mesure de vent effectuée depuis un anémomètre situé sur le toit de la nacelle d'une éolienne est lourdement biaisée par le régime turbulent induit par le passage récurrent des pales, quelques mètres en amont de ce dernier. De plus, bien que les accéléromètres soient des capteurs non intrusifs facilement positionnables, ils n'en demeurent pas moins coûteux. Fixer le nombre minimum de capteur revient à traduire l'impossibilité d'améliorer la sensibilité de ces derniers. Et s'il faut reconnaître la sensibilité gênante d'un capteur piézoélectrique vis à vis des voies de transfert qui le séparent des éléments sous surveillance, pourquoi ne pas utiliser un autre type de capteur ? Enfin, limiter l'utilisation du rééchantillonnage angulaire aux éoliennes dont les variations de vitesse sont telles que l'observation spectrale d'un signal échantillonné en temps est ininterprétable n'est pas justifié.

Les questions adressées dans ce mémoire par la société Maia Eolis, exploitant éolien, visent à proposer une solution de surveillance adaptée aux conditions atypiques qui marquent le fonctionnement d'une éolienne au format industriel, équipée d'un multiplicateur à engrenages. En effet, une telle ligne d'arbre est soumise à des variations de vitesse et de charge récurrentes, dissociant constamment la périodicité temporelle de la régularité cyclique. Elles peuvent être résumées par la question suivante :

Comment aborder le problème non stationnaire ?

Le Laboratoire de Mécanique du Contact et des Structures, associé à ce travail, disposait dès son initiation de quelques éléments de réponses. En particulier, Renaudin et al [REN 10] ont montré qu'il est possible d'identifier un défaut mécanique en n'utilisant qu'une mesure de la vitesse de rotation. Ces résultats novateurs apportent une alternative aux capteurs accélérométriques, que Maia Eolis souhaite approfondir par une collaboration avec le LaMCoS, sous la forme d'un doctorat sous financement CIFRE débuté le 5 janvier 2009.

Organisation du mémoire

Dans un premier temps, une étude approfondie de l'analyse vibratoire vise à profiter de l'expérience accumulée par la communauté industrielle et scientifique en matière de traitement, puis de diagnostic. Ce sera l'occasion de comprendre les avantages que peuvent apporter une discrétisation angulaire du signal, ainsi que les différences pratiques qui distinguent l'échantillonnage angulaire direct du rééchantillonnage angulaire.

Ensuite, la mesure de vitesse instantanée fera l'objet d'une analyse détaillée justifiant le choix d'un procédé particulier. Alors, le traitement de ce type de signal par des outils classiques sera présenté avant qu'une étude ne propose la détermination du niveau de précision du procédé complet d'acquisition.

Les deux procédés d'acquisition arrêtés, des outils de traitement originaux seront introduits. Spécialement définis pour la mesure de vitesse instantanée ou adaptés des outils classiquement usités en analyse vibratoire, ces derniers répondront aux conditions de fonctionnement qui caractérisent le cas d'application de l'éolienne.

Enfin, les systèmes d'acquisition associés aux outils de traitement adaptés seront mis à l'épreuve sur une série de campagnes expérimentales. Les solutions développées pendant la thèse seront confrontées à différents types de défauts sous des conditions de fonctionnement stationnaires, avant d'être testées sur une véritable éolienne.

En effet, Maia Eolis a permis l'instrumentation de plusieurs éoliennes, dont l'une fut l'objet d'une campagne de mesure dès Juin 2010, toujours en cours. Les mesures ainsi accumulées sont intrinsèquement non stationnaires, et illustreront le potentiel d'un outil de surveillance basé sur les résultats originaux de cette thèse.

Chapitre 1

Surveillance par Mesures Vibratoires

La surveillance vibratoire, solution incontournable en matière de maintenance préventive conventionnelle, permet d'introduire l'approche « angulaire », véritable fil conducteur de ce mémoire.

De l'expérience accumulée par la communauté scientifique et industrielle à l'analyse des systèmes d'acquisition angulaire, ce premier chapitre présente des outils qui faciliteront la manipulation des signaux de vitesse instantanée dans les chapitres suivants.

Sommaire

1.1	Introduction	7
1.2	État de l'art du diagnostic vibratoire	8
1.2.1	Les indicateurs vibratoires	8
1.2.2	Les outils de traitement vibratoire	11
1.3	Étude des procédés d'acquisition	14
1.3.1	Méthodologies d'order tracking	14
1.3.2	Comparaison qualitative des procédés d'acquisition	19
1.3.3	Conclusion	25
1.4	Ouverture vers l'analyse de vitesse instantanée	26

1.1 Introduction

Force est de constater que la surveillance par vitesse instantanée, véritable pilier du présent mémoire, manque de référence en matière d'outils dédiés à la maintenance préventive conditionnelle. Dans ce premier chapitre consacré à la surveillance vibratoire, la majeure partie des notions qui y sont développées sont représentatives de l'état de la technique actuelle. En effet, c'est à l'appui de l'expérience forgée par la communauté scientifique et industrielle en termes d'indicateurs, d'outils de traitement et de systèmes d'acquisition originaux, que seront développés les résultats dans les chapitres ultérieurs.

La première partie de ce chapitre sera donc consacrée à l'état de la technique du diagnostic vibratoire (1.2). Afin de présenter les éléments selon des niveaux de complexité croissants, l'intérêt sera porté sur les indicateurs aidant au diagnostic (1.2.1). Cet inventaire, volontairement non exhaustif, donne une idée de la philosophie suivie par l'évolution des indicateurs au fil des ans vis à vis de défauts de mieux en mieux caractérisés par leur signature vibratoire. Sera ainsi soulignée l'implicite dépendance des indicateurs les plus précis aux outils de traitement spécifiques à chaque application.

Pour les études les plus avancées, les indicateurs s'appuient effectivement sur des outils de traitement sophistiqués dont certains sont présentés dans un second temps (1.2.2). Si aucun de ces outils n'est initialement développé pour l'analyse sous conditions largement non stationnaires, la projection dans le domaine angulaire apparaît déjà indispensable pour révéler les phénomènes cyclostationnaires de premier ordre. Ce paragraphe permet de souligner l'ensemble des techniques qui traitent des signaux dont, bien que de nature temporelle et pris sous conditions stationnaires, la composante angulaire est considérée avantageusement. Cette observation, tirée de l'état de la technique, permet d'apprécier l'atout apporté par l'observation angulaire dans le cas d'une mesure vibratoire.

Cette projection dans le domaine angulaire, réalisée *a posteriori* moyennant les outils de traitement spécifiques, est justifiée pour les mesures dont les conditions de fonctionnement sont stationnaires. Dans le cas où la vitesse de rotation est variable, on préfère acquérir le signal vibratoire directement dans le domaine angulaire. Différentes méthodes d'échantillonnage angulaire seront finalement présentées puis comparées de manière originale (1.3). De celles qui prétendent être capables de traiter des mesures largement non stationnaires, l'industrie a besoin d'évaluer avec précision où se situe le meilleur compromis entre le critère financier et la qualité de la surveillance. Les résultats expérimentaux proposés, qui répondent initialement à un besoin industriel, ouvriront un lien inattendu vers l'étude approfondie de la vitesse instantanée menée dans le chapitre suivant.

1.2 État de l'art du diagnostique vibratoire

1.2.1 Les indicateurs vibratoires

Très généralement, un indicateur est le résultat d'une mesure ou d'un calcul représentant un ou plusieurs aspects de l'état d'usure ou de la performance d'un équipement. Son évolution doit être significative de l'aggravation ou de l'apparition d'un défaut électrique, mécanique, structurel... La création d'indicateurs pour la surveillance d'une ligne d'arbre d'éolienne via ses variations de vitesse angulaire, dessein sous-jacent de ce chapitre, peut passer par l'adaptation d'indicateurs existant dans la surveillance vibratoire traditionnelle. L'objectif de cette section est donc d'organiser les indicateurs développés pour la surveillance vibratoire de manière à souligner la philosophie qui a motivé leur utilisation. De prime abord, il est fréquent de distinguer les indicateurs selon quatre qualificatifs [BOU 99].

L'indicateur scalaire associe à un signal brut ou ayant fait l'objet d'un traitement préalable (filtrage, démodulation, Transformée de Fourier Discrète), une des grandeurs caractéristiques de sa distribution statistique. La légèreté de l'indicateur scalaire facilite son emploi et l'automatisation de sa gestion. Il est en effet facilement archivés sur plusieurs années et leur évolution historique permet de définir des seuils dont le dépassement déclenche l'alarme de la plupart des systèmes industriels de surveillance vibratoire.

L'indicateur spectral associe un signal à une représentation spectrale. Cet indicateur présente le grand intérêt d'être sensible aussi bien aux évolutions de la forme d'un signal qu'à celles de son énergie, et de ce fait, est insensible aux effets de masque à condition que les résolutions d'analyse choisies pour l'élaborer soient en adéquation avec les fréquences de répétition des phénomènes recherchés. Il offre donc des perspectives extrêmement intéressantes dans le cadre de la surveillance des machines.

L'indicateur temporel associe à un signal une forme particulière de sa représentation temporelle obtenue après filtrage ou démodulation. Il offre l'avantage être directement accessible à l'interprétation humaine. Il permet d'obtenir des informations difficilement accessibles dans le domaine spectral telles que la durée d'un phénomène impulsionnel périodique ou la forme d'un phénomène de modulation.

L'indicateur vectoriel associe à des signaux issus de plusieurs capteurs de vibration une représentation dans l'espace du mouvement vibratoire. L'utilisation de déformées partielle ou globale, encore anecdotique, est certainement riche d'avenir en tant qu'indicateur typologique de comportement.

Ces quatre classes qualifient la forme prise par l'indicateur, mais en ce qui concerne le fond, ils peuvent de nouveau être positionnés entre les deux familles suivantes :

les indicateurs énergétiques représentent l'énergie du signal vibratoire mesurée dans une bande fréquentielle relativement étendue. Cette famille regroupe l'ensemble des indicateurs scalaires représentatifs de l'énergie partielle ou totale du signal.

les indicateurs typologiques sont en relation directe avec certaines bandes fréquentielles d'un signal jugées représentatives du défaut et, de ce fait, en bien meilleure adéquation avec les défauts susceptibles d'affecter le signal original. Ils nécessitent néanmoins une connaissance empirique de la forme prise par le défaut.

Sans pour autant parler de bijection, les indicateurs sont créés pour correspondre à un aspect particulier du comportement vibratoire. De ce fait, et c'est encore plus vrai pour les indicateurs typologiques, un indicateur privilégie la détection de l'apparition d'un défaut ou d'une famille de défauts en éludant la détection des autres. Néanmoins, pour des raisons évidentes de simplicité et de légèreté, les systèmes de surveillance bon marché limitent souvent leur analyse à l'étude d'indicateurs énergétiques. Les indicateurs énergétiques présentent cependant plusieurs inconvénients qui limitent leur fiabilité d'utilisation et leur capacité de détection de défauts à un stade précoce, à savoir :

1. la forte dépendance de la sensibilité à la nature des défauts,
2. l'absence de relation formelle entre gravité du défaut et l'énergie vibratoire induite par la nature du défaut, par la voie de transfert mécanique ou encore par la très forte influence de la vitesse de rotation de la ligne d'arbre présentant le défaut,
3. le manque de pertinence de la notion de seuil dès qu'elle est dissociée de la cause qui engendre le phénomène vibratoire, de la nature de la machine, de ses conditions de fonctionnement et de son environnement.

Dans le paragraphe suivant, l'intérêt est porté sur les indicateurs développés par la communauté scientifique au cours des dernières décennies. La tendance suivie s'avère logiquement préférer les indicateurs typologiques.

L'adaptation des indicateurs dans le cas de l'engrènement

Les indicateurs développés pour surveiller les défauts d'engrènement sont présentés de manière à souligner la spécialisation de plus en plus fine faisant correspondre chaque indicateur à un modèle typologique propre, à un type de défaut d'engrènement particulier (cf. Annexe A.1). Il est intéressant de noter à quel point la frontière séparant la famille énergétique de la famille typologique est fine.

Les techniques traditionnelles développées en surveillance vibratoire pour détecter des défauts de transmission sont basées sur l'observation statistique de la répartition de l'énergie contenue dans le signal. La sensibilité de la valeur efficace du signal vibratoire

à l'apparition d'un défaut a été très vite acceptée par la communauté scientifique, et cette observation énergétique fondamentale reste aujourd'hui une méthode appréciée dans la surveillance de transmission par engrenage. Dans le milieu des années 70, Stewart s'est intéressé de plus près à l'influence d'un défaut d'engrènement sur les propriétés statistiques du signal vibratoire [STE 77]. Le signal vibratoire d'un engrènement sans défaut fut alors montré comme superposant les fréquences d'engrènement et leurs harmoniques respectives à un bruit de fond qui peut être considéré comme gaussien. Sur ces observations, MacFadden a proposé un premier modèle mathématique pour le signal vibratoire d'une transmission [MCF 87]. Pour prendre en compte les imperfections induites lors de l'usinage et de l'assemblage d'une transmission sous formes de modulations de phase et d'amplitude du signal, MacFadden a complété son modèle par l'adjonction de modulations en phase et en amplitude périodiques avec les harmoniques successives de la fréquence de rotation. Ces composantes correspondent aux peignes de raies observés par Stewart qui entourent chaque fréquence d'engrènement et qui sont espacées de la fréquence de rotation des arbres d'intérêt. Stewart a observé que l'amplitude des bandes latérales est faible quand la transmission est en bon état. Néanmoins, la présence d'un défaut ajoute une dynamique supplémentaire dont les effets sur le signal vibratoire varient en fonction du type de défaut. Les dents gravement atteintes d'un engrènement sont accompagnées d'une valeur crête à crête du signal vibratoire plus élevée qu'à l'accoutumée. Dans le cas d'un défaut réparti avancé, la valeur crête à crête n'évolue pas et l'amplitude des composantes fréquentielles correspondant aux harmoniques de la fréquence d'engrènement diminuent. Pour mieux observer l'évolution du défaut d'engrènement, on propose ensuite d'observer le signal résiduel correspondant au signal vibratoire classique soustrait des fondamentales et harmoniques de fréquence d'engrènement et d'y associer des indicateurs basés sur le calcul du moment d'ordre 4 [STE 77]-[J.J 93]. Le kurtosis est présenté comme l'indicateur d'ordre 4 représentatif d'outils dont quelques éléments sont présentés en annexe. Ces méthodes, dérivées du kurtosis, sont utilisées sur des signaux pré-traités par moyennage synchrone directement après leur digitalisation, et ce afin de révéler les composantes strictement périodiques et de noyer les perturbations aléatoires.

Cette analyse expose l'évolution des indicateurs de défaut d'engrènement et met ainsi deux aspects en évidence. Tout d'abord, la performance de l'indicateur semble dépendre de la connaissance empirique de la forme prise par la signature vibratoire du défaut. En matière de vitesse instantanée, l'observation expérimentale des différents défauts peut donc permettre la mise en place d'indicateurs adaptés. Ensuite, le développement de nouveaux indicateurs nécessite l'utilisation d'outils plus ou moins avancés de traitement du signal. Le moyennage synchrone et la démodulation autour de la fréquence d'engrènement sont autant d'outil indispensable au calcul des indicateurs typologiques de type kurtosis. Dans le paragraphe suivant, on s'intéresse à l'évolution des outils de traitement vibratoire dans le cas de la surveillance de roulement.

1.2.2 Les outils de traitement vibratoire

À travers l'exemple développé dans la partie précédente, l'approche typologique apparaît possible dès lors que le signal peut être "nettoyé" de son bruit par divers outils de traitement. Si les indicateurs les plus performants s'appuient eux mêmes sur des outils de traitement dédiés, il convient de s'intéresser à la philosophie qui justifie l'utilisation de ces derniers. Certains de ces outils pourront d'ailleurs être adaptés à l'analyse de vitesse instantanée pour créer de nouveaux indicateurs. À titre d'exemple, les outils récents proposés par la communauté scientifique pour traiter les signaux vibratoires obtenus en présence d'un défaut localisé de roulement sont présentés dans cette partie et détaillés en annexe A.2.

L'adaptation des outils de traitement dans le cas du roulement

La plupart des défauts apparaissent sur la bague intérieure, la bague extérieure, la cage et dans de moindres mesures sur l'élément roulant du roulement. Ainsi le signal vibratoire classiquement observé est constitué d'une succession d'impacts oscillatoires dominés par les principales fréquences de résonance de la structure. La connaissance de la fréquence d'apparition des impacts est apportée par la géométrie du mécanisme et leur observation constitue la base du diagnostic d'un roulement [McF 84]. Un défaut naissant ne détériore que localement la surface et les vibrations qui le caractérisent sont le résultat des impacts répétitifs de l'élément roulant sur le défaut. Ce type de défaut présente les caractéristiques suivantes :

1. les vibrations émises par un défaut de roulement naissant sont faibles et peuvent être masquées, dans une machine tournante, par des phénomènes autrement plus énergétiques,
2. un défaut de roulement a une fréquence caractéristique, mais l'observation spectrale de l'accéléromètre sera plus sensible aux vibrations émises lors de l'impact qu'à la périodicité de l'impact lui même,
3. la fréquence caractéristique du défaut est perturbée par le glissement des éléments roulants.

Le troisième point, soutenu notamment par Randall [RAN], est fondé sur le fait que l'angle de contact qui intervient dans le calcul de la fréquence caractéristique d'apparition du défaut est propre à chaque élément roulant, en fonction de sa position angulaire vis à vis de la zone chargée. Ce dernier point peut être approfondi par la dispersion qu'admettent aussi les roulements cylindriques, dont l'angle de contact est pourtant considéré invariant. Nous reviendrons sur cette discussion dans le chapitre dédié aux résultats expérimentaux dans la partie 4.4.1.1. Quoi qu'il en soit, il est reconnu que même si l'échantillonnage temporel contient des fréquences caractéristiques, les signaux issus des roulements peuvent être considérés comme stochastiques et approximativement cyclo-stationnaires du second ordre. L'enveloppe est une première solution pour observer de manière détournée la fréquence caractéristique du défaut en profitant de la fréquence de résonance suivant chaque impact [McF 84]. L'observation est alors focalisée sur les

canaux fréquentiels élevés où les phénomènes perturbateurs sont plus épars (balourd, désalignement). L'enveloppe permet aussi de retrouver les peignes de raie qui modulent les fréquences caractéristiques et apporte ainsi un poids considérable aux possibilités de diagnostique. De part la dispersion aléatoire de la fréquence caractéristique du défaut, le spectre de l'enveloppe carrée fut expérimentalement montrée supérieure à l'enveloppe classique [HO 00]. Le paradigme cyclostationnaire justifie théoriquement ce résultat en le liant à la corrélation spectrale qui s'appuie sur les propriétés cycliques des variables statistiques à l'origine de la dispersion [RAN 01]. L'enveloppe carrée devient ensuite d'autant plus précise qu'elle peut être restreinte à la fréquence de résonance modale du mécanisme vibratoire. Parmi les méthodes permettant d'optimiser la focalisation du filtre passe bande à cette zone fréquentielle, le kurtogramme apparaît comme l'une des plus faciles à mettre en oeuvre [ANT 07b]. Enfin, même dans le cas d'un arbre extrêmement rapide où les résonances induites par l'impact des éléments roulants successifs se recouvrent, la méthode MED¹ permet de simuler un amortissement plus élevé et facilite l'interprétation du Kurtogramme [SAW 07].

L'importance du synchronisme angulaire

Il est intéressant de constater que ces outils sont tout aussi efficaces en matière de surveillance d'engrènement. Barszcz et Al. n'utilise que le Kurtosis pour révéler de manière optimale un défaut localisé d'engrènement de multiplicateur d'éolienne [BAR 09a], ce qui permet de souligner la susceptibilité pour le kurtogramme de valoriser les fréquences d'engrènement plutôt que la zone de résonance filtrant l'éventuel défaut de roulement. Récemment, la méthodologie du Kurtogramme fut directement associée à l'enveloppe carrée pour améliorer la détection de défauts localisés d'engrènement [HUS 11]. Ainsi, le premier point listé dans le paragraphe précédent n'est toujours pas résolu : en matière de défaut de roulement, le kurtogramme ou la corrélation spectrale ne sont réellement pertinents que si les composantes cyclostationnaires d'ordre 1, les plus énergétiques, ont pu être retirées du signal *a priori*. Face à ce problème majeur, des outils de traitement tels que les méthodes SANC² [HO 00], DRS³ [ANT 04a] ou encore la prédiction linéaire [SAW 07] peuvent être mis en place. Détaillés en annexe (cf §A.2) dans la partie consacrée aux méthodes de réduction de bruit, ces outils s'appuient sur la cyclo-stationnarité d'ordre 1 des composantes perturbatrices pour dissocier la composante périodique du résidu vibratoire. En d'autres termes, l'ensemble des outils de traitement cités dans cette partie ne trouvent légitimité que si les vibrations induites par les engrènements sont stationnaires dans le domaine angulaire. C'est pour cette raison que le socle fondamental d'une analyse vibratoire évoluée repose sur l'échantillonnage angulaire du signal vibratoire, même sous des conditions de fonctionnement stables.

Les méthodes de réduction de bruit ne sont pas appliquées dans cette étude car

¹Minimum Entropy Deconvolution.

²Self Adaptive Noise Cancellation.

³Discrete Random Separation.

elles sont très sensibles à la stationnarité du signal vibratoire. Les larges variations de couple pendant une même mesure altèrent les phénomènes que l'on suppose périodiques, jusqu'à leur retirer leur propriété statistique nécessaire pour l'application de ces outils (à titre d'exemple, la Figure 1.4 est représentative d'un signal vibratoire sous des conditions largement non-stationnaires). Daher et Al. développent actuellement le concept de cyclo-nonstationnarité et adaptent le moyennage synchrone aux signaux pseudo-périodiques [DAH 10]. Ces travaux sont prometteurs, mais n'ont pas la maturité nécessaire pour fonctionner dans d'autres cas que ceux où l'amplitude du phénomène pseudo périodique est polynomiale d'ordre prédéterminé (à la connaissance de l'auteur).

Dans le cas de systèmes largement non stationnaires, la distinction des phénomènes non déterministes de ceux périodiques n'est assuré que par la méthode d'échantillonnage. En effet, hormis le problème lié à la variation d'amplitude des phénomènes vibratoires, la variation de vitesse n'a pas d'influence sur l'échantillonnage angulaire direct qui, associé à un fenêtrage pertinent, discrétise les phénomènes cycliques pour limiter leur fuite spectrale. Sous réserve que la résolution fréquentielle soit suffisante, la distinction des différents phénomènes vibratoires qui peuplent la ligne d'arbre est réalisée tant que les phénomènes sont mutuellement asynchrones, par respect des liens cinématiques qui régissent la ligne d'arbre. Ce point sera plus largement abordé dans la partie 3.2.

La qualité *angulaire* de l'échantillonnage est donc le piédestal de l'analyse du signal vibratoire en conditions stationnaires, et à fortiori non stationnaires. En effet, quelques soient les phénomènes mécaniques surveillés, la finesse du diagnostic s'appuie sur des outils de traitement aujourd'hui validés qui ne sont pertinents que si les mesures respectent la stationnarité du phénomène cyclique. En marge du choix de l'indicateur et de l'outil de traitement employé, les moyens mis en oeuvre pour obtenir un signal échantillonné en angle doivent être analysés avec soin. Une première étude en ce sens est proposée dans la partie suivante.

1.3 Étude des procédés d'acquisition

Si dans la partie précédente, l'échantillonnage angulaire s'avère indispensable pour distinguer certains phénomènes physiques même lorsque les observations sont effectuées sous des conditions de fonctionnement stationnaires, la variation macroscopique de vitesse induite par les conditions variables de fonctionnement que subissent les aérogénérateurs est une difficulté supplémentaire que doit relever l'échantillonnage angulaire. Différents moyens d'obtention du signal angulaire sont présentés dans une première section. L'apparition des différentes méthodes d'échantillonnage et de rééchantillonnage angulaire s'est vue accompagnée d'une volonté de simplification des systèmes d'acquisition. Bien que l'ensemble de ces méthodes soient couramment usitées, il n'existe, à la connaissance de l'auteur, pas de travaux publiés les comparant. Ce chapitre clôt donc la présentation des mesures vibratoires angulaires sur une comparaison expérimentale de ces méthodes de mesure.

1.3.1 Méthodologies d'order tracking

Pour conserver le synchronisme entre la mesure vibratoire et les phénomènes cycliques dont la caractérisation est recherchée, on distingue deux classes de solution respectivement présentées dans les paragraphes ci-dessous.

1.3.1.1 Échantillonnage angulaire direct

En premier lieu, l'Échantillonnage Angulaire Direct (EAD) est une méthode historique dans laquelle l'acquisition du signal accélérométrique est synchronisée directement par les impulsions délivrées par un capteur angulaire ([RÉM 98], [ANT 02]). La stationnarité des phénomènes cycliques observés selon cette méthode d'échantillonnage est intrinsèquement respectée, quelque soit l'amplitude des variations de vitesse. La nécessité de recalibrer les phénomènes cycliques vis à vis de ces variations disparaît et les transformées spectrales révèlent directement les périodicités angulaires qui découlent des relations cinématiques de la machine tournante sous surveillance ([RÉM 05] [REN 10]).

Ce principe, illustré par la figure 1.1, souligne qu'à l'inverse des signaux classiquement échantillonnés à pas de temps constant, ce procédé répartit les points de mesure à pas d'angle constant. Les pas d'angle sont déterminés par le capteur angulaire mécaniquement solidaire d'un des arbres constitutifs de la ligne d'arbre. Ces capteurs angulaires sont présentés en détail dans le chapitre suivant 2.2.1.1 et sont considérés de type TTL. Les systèmes d'acquisition spécialement équipés d'une horloge externe utilisent le front montant délivré par le capteur pour commander le convertisseur analogique/numérique du signal vibratoire. Un diviseur de fréquence peut être installé sur la voie du codeur afin d'ajuster le nombre d'impulsions par tour et éventuellement de contrôler la fréquence de coupure d'un filtre suiveur.

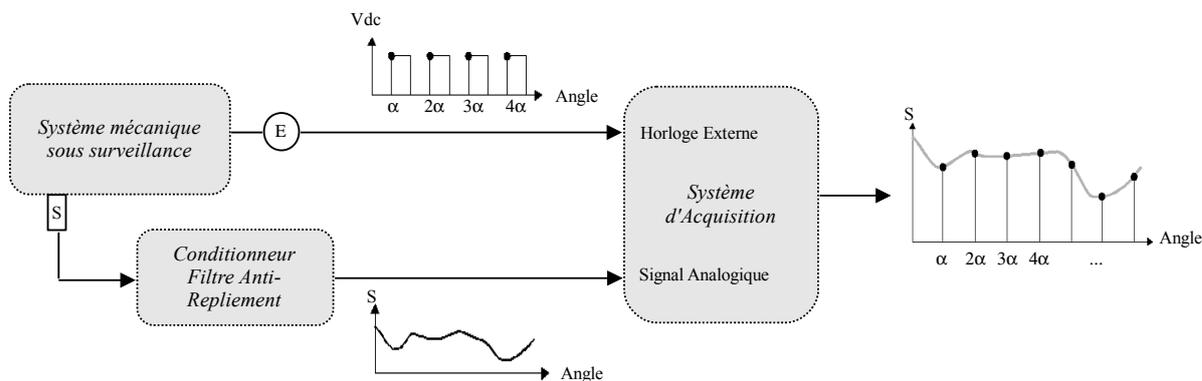


FIG. 1.1: Principe de l'échantillonnage angulaire.

Dans l'application expérimentale mise en place pour cette étude, l'auteur conserve la résolution originale du codeur et utilise un système de conditionnement conventionnel dont la fréquence de coupure est maintenue fixe. Bien que cette simplification technique facilite le conditionnement du signal ainsi qu'un échantillonnage non retardé⁴, du repliement est inévitablement introduit lors des phases de démarrage. Ainsi, la résolution du capteur angulaire doit être dimensionnée suffisamment prudemment pour élever la fréquence d'acquisition au delà de la fréquence de Shannon dans les conditions les plus basses tandis que la fréquence de coupure du filtre vibratoire doit être assez élevée pour ne pas masquer les composantes cycliques hautes-fréquences quand la ligne d'arbre est à plein régime. À première vue, il est de bon ton de limiter la fréquence de coupure en fonction de la vitesse minimale où le signal vibratoire peut être surveillé selon l'équation ci-dessous, directement adaptée du théorème de Shannon :

$$f_{\theta}^{max} \cdot \omega_{max} \leq f_c \quad (1.1a)$$

$$R \cdot \omega_{min} \geq 2 \cdot f_c \quad (1.1b)$$

où R est la résolution du capteur angulaire, ω_{max} , ω_{min} correspondent respectivement aux extrema de vitesse de rotation pendant l'acquisition en tour par seconde, f_{θ}^{max} est la plus haute fréquence cyclique⁵ sous surveillance tandis que f_c est la fréquence de coupure du filtre passe-bas utilisé pour conditionner le signal vibratoire.

L'échantillonnage angulaire permettant d'être parfaitement accordé avec la vitesse de la machine, le temps de mesure peut être allongé de manière à réduire la résolution fréquentielle ou le nombre de moyennage utilisé pour estimer le périodogramme moyenné. Le signal échantillonné angulairement peut éventuellement

⁴Les filtres suiveurs ne sont plus développés industriellement, et ce, en raison de cet inconvénient. (*Discussion orale avec un spécialiste de PCB Electronics, mars 2009*)

⁵Notion présentée dans la partie 2.2.2.2

être sous-échantillonné pour satisfaire les limites de calcul du post-traitement ou d'espace de stockage.

1.3.1.2 Rééchantillonnage angulaire

L'Échantillonnage Angulaire Direct étant généralement considéré comme trop coûteux et techniquement difficile à réaliser, la communauté scientifique a souvent préféré passer par un rééchantillonnage angulaire du signal vibratoire. Le rééchantillonnage angulaire peut être effectué avec l'appui d'un capteur angulaire ([POT 90][MCF 89][FUF 98]) ou en utilisant uniquement l'information de vitesse contenue dans le signal vibratoire. Privé de capteur angulaire, le rééchantillonnage reste possible tant que les variations de vitesse sont très lentes, par une utilisation avantageuse des phénomènes cycliques du signal vibratoire [BON 05]. Avec ou sans capteur angulaire, le rééchantillonnage ouvre effectivement la possibilité de générer une acquisition angulaire à partir d'une mesure classiquement synchronisée à pas de temps constant. L'étude ici proposée se limitant aux méthodes capables de fonctionner sous de larges variations de vitesse de rotation (de type montée en régime ou mise à l'arrêt), la méthode présentée par Bonnardot n'est pas mise en place.

En matière de repliement du signal vibratoire, l'acquisition naturelle à pas de temps constant favorise l'utilisation d'un filtre passe bas conventionnel. La fréquence de coupure, minorée par la plus haute condition de vitesse (voir éq. 1.1a), permet d'établir la fréquence d'échantillonnage du signal vibratoire en respect du théorème de Shannon. Le signal vibratoire temporel étant ainsi dépourvu de phénomènes repliés, le filtrage numérique qui précède le processus de rééchantillonnage permet de générer un signal vibratoire rééchantillonné exempt de repliement. C'est le filtre numérique qui permet alors d'assurer la condition précédemment définie par l'équation 1.1b.

La méthodologie de rééchantillonnage nécessite la maîtrise de la vitesse angulaire instantanée pour faire correspondre la discrétisation du signal analogique avec la position angulaire de la ligne d'arbre. Parmi les méthodes présentées dans le chapitre suivant, on s'intéresse aux méthodes de détermination "angulaire" de la vitesse instantanée (cf. §2.2.1.3). Ces méthodes sont ainsi qualifiées dans ce mémoire pour souligner la nature spatiale de l'échantillonnage qui les caractérise. Néanmoins, elles analysent le signal issu du capteur angulaire au moyen d'une horloge classique dont les impulsions sont délivrées à pas de temps constant. C'est d'ailleurs la célérité de l'horloge qui marque la différence qualitative entre les deux méthodes qui y sont répertoriées. D'une part, l'acquisition digitale, ou méthode de comptage, permet d'utiliser une horloge haute fréquence dont le rythme dépasse bien souvent les 100MHz . D'autre part, l'acquisition analogique, nécessitant un post-traitement détaillé dans la partie §2.2.1.3, voit la fréquence de l'horloge d'acquisition varier du kHz à quelques centaines de kHz. L'avantage certain de cette seconde solution réside dans la simplicité de son instrumentation : le capteur angulaire peut alors être acquis en parallèle du signal vibratoire, en n'utilisant qu'une seule

et même horloge de synchronisation pour l'ensemble des voies. En considérant que le rééchantillonnage est basé sur une méthode angulaire d'obtention de la vitesse instantanée, on distingue par les paragraphes suivants deux cas de réalisation.

Rééchantillonnage double.

Dans un mode de réalisation général où la résolution angulaire du rééchantillonnage F_θ diffère de la résolution du capteur angulaire R , une étape s'appuyant sur la fonction Angle/Temps est insérée dans le processus de rééchantillonnage. Le processus, représenté sur la Figure 1.2, traduit premièrement l'interpolation obtenue à partir de la séquence formée par les valeurs successives de vitesse instantanée, espacée suivant la résolution R . La fonction vitesse est intégrée pour obtenir la position angulaire correspondant à chaque instant, représentée par le graphe 1.2(a). Les temps de franchissement qui correspondent aux angles induits par la nouvelle résolution F_θ sont projetés sur le signal vibratoire. Le graphe 1.2(b) représente l'interpolation effectuée cette fois sur le signal vibratoire. Cette seconde interpolation fournit les valeurs correspondant aux instants de franchissement représentatifs d'une répartition angulaire de l'échantillonnage. Les fonctions d'interpolation choisies pour les deux signaux sont a priori différentes. Par exemple, dans le cas où la fréquence de rééchantillonnage F_θ est juste supérieure à la fréquence de Shannon, une interpolation du signal vibratoire utilisant des splines cubiques est nécessaire. En revanche, si l'estimation de la vitesse par le capteur angulaire introduit des défauts amplifiés par l'intégration qui mène à la position angulaire, un système de régression peut être mis en place pour filtrer les perturbations haute fréquence. Enfin, si les variations de vitesse qui sont subies par le mécanisme ou induites par des erreurs de mesure sont expérimentalement jugées sans influence sur le rééchantillonnage, une interpolation linéaire est suffisante. Dans [VIL 11], une comparaison des fonctions d'interpolation sur l'obtention de la fonction Angle/Temps à partir d'un capteur dont la résolution est relativement basse invite à retenir l'interpolation par spline cubique.

Rééchantillonnage simple.

Dans un mode de réalisation particulier où la fréquence de comptage F_c ⁶ correspond à la fréquence d'échantillonnage F_s et où la répartition spatiale des segments constitutifs du capteur angulaire n'est pas modifiée pendant le rééchantillonnage, de sorte que $F_\theta = R$, le procédé de rééchantillonnage peut alors être largement simplifié. Ce procédé s'appuie avantageusement sur le synchronisme des mesures pour simuler un Échantillonnage Angulaire Direct, sans pour autant nécessiter l'utilisation d'une horloge externe. Une étape de post-traitement, facilement intégrable dans un microprocesseur, détecte le premier point qui suit le franchissement d'un front montant sur le signal du capteur angulaire. Le signal vibratoire rééchantillonné est constitué des points synchrones aux points représentatifs de chaque front montant. L'illustration 1.3 synthétise le procédé en soulignant l'importance du synchronisme entre les acquisitions du capteur angulaire et du capteur vibratoire, où les diamants représentent les points mesurés et les ronds représentent

⁶Fréquence de l'horloge du compteur.

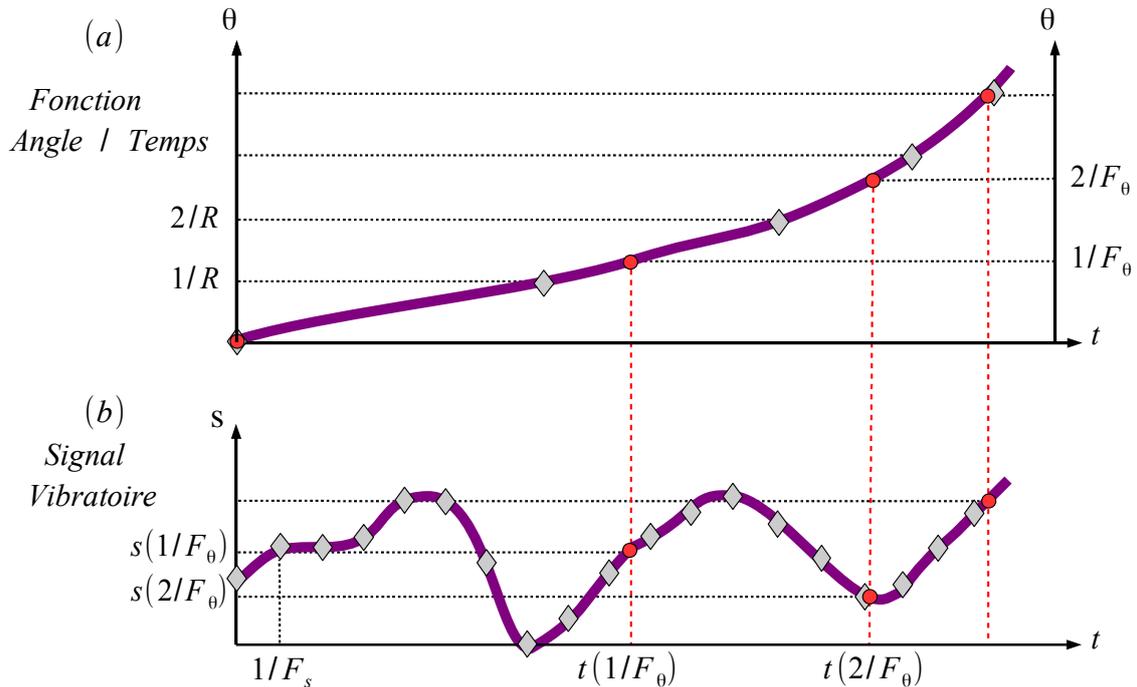


FIG. 1.2: Procédé de rééchantillonnage à l'appui de la fonction angle/temps (diamants : points mesurés, ronds : points rééchantillonnés)

les points retenus.

Influence d'une erreur sur l'estimation des fréquences d'échantillonnage.

Dans le cas où l'horloge synchronisant l'acquisition vibratoire est dissociée de l'horloge synchronisant l'acquisition du capteur angulaire, une erreur perturbe le rééchantillonnage. En effet, le procédé utilisant la fonction Angle/Temps considère que le rapport entre les fréquences F_c et F_s est connu, tandis que la méthode simple considère que les fréquences d'échantillonnage sont identiques. Cependant, la fréquence exacte d'une horloge n'est jamais parfaitement maîtrisée. L'amplitude de cette erreur, à priori inconnue, est propre à chaque horloge. Ainsi, hormis le cas particulier où la même horloge est utilisée pour synchroniser les deux acquisitions, le rapport F_s/F_c est différent de 1. Si l'on se place dans un mode de réalisation où les horloges sont dissociées, une étude disponible en annexe prouve qu'un effet de contraction perturbe le rééchantillonnage angulaire et son observation spectrale (voir Annexe A.3).

Par soucis de synthèse, seule la ligne conductrice de cette étude est présentée dans ce paragraphe. En considérant tout d'abord un compteur dont la fréquence est biaisée ⁷, l'intérêt est porté sur l'erreur induite sur l'estimation de la vitesse instantanée (voir An-

⁷c'est à dire un compteur dont la fréquence réelle est constante, mais légèrement différente de la fréquence souhaitée.

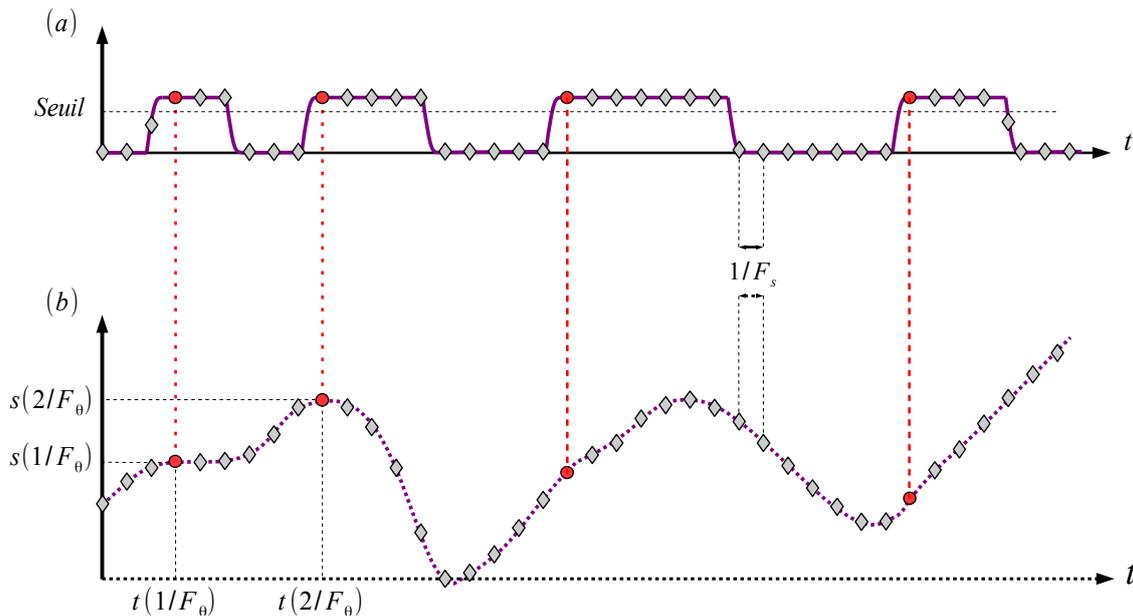


FIG. 1.3: Procédé de rééchantillonnage simple. a) signal issu du capteur angulaire. b) signal issu du capteur vibratoire.

nexe A.3.2). Le signal vibratoire, rééchantillonné par la suite à partir du signal biaisé de vitesse instantanée, est ensuite analysé. Il est montré que l'erreur initiale influence alors particulièrement la localisation fréquentielle des phénomènes cycliques. L'amplitude des composantes spectrales représentatives d'un phénomène cyclique n'est pas altérée de manière significative (voir Annexe A.3.3). Une méthode est ensuite proposée pour corriger l'erreur dans le cas très particulier où une acquisition de référence est réalisée parallèlement à la mesure défectueuse (voir Annexe A.3.4). Cette possibilité, relativement peu utile pour l'industrie, révèle sa pertinence pour améliorer l'étude expérimentale qui conclut ce chapitre.

1.3.2 Comparaison qualitative des procédés d'acquisition

1.3.2.1 Matériel et méthodes

L'expérience sous conditions non stationnaires.

Le banc d'essais utilisé dans cette étude, présenté en annexe (voir Annexe D.1.1), est constitué d'une boîte de vitesses automobile assimilable au multiplicateur d'un aérogénérateur. De plus, ce banc permet d'effectuer des mesures sous des conditions de fonctionnement non stationnaires et paramétrables, permettant ainsi de réaliser l'analyse comparative pendant une phase de montée en régime. Dans cette étude, le couple est maintenu constant à $200Nm$ sur l'arbre de pont, tandis que la vitesse passe de 100 à 1000 tours par minute en 1000 révolutions d'arbre primaire. La figure 1.4(a) présente

le signal vitesse obtenu par le capteur angulaire associé à une horloge de fréquence $F_c = 120MHz$. La figure 1.4(b) présente en parallèle l'évolution du signal vibratoire obtenu par Échantillonnage Angulaire Direct. L'accroissement significatif de son amplitude est représentatif de l'influence des variations de vitesse du mécanisme sur le comportement vibratoire des phénomènes mécaniques. Au delà de la qualité de l'échantillonnage angulaire, une approche où l'évolution des propriétés statistiques en fonction des conditions de fonctionnement serait prise en compte paraît indispensable pour analyser correctement ces signaux non stationnaires. Néanmoins, l'objectif étant ici limité à l'étude du système d'acquisition, on ne s'attache pas à corriger ce phénomène.

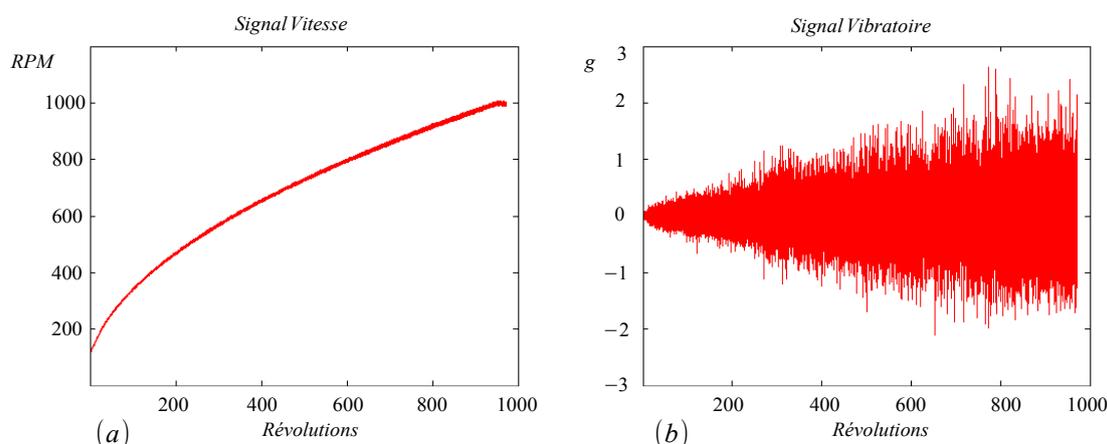


FIG. 1.4: Aperçu global de la mesure analysée. à gauche : évolution de la vitesse instantanée. à droite : évolution du signal vibratoire.

Les signaux obtenus par simulation.

Simultanément aux deux acquisitions angulaires présentées ci-dessus, une acquisition temporelle classique du signal vibratoire est effectuée à la fréquence $F_s = 105kHz$. Les signaux rééchantillonnés intervenant dans cette partie sont tous obtenus à partir de ce même signal vibratoire. Ils se distinguent par la fonction Angle/Temps utilisée, et donc par les propriétés du signal de vitesse instantanée.

Le premier paramètre étudié, d'ores et déjà présenté comme marque unique de différence entre les méthodes de détermination angulaire de vitesse instantanée, est la fréquence du compteur F_c . À partir du signal vitesse original, on simule le signal vitesse que l'on aurait obtenu si le même capteur angulaire avait été chronométré par une horloge de fréquence plus faible. Le phénomène de quantification, traduit par l'équation A.19, est d'autant plus influent que la fréquence de compteur est faible. 36 signaux sont ainsi simulés pour des fréquences de compteur allant de $17kHz$ à $120MHz$, et pour un capteur angulaire de 512 points par tour.

Ensuite, on s'intéresse à l'influence de la résolution du capteur angulaire sur la qualité du rééchantillonnage. En effet, l'EAD impose une condition de résolution minimum sur le

capteur angulaire pour assurer le respect du théorème de Shannon. Le rééchantillonnage n'étant plus limité par cette condition, l'utilisation de capteur angulaire rudimentaire devient envisageable. À partir du signal vitesse original, on simule le signal vitesse que l'on obtiendrait si la même horloge de fréquence F_c était utilisée sur un capteur de résolution plus faible. En sommant les écarts temporels 2 à 2, on simule les résultats que l'on obtiendrait à partir d'un capteur de résolution $R/2$. 11 signaux sont ainsi simulés, pour des résolutions allant de 0.25 à 256 points par tour. À partir des signaux ainsi obtenus sont déterminées les fonctions Angle/Temps, elles mêmes interpolées de manière à retrouver une résolution de 512 points par tour sur le signal vibratoire rééchantillonné. L'interpolation, qui s'appuie sur la méthode des splines cubiques, permet de respecter le théorème de Shannon sur le signal rééchantillonné.

Points de comparaison.

Pour comparer l'efficacité des procédés d'acquisition, l'analyse est focalisée sur l'observation spectrale de l'engrènement reliant l'arbre secondaire à l'arbre de pont de la boîte de vitesses pour de multiples raisons. Tout d'abord, les engrènements présentant le comportement cyclostationnaire d'ordre 1 le plus fort, ils seront efficacement observés au moyen d'une transformée de Fourier conventionnelle. Ensuite, comme on suspecte la qualité du rééchantillonnage de se détériorer quand la fréquence événementielle augmente, il est intéressant d'analyser dans sa globalité un phénomène vibratoire constitué de nombreuses harmoniques. Par le choc sec qu'il génère à chaque entrée en contact, l'engrènement présente des composantes vibratoires réparties sur l'axe des fréquences, atteignant la fréquence de coupure du filtre anti-repliement. Enfin, cet engrènement particulier permet de vérifier la capacité, pour le capteur angulaire de l'arbre primaire, de rééchantillonner un signal vibratoire afin de surveiller un élément porté par un autre arbre. La fréquence cyclique fondamentale correspondant à l'engrènement considéré, quand le rééchantillonnage est référencé à l'arbre primaire, est donnée par :

$$f_{\theta}^{GM} = \frac{N_3 \cdot N_1}{N_2} = 13.06452 \text{ ev.tr}^{-1} \quad (1.2)$$

N_1 , N_2 et N_3 correspondent aux nombres de dents que comptent les pignons impliqués dans le lien cinématique reliant le capteur angulaire à l'engrènement. Les composantes vibratoires correspondant aux 10 premières harmoniques sont classiquement observées via les fréquences cycliques $k \cdot f_{\theta}^{GM}$, $k = 1..10$. On note que sur une mesure où le système accélère de 100 à 1000 tours par minute, la dixième harmonique balaie l'ensemble des fréquences entre 220Hz et 2200Hz⁸. Pour comparer ces coefficients spectraux les uns aux autres, on définit le pourcentage $\rho_{x_i/x_r}(k)$ comme la différence relative entre l'amplitude de la $k^{\text{ème}}$ harmonique d'un signal rééchantillonné x_i et d'un signal de référence x_r :

$$\rho_{x_i/x_r}(k) = \left| \frac{|\mathcal{F}_{x_i}(k \cdot f_{\theta}^{GM})| - |\mathcal{F}_{x_r}(k \cdot f_{\theta}^{GM})|}{\mathcal{F}_{x_r}(k \cdot f_{\theta}^{GM})} \right| \cdot 100 \quad (1.3)$$

⁸La fréquence de coupure à 3db est réglée à 2,5kHz.

1.3.2.2 Résultats

Comparaison avec l'échantillonnage direct

Dans un premier temps, on cherche à qualifier l'influence du mode d'acquisition sur l'amplitude des composantes spectrales représentatives de l'engrènement. Le premier graphique, présenté sur la Figure 1.5(a), superpose l'amplitude des composantes spectrales obtenues par EAD et par rééchantillonnage angulaire ($F_c = 120\text{MHz}$, $R = 512$). Hormis les harmoniques 7 et 8 qui paraissent légèrement surestimées sur le spectre rééchantillonné, les résultats se superposent correctement. Sur le graphe de la figure 1.5(b), les spectres d'amplitude sont focalisés autour de la 7^{ème} harmonique et soulignent la différence la plus visible entre les deux méthodes d'acquisition. Le pourcentage $\rho_{x_{F_c}/x_\theta}(k)$ représenté sur la Figure 1.6(a) traduit l'évolution de la différence relative entre le signal obtenu par EAD et celui obtenu par rééchantillonnage, lui même obtenu pour différentes valeurs de fréquence compteur. L'interprétation est facilitée sur le graphe de la figure 1.6(b), où la courbe bleue décrit l'évolution de l'erreur moyenne en fonction de la fréquence du compteur. L'erreur y est alors moyennée sur les harmoniques, comme explicité par l'équation 1.4, pour évaluer un effet global sur le spectre.

$$\bar{\rho}_{x_{F_c}/x_{120\text{MHz}}} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{k=1}^{10} \rho_{x_{F_c}/x_{120\text{MHz}}}(k) \quad (1.4)$$

En l'occurrence, F_c n'a pas d'influence significative sur l'écart d'interprétation entre les deux modes d'acquisition. À l'exception de $F_c = 20\text{kHz}$, la différence moyennée oscille stablement autour de 2.5%. L'influence de la fréquence du compteur paraît donc négligeable devant l'influence de la méthode employée pour obtenir le signal angulaire.

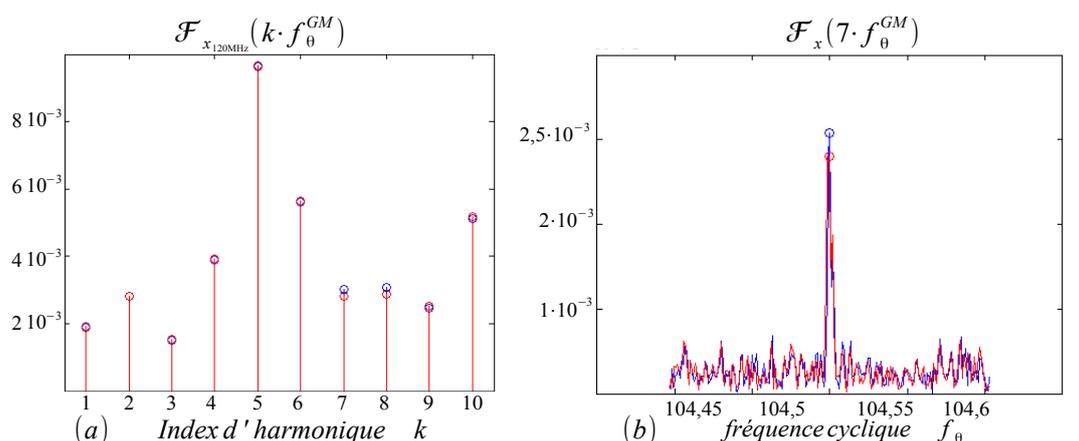


FIG. 1.5: Comparaison entre signaux obtenus par EAD (rouge) et par rééchantillonnage (bleu).

Sur l'ensemble des expériences, les amplitudes spectrales du signal obtenues par EAD sont en moyenne plus élevées, ce qui invite l'auteur à qualifier cette méthode de plus

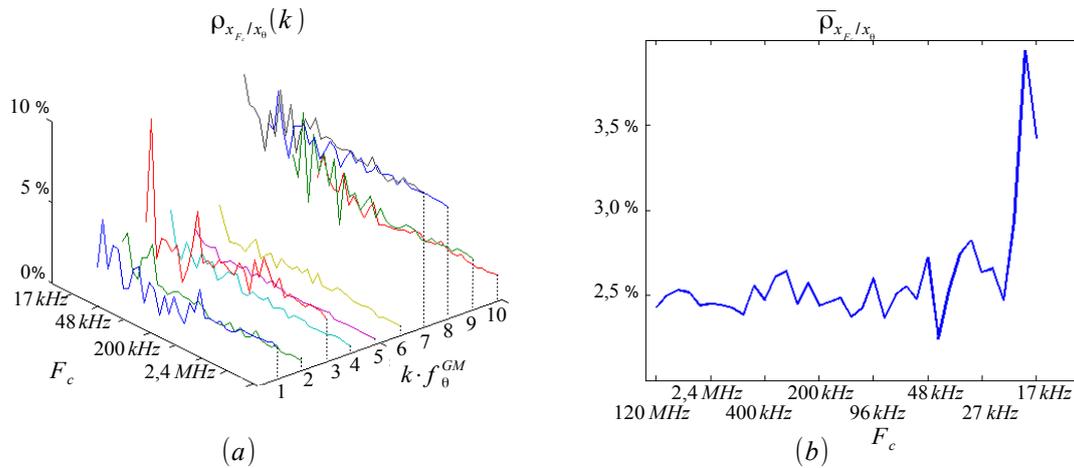


FIG. 1.6: Différence relative entre les simulations correspondant aux signaux rééchantillonnés pour différentes valeurs de F_c et le signal obtenu par EAD.

précise. Néanmoins, les différences ne sont pas suffisamment flagrantes pour placer une méthode devant l'autre. Et s'il paraît plus prudent de surveiller un phénomène vibratoire en s'appuyant sur l'ensemble de ses harmoniques pour atténuer l'influence du procédé d'acquisition, l'écart en terme de spécificité technique entre les systèmes d'acquisition n'est ici pas justifié.

Influence de la fréquence de compteur

L'Échantillonnage Angulaire Direct ayant perdu de sa verve dans le point précédent, l'intérêt n'est désormais porté qu'aux méthodes d'acquisition qui s'appuient sur le rééchantillonnage du signal vibratoire. Les graphiques de la Figure 1.7 présentent la différence relative $\rho_{x_{F_c}/x_{120MHz}}$ qui sépare les résultats obtenus en s'appuyant sur des fréquences de compteur plus faibles que celle de référence. Le signal pris pour référence est cette fois un signal rééchantillonné, dont le signal vitesse utilisé pour déterminer la fonction Angle/Temps présente les meilleures caractéristiques disponibles : $F_c = 120MHz$, $R = 512ppt$. Sur le graphe (b) de la figure 1.7, la courbe bleue représente l'évolution de l'erreur moyenne en fonction de la fréquence du compteur. L'erreur moyenne souligne ainsi l'évolution globale de l'erreur qui croît quand la fréquence de compteur diminue. Ainsi, la fréquence utilisée pour déterminer la vitesse instantanée a une influence sur la qualité du rééchantillonnage, qui semble affecter l'ensemble des harmoniques d'une même manière. Une rapide comparaison avec la courbe (b) de la Figure 1.6 montre que l'influence de la fréquence de compteur est effectivement moindre que celle induite par le choix de la méthode d'acquisition.

Influence de la résolution du capteur angulaire

Les graphiques de la Figure 1.8 présentent la différence relative $\rho_{x_{F_c}/x_{512ppt}}$ qui sépare les résultats obtenus en s'appuyant sur des fréquences de compteur plus faibles que celles

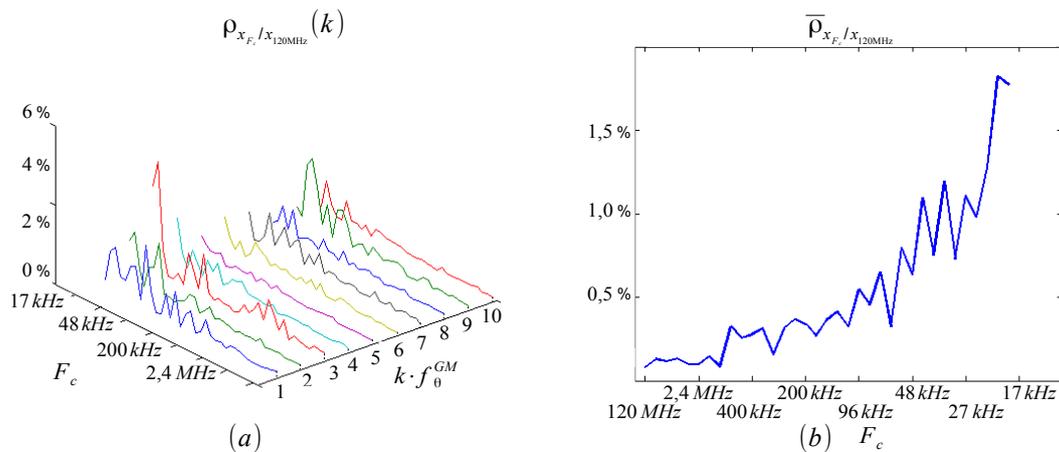


FIG. 1.7: Evolution de la différence relative entre les simulations correspondant aux signaux rééchantillonnés pour différentes valeur de F_c et le signal rééchantillonné à la fréquence $F_c = 120MHz$.

de référence. Le signal de référence est celui rééchantillonné à partir d'un signal vitesse défini sur 512 points par tour de capteur. Sur les graphes (a) et (b) ne sont présentés que les résultats obtenus pour des résolutions supérieures à 1. En effet, les résolutions plus faibles perturbent le signal rééchantillonné assez largement pour que la fréquence cyclique ne soit plus respectée (voir graphe (c) de la figure 1.8). Ce phénomène est très probablement lié à la forme convexe que présente la tendance macroscopique de la vitesse de rotation, visible sur le graphe de gauche de la figure 1.4. L'interpolation de la fonction Angle/Temps, basée sur la manipulation de splines cubiques, surestime légèrement la vitesse du mécanisme et les fréquence cycliques sont alors légèrement sous estimées⁹.

Il est intéressant de constater que même sous des conditions largement non stationnaires, l'utilisation d'un capteur angulaire basse résolution permet une estimation de la vitesse instantanée suffisante pour effectuer un rééchantillonnage de qualité. Dans le cas de l'éolienne instrumentée, le capteur inductif utilisé pour certifier en temps-réel le fonctionnement de l'accouplement entre le multiplicateur et la génératrice présente 16 périodes par tour, et constitue de ce fait un capteur angulaire potentiel pour rééchantillonner le signal vibratoire angulairement. Néanmoins, l'imprécision de la localisation fréquentielle soulignée par l'observation spectrale de la 7^{ème} harmonique invite à augmenter la résolution du capteur angulaire s'il est utilisé pour surveiller des fréquences plus élevées.

⁹l'interpolation linéaire induirait une sous estimation beaucoup plus visible de la vitesse du mécanisme.

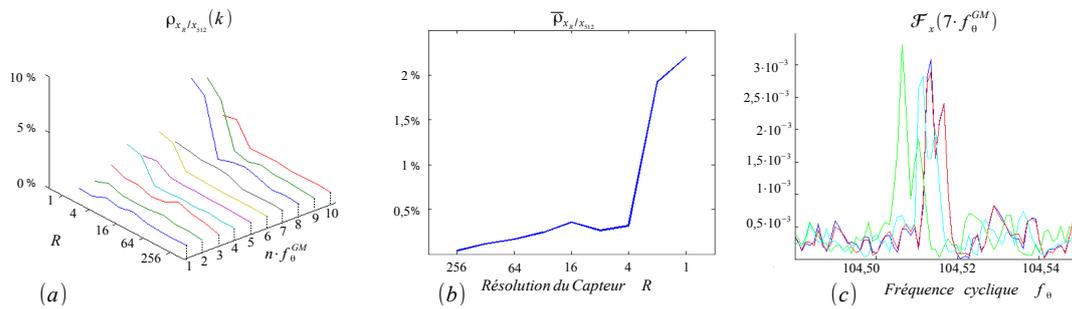


FIG. 1.8: Évolution de la différence relative entre les simulations correspondant aux signaux rééchantillonnés pour différentes valeur de R . Les spectres focalisés sur la 7^{ème} harmonique, sont obtenus à partir de capteurs de résolution $R = 2048$ (en bleu), $R = 1$ (en rouge), $R = 0.5$ (cyan), $R = 0.25$ (en vert),

1.3.3 Conclusion

L'étude expérimentale présentée ci-dessus permet de statuer sur des questions qui restaient jusqu'alors sans réponse. En particulier, nous retiendrons que :

1. la différence qui distingue les résultats obtenus par rééchantillonnage de ceux obtenus par EAD n'est pas suffisante pour justifier l'utilisation d'un matériel plus onéreux.
2. dans le cas des solutions par rééchantillonnage, utiliser la même horloge pour synchroniser l'acquisition des signaux vibratoire et vitesse évite l'effet de contraction spectrale.
3. la résolution du capteur angulaire utilisé pour obtenir le signal de vitesse instantanée a une légère influence sur la qualité du rééchantillonnage.
4. la fréquence utilisée pour obtenir le signal de vitesse instantanée a une légère influence sur la qualité du rééchantillonnage.

À l'interprétation de l'auteur, l'application industrielle peut se satisfaire d'analyses basées sur l'utilisation de capteurs conventionnels¹⁰ et de synchroniser l'acquisition du signal provenant du capteur angulaire avec la même horloge que celle utilisée pour les signaux vibratoires¹¹. Cependant, force est de constater que la qualité du rééchantillonnage dépend de la qualité avec laquelle le signal vitesse est décrit. Et si la surveillance vibratoire n'est qu'un tremplin pour aborder la surveillance par vitesse instantanée, la maîtrise de la qualité du signal de vitesse instantanée apparait primordiale pour déterminer la qualité du système de surveillance vibratoire sous conditions non stationnaires. Les multiples phénomènes mis en jeu dans la détermination de cette précision seront abordés en détail dans le chapitre suivant.

¹⁰type roue phonique 16 dents par tour

¹¹classiquement autour de 20kHz

1.4 Ouverture vers l'analyse de vitesse instantanée

L'échantillonnage vibratoire temporel est très largement répandu, aussi bien dans le monde industriel que dans celui de la recherche. Ce monopole est rationnellement lié à la proportion écrasante de systèmes mécaniques dont la surveillance peut s'effectuer sous un régime établi. Paradoxalement, même les systèmes de surveillance dédiés aux machines non stationnaires, tels que ceux commercialisés dans l'éolien à l'instant où ce chapitre fut rédigé, sont basés sur un échantillonnage temporel.

Pourtant, l'analyse des méthodologies employées en surveillance vibratoire temporelle révèle un contre sens. Derrière les indicateurs qualifiant l'état des éléments mécaniques sous surveillance se cachent des outils de traitement évolués, dont la plupart considère l'échantillonnage comme réparti angulairement. Aujourd'hui, même dans le cas d'un système fonctionnant à régime établi, l'amalgame entre le signal temporel et le signal angulaire est remis en cause par la communauté scientifique. Il est donc plus que pertinent de réfléchir à une solution d'acquisition angulaire en matière de surveillance dans le domaine éolien.

Historiquement, l'échantillonnage angulaire direct a apporté une première solution à ce problème. Ensuite sont apparues les méthodes de rééchantillonnage, préférées par la communauté scientifique car plus faciles à mettre en œuvre. À l'échelle des exigences émises par la communauté industrielle de surveillance vibratoire, l'étude comparative réalisée en fin de chapitre garantit la suffisance qualitative des méthodes de rééchantillonnage pour des conditions de fonctionnement telles que celles rencontrées dans l'éolien.

Néanmoins, la solution vibratoire, qu'elle soit temporelle ou angulaire, est limitée en de nombreux aspects. Le filtrage particulièrement perturbateur des signatures vibratoires par les voies de transfert structurelles, la complexité des outils de traitement mis en jeu pour retrouver la signature de l'excitation, le nombre important de capteurs vibratoires permettant de contrer les effets de l'amortissement et plus généralement, le prix des systèmes d'acquisition, sont autant de raisons qui invitent à imaginer et développer de nouvelles solutions de surveillance.

Chapitre 2

Introduction aux Mesures de Vitesse Angulaire Instantanée

Les variations de vitesse subies par une machine tournante sont un vecteur d'information original susceptible de s'avérer particulièrement adapté à la surveillance des machines tournantes sous conditions non stationnaires.

Parmi les différentes formes que peut prendre ce signal, la méthode spectrale appliquée au signal obtenu par Écart Temporel apparait dans ce chapitre comme la mieux adaptée.

Les limites de cette méthode sont présentées puis analysées, de manière à enrichir la connaissance d'un procédé aujourd'hui encore relativement méconnu.

Sommaire

2.1	Introduction	29
2.2	Particularités du système d'acquisition	30
2.2.1	Principe d'acquisition des signaux	30
2.2.2	Fondamentaux de l'observation angulaire	37
2.2.3	Nature du signal vitesse instantanée	40
2.3	Détermination de la précision d'une mesure de vitesse instantanée par écart temporel	45
2.3.1	Erreur de quantification	46
2.3.2	Erreur géométrique	57
2.3.3	Erreur électrique	63
2.3.4	Validation expérimentale	65
2.4	Conclusion	74

2.1 Introduction

Les systèmes de surveillance vibratoire, qu'ils soient angulaires ou temporels, sont marqués par des limites physiques que les développements scientifiques et technologiques peinent à faire progresser. Et si ces systèmes gardent aujourd'hui encore une place privilégiée dans la surveillance industrielle de machine tournante, la mesure de vitesse instantanée apparaît dans certains travaux scientifiques comme une alternative prometteuse.

Avant d'être angulaire, la vitesse instantanée s'est déjà illustrée comme un vecteur pertinent d'informations sur le comportement d'une machine tournante. Plusieurs méthodes seront donc présentées aussi bien pour obtenir cette mesure que pour l'analyser (2.2). En complément du chapitre précédent, les atouts apportés par l'approche angulaire seront particulièrement justifiés et l'attention sera par la suite focalisée sur l'observation spectrale d'une mesure angulaire de la vitesse instantanée.

Car si l'influence du bruit de mesure est aujourd'hui maîtrisée pour la surveillance vibratoire, l'analyse de la précision d'une mesure de vitesse angulaire instantanée sera particulièrement approfondie (2.3). Cette étude permettra de qualifier les moyens de mesure à mettre en œuvre.

2.2 Particularités du système d'acquisition

2.2.1 Principe d'acquisition des signaux

Dans la partie précédente, la mesure de vitesse instantanée est apparue comme un problème générique dans différentes applications de surveillance et/ou de contrôle des machines tournantes. Ainsi, plusieurs méthodes ont été développées pour l'estimer. L'intérêt est ici porté à celles dont l'observation est réalisée au moyen d'un capteur capable de convertir une position angulaire en un signal électrique. Une première partie présente succinctement l'éventail des technologies actuellement disponibles pour effectuer une mesure de vitesse instantanée. En fonction du système d'acquisition disponible en aval du capteur, plusieurs méthodologies ont été développées pour convertir le signal électrique issu du capteur angulaire en une estimation de la vitesse instantanée. Dans la littérature, ces méthodes sont ordonnées selon le type de conversion appliquée au signal provenant du capteur, menant ainsi à la distinction entre « méthodes digitales » et « méthodes analogiques » [GU 06],[YUH 05] [YU 10]. Fort de l'analyse menée dans le premier chapitre, il apparaît judicieux de réorganiser ces méthodes pour opposer les « méthodes temporelles » aux « méthodes angulaires ». De nouveau, les méthodes seront qualifiées de « temporelles » si le signal apparaît discrétisé par pas de temps ; elles sont détaillées dans une seconde partie. Enfin, dans une troisième partie, l'intérêt est porté au fonctionnement des méthodes basées sur une observation angulaire. Le choix d'utiliser l'une des méthodes accompagne la justification d'une telle distinction méthodologique dans une dernière partie.

2.2.1.1 Le choix d'un capteur angulaire

La plupart des capteurs utilisés pour étudier la vitesse de rotation d'un mécanisme sont des codeurs optiques, magnétiques ou des roues à effet hall [BIN 92]. Si les capteurs optiques sont connus pour atteindre de meilleurs résultats en terme de résolution et de précision, les deux autres capteurs présentent l'avantage de pouvoir être installés dans des conditions environnementales plus sévères. Cependant, moyennant un conditionnement strict pour les capteurs optiques, ou une aimantation associée à une interpolation de qualité pour les capteurs magnétiques, ces technologies parviennent à rattraper leurs lacunes respectives. Par conséquent, ces capteurs sont couramment employés par l'industrie comme par la recherche pour contrôler l'asservissement des moteurs électriques et autres génératrices. Les roues à effet hall, ou roues phoniques, sont encore utilisées industriellement sur les arbres de grand diamètre, le plus souvent dans le but de détecter la rupture d'un accouplement.

En marge de ces capteurs angulaires historiquement employés pour l'analyse de vitesse instantanée, d'autres mesures ont été effectuées avec de coûteux vibromètres laser [HAL 96], des capteurs potentiométriques souvent limités en résolution [LI 98] ou autres résolveurs magnétiques dont la sensibilité a la mauvaise réputation de décroître forte-

ment quand la résolution augmente [KAU 97]. Ces capteurs marginaux, dont le fonctionnement est schématisé sur la figure 2.1, sont autant de solutions technologiques permettant la surveillance par vitesse instantanée. Si le terme *codeur* est la dénomination généralement employée pour faire référence aux capteurs rotatifs optiques, magnétiques et potentiométriques, le terme *capteur rotatif* est ici préféré car il permet d'englober l'ensemble des éléments capables de convertir une position angulaire en signal électrique. Dans la plupart des cas, un capteur peut être décomposé en deux parties :

- une partie fixe, associée à la tête de lecture.
- une partie rotative, associée à la mire.

Pour faciliter le choix d'une technologie de capteur, une description des caractéristiques attendues par l'utilisateur est présentée ci dessous.

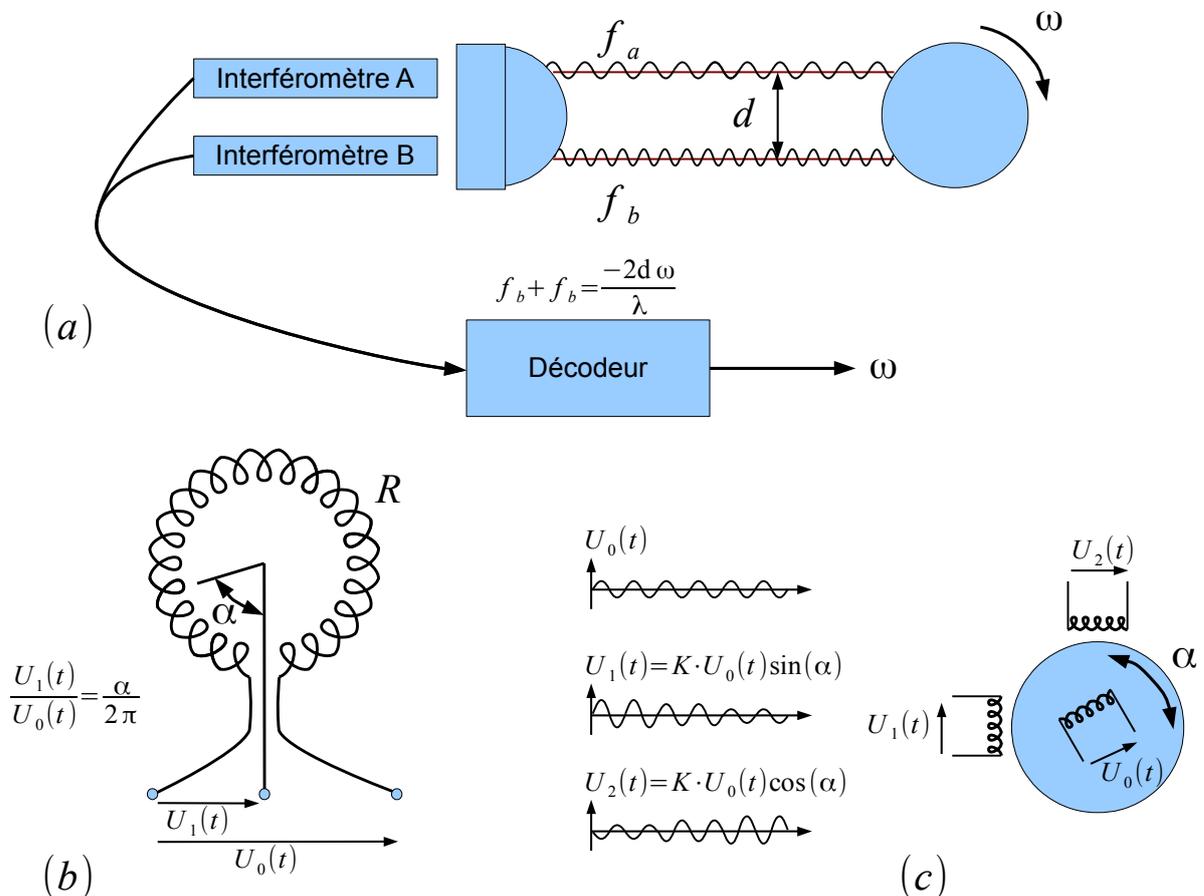


FIG. 2.1: Différentes technologie donnant accès à la position angulaire. a) Vibromètre laser. b) Potentiomètre. c) Résolveur magnétique.

Avec/Sans contact. C'est souvent pour assurer un meilleur conditionnement que certains capteurs voient leur partie fixe et rotative physiquement reliées par l'intermédiaire

d'un palier à roulement. La plupart des codeurs optiques et potentiométriques doivent se plier à cette contrainte pour atteindre les indices de protection requis dans l'industrie. L'absence de frottement n'est pas le seul avantage des capteurs sans contacts, ils sont aussi moins sensibles aux efforts de flexion et permettent souvent une installation plus aisée. Dans l'expérimentation menée sur l'éolienne, deux capteurs sur trois sont sans contact (voir Annexe D.1.3).

Taille de l'entrefer. Caractéristique fondamentale des capteurs sans contact, ce paramètre définit la distance qui doit/peut séparer la mire de la tête de lecture. Une lumière importante facilite l'installation du capteur et fiabilise ce dernier vis à vis des risques liés à l'orbite que peut suivre l'arbre sous des sollicitations dynamiques particulières. En outre, l'entrefer radial est un intervalle de tolérance permettant au système de mesure de s'adapter aux éventuels défauts de faux rond et d'excentrique de la piste de lecture. Néanmoins, une augmentation de la lumière est souvent associée à une perte de précision et de résolution.

Type de montage. La partie tournante des capteurs peut être fixée selon différentes approches (voir figure 2.2) :

- montage à axe sortant/entrant
- montage à axe traversant

Bien que le conditionnement des capteurs à axe traversant soit plus délicat à assurer, ce sont les seuls capteurs qui peuvent être installés ailleurs qu'en bout d'arbre. Nous verrons dans la partie instrumentation que cette caractéristique est aussi particulièrement déterminante dans le choix du capteur. Rémond préfère aussi ce second type de capteur car il peut être inséré au plus près de l'organe mécanique sous surveillance/contrôle [RÉM].

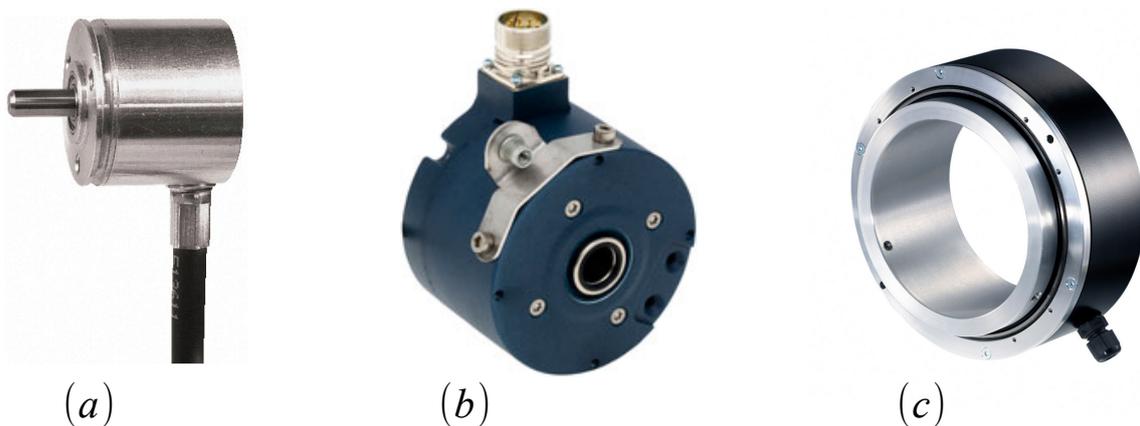


FIG. 2.2: Mode de fixation de la partie tournante d'un capteur angulaire : montage à axe a) sortant, b) entrant et c) traversant.

Résolution du capteur. Il s'agit du nombre d'impulsions délivrées par le capteur pendant une révolution de sa partie tournante. La résolution est souvent liée au nombre de traits/encoches/pôles dont la mire est le plus souvent constituée, mais est aussi parfois liée à un processus d'interpolation dont la qualité dépend aussi bien de l'algorithme mis en place que de la qualité de réalisation des traits/encoches/pôles. Certains capteurs, comme les résolveurs, ne sont pas constitués d'une mire dont la position angulaire est discrétisée. Leur résolution ne dépend alors que du processus d'interpolation le plus souvent intégré dans la tête de lecture [BER 99].

Conditionnement du signal. Le conditionnement associé à un capteur angulaire inclut l'amplification, le filtrage pour retirer des impulsions liées au bruit, l'éventuelle interpolation associée à la mise en forme [BER 99]. La figure 2.3 résume les étapes successives du conditionnement d'un capteur rotatif par un schéma simplifié. Le conditionnement est souvent intégré à la tête de lecture si bien que le signal en sortie est assimilable directement à un créneau.

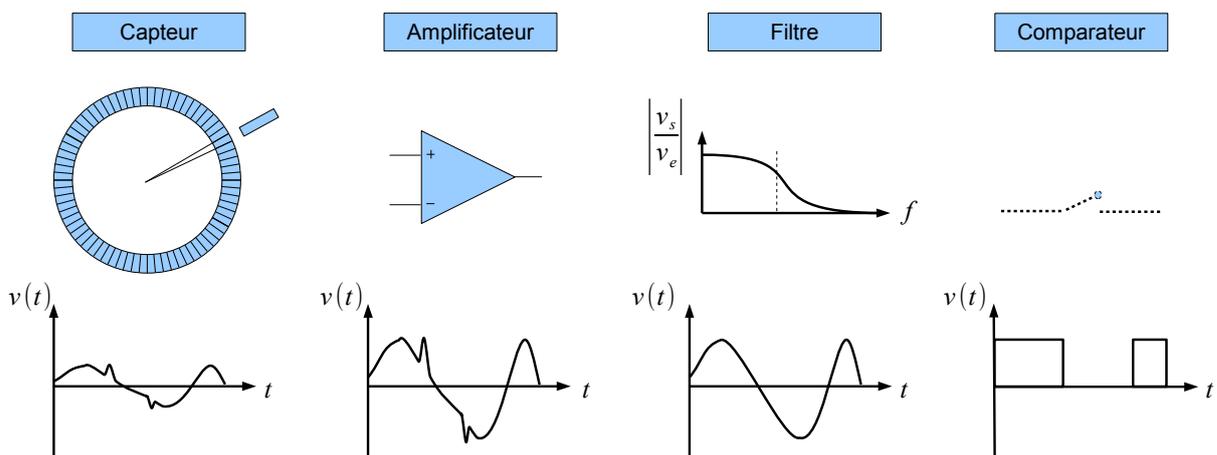


FIG. 2.3: Conditionnement du signal d'un capteur angulaire.

Si la qualité des résultats peut dépendre du type de capteur choisi, il est important de noter que le choix technologique du capteur est indépendant du choix de la méthode employée pour obtenir l'information de vitesse angulaire. Les méthodes présentées dans les parties suivantes peuvent être employées sur tout type de capteurs angulaires.

2.2.1.2 Méthodes temporelles

La famille qualifiée de temporelle regroupe les méthodes visant à discrétiser le signal vitesse en fonction du temps. Par analogie au vocabulaire employé dans le chapitre précédent, une telle mesure est constituée de valeurs séquencées à pas de temps constant. Relativement intuitive, la méthode du « fréquencemètre » mesure l'angle parcouru par

le codeur pendant un temps fixé en comptant le nombre de front du signal émis par le capteur angulaire. Cette méthode, traditionnellement utilisée sur les tachymètres rudimentaires des véhicules automobiles, s'adapte mal aux vitesses lentes.

Plus récemment, Gu et al. présentent le signal de vitesse angulaire instantanée comme un signal modulé en fréquence [GU 06] : estimer la vitesse angulaire instantanée équivaut à rechercher la fréquence instantanée d'un signal modulé en fréquence. Cette proposition intéressante permet d'utiliser avantageusement les solutions développées dans le domaine de la fréquence instantanée par une communauté scientifique prolifique. En effet, la fréquence instantanée est un sujet apprécié en traitement du signal, de l'image et plus largement dans diverses applications de vibration acoustique et de télécommunication. Une légende d'initiés prétend qu'il en est fait mention dans des ouvrages scientifiques du XIX^{ème} siècle [GIR 02], c'est néanmoins la contribution de Gabor et Ville à ce sujet dans les années 40 qui ont marqué le début de l'engouement par la communauté scientifique pour ce concept [GAB 46] [VIL 48]. Depuis, de nombreuses approches ont été développées pour améliorer la vitesse et la précision de l'estimation de fréquence instantanée, dont une simplification est présentée ci-après.

Cette notion de fréquence instantanée, un concept intimement lié à l'analyse temps-fréquence, est présentée en détail pour justifier son classement parmi le groupe des méthodes temporelles. Si l'on modélise le signal issu du capteur en ne tenant compte que de sa fréquence fondamentale, on obtient un signal modulé en fréquence typique :

$$s(t) = A \cos(\omega_c t + \phi(t)) \quad (2.1)$$

où A est l'amplitude de la sinusoïde, ω_c la fréquence de la porteuse et $\phi(t)$ le déphasage. Il est courant de faire correspondre à un signal physique sinusoïdal tel que $s(t)$, un signal analytique complexe dont le signal physique est la partie réelle. Si l'on construit la représentation analytique $w(t)$ du signal $s(t)$, telle que :

$$w(t) = s(t) + i\mathcal{H}\{s(t)\} = A(t)e^{i\phi_s(t)} \quad (2.2)$$

où \mathcal{H} représente la transformée de Hilbert définie par $\mathcal{H}\{s(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{\tau-t} d\tau$, la vitesse instantanée s'obtient théoriquement par la dérivée temporelle de la phase ϕ_s ,

$$\omega(t) = \frac{d\phi_s}{dt} = \frac{d}{dt} \text{Im} \{ \ln(w(t)) \} = \text{Im} \left\{ \frac{\dot{w}(t)}{w(t)} \right\} \quad (2.3)$$

où $\omega(t)$, la fréquence de modulation, est justement définie à pas de temps constant. Cette méthode ne peut être appliquée qu'à des signaux constitués d'une seule composante fréquentielle. Néanmoins, l'approche fréquentielle permet de transformer facilement tout type de porteuse (triangle, carré) en une forme sinusoïdale et facilite l'utilisation de l'opérateur différentiel. Très appréciée par la communauté scientifique [GU 06] [CHA 09], l'approche fréquentielle permettant de démoduler un signal est résumée ci-dessous :

1. appliquer la Transformée de Fourier Discrète (TFD) au signal modulé en fréquence pour obtenir $\mathcal{F}_{s(t)}(f)$
2. annuler les composantes négatives de la TFD pour obtenir une séquence du signal analytique dans le domaine fréquentiel $\mathcal{F}_{w(t)}(f)$
3. multiplier le signal analytique par une fenêtre centrée sur la fréquence porteuse pour en faire un signal mono-composante $\mathcal{F}_{w_{fen}(t)}(f)$
4. appliquer une Transformée de Fourier Discrète Inverse au signal pour retrouver le signal analytique de la composante fréquentielle d'intérêt : $w_{fen}(t)$
5. appliquer la TFDI au produit d'une séquence filtrée par une séquence fréquentielle pour obtenir la séquence dérivée $w'_{fen}(t)$
6. calculer la vitesse angulaire instantanée à partir de l'équation 2.3

Si l'approche fréquentielle facilite l'application de cette méthode, elle met aussi en valeur ses limitations :

- la fréquence porteuse doit être stable. Dans la pratique, cela signifie que la mesure doit être effectuée à vitesse relativement stationnaire. L'objectif est donc de surveiller les variations de vitesse d'un mécanisme dont le comportement est globalement stationnaire.
- le filtre utilisé pour isoler la fréquence porteuse doit être correctement choisi puis paramétré. Si la forme du filtre appliqué au signal fut l'objet de plusieurs études comparatives dont la plus récente met la fenêtre gaussienne en avant [VAK 00], il est difficile de donner une règle pour le paramétrage de la largeur de bande. Gu préconise d'adapter la largeur de bande en fonction de la largeur de bande d'intérêt, tandis que Vakman souligne que la variance du bruit induite par cette méthode d'estimation est proportionnelle à la largeur de bande du filtre [VAK 00].

2.2.1.3 Méthodes angulaires

À l'inverse, la famille qualifiée d'angulaire dont il est question dans cette partie regroupe les méthodes visant à discrétiser le signal vitesse en fonction de l'angle. En d'autres termes, une telle mesure est constituée d'écart temporel à pas d'angle constant.

Par analogie au « fréquencemètre » présenté dans la partie précédente, la méthode du « périodemètre » mesure au moyen d'une horloge haute fréquence le temps parcouru par le capteur pour franchir un pas d'angle. Pratiquement, il est question de compter le nombre d'impulsions délivrées par une horloge haute fréquence entre deux événements du capteur angulaire. Dans un premier mode de réalisation illustré par la figure 2.4, où le signal issu du capteur angulaire est considéré binaire, les événements déclenchant le comptage des impulsions peuvent être les fronts montants, descendant, ou les deux. Le signal issu du capteur étant considéré binaire, il peut alors être traité par des cadences de comptage allant du méga-hertz aux giga-hertz. Rémond utilise cette méthode pour qualifier l'Erreur de Transmission et identifier un défaut de roulement sur un véhicule

fonctionnant à régime non stationnaire [RÉM] [REN 10].

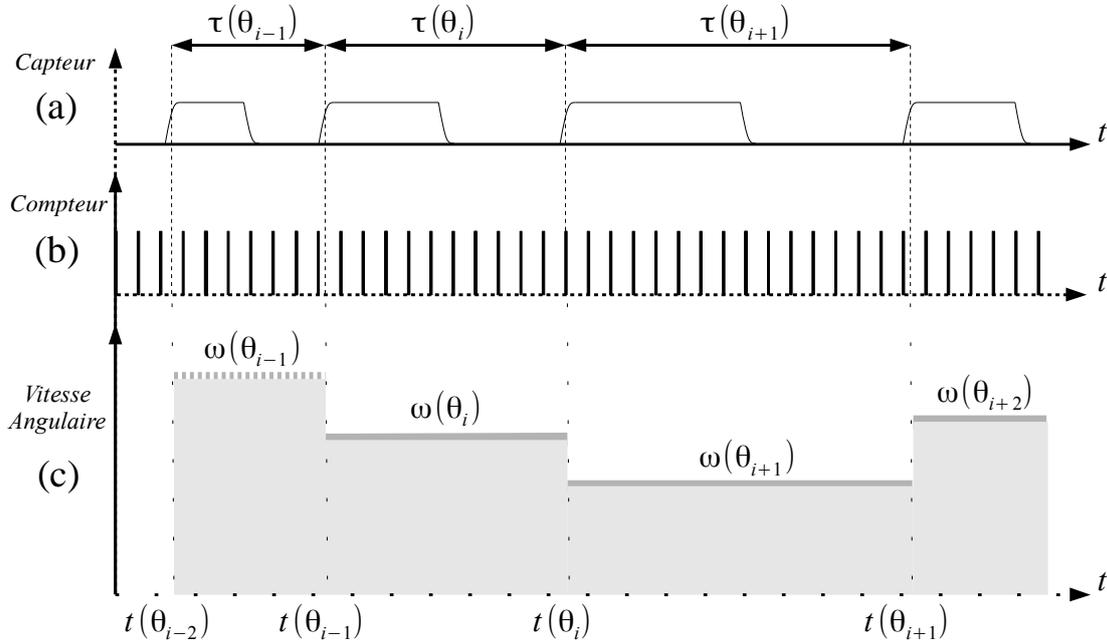


FIG. 2.4: Mesure de Vitesse Instantanée Angulaire en utilisant la technique de comptage. a) signal du capteur. b) signal du compteur. c) estimation de la vitesse angulaire instantanée.

Dans un second mode de réalisation, une méthode de détection des zéros utilisée à partir d'une acquisition analogique permet de retrouver la position du franchissement de seuil en dépit de la discrétisation du signal temporel. Le signal issu du capteur étant considéré linéaire entre les deux points consécutifs, le zéro est retrouvé par interpolation linéaire, comme présenté Fig 2.5. S'il paraît plus efficace d'appliquer cette méthode à des signaux sinusoïdaux [JIA 01], dont l'interpolation linéaire paraît peu biaisée, il est courant de voir cette méthode appliquée à des signaux créneaux de type TTL [YU 10].

Que le signal issu du capteur soit considéré binaire ou analogique, la méthode du « périodemètre » s'appuie sur la localisation de chaque évènement délivré par le capteur angulaire dans le temps. La vitesse instantanée sur chaque segment du capteur angulaire est déterminée par la relation suivante :

$$\omega(\theta_i) = \frac{2\pi F_c}{R \cdot \tau(\theta_i)} = \frac{2\pi F_c}{R \cdot (t(\theta_i) - t(\theta_{i-1}))} \quad (2.4)$$

où $\omega(\theta)$ dépend de la résolution du compteur R et de la fréquence de comptage F_c . Le temps pris par le capteur pour parcourir l'angle θ correspond à la différence des instants

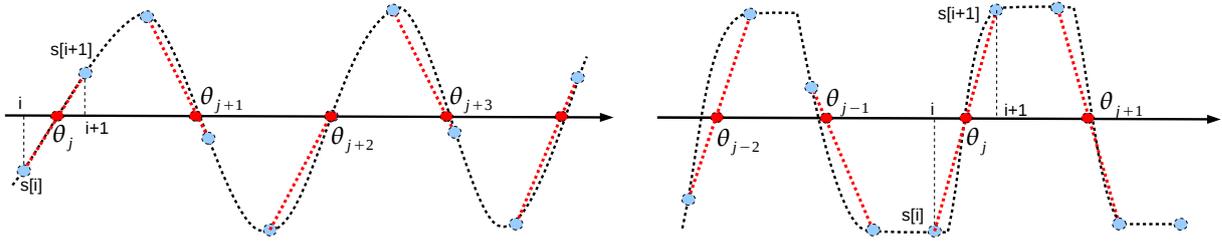


FIG. 2.5: diagramme schématique de la méthode de détection de zéro.

$t(\theta_i)$ et $t(\theta_{i-1})$ présentés sur la Figure 2.4. Ce temps écoulé pendant le franchissement de l'angle θ est appelé signal Écart Temporel (ET) et sera noté, par la suite, $\tau(\theta)$.

2.2.1.4 Une méthode angulaire pour une mesure angulaire.

Bien que les méthodes temporelles aient dominé le développement des techniques de mesure de vitesse angulaire « instantanée », il est fondamental de différencier la mesure du temps séparant deux impulsions du capteur angulaire et la mesure du nombre d'impulsions délivrées par le capteur angulaire sur un temps donné. En effet, le terme « vitesse angulaire instantanée »¹ employé, que la méthode soit temporelle ou angulaire, renvoie ainsi abusivement vers deux quantités distinctes, en fonction de la nature de l'intervalle d'observation sur lequel est intégré le déplacement du codeur. L'étude des systèmes vibratoires réalisée dans le premier chapitre invite à discrétiser la vitesse angulaire instantanée dans le domaine angulaire. Elle reste ainsi corrélée aux éléments dont les événements caractéristiques se situent à des positions angulaires pré-déterminables. *A contrario*, l'instant d'apparition de ces mêmes événements ne peut être prédéterminé sans maîtrise de la vitesse. Et quelque soit la méthode utilisée pour déterminer la vitesse, l'erreur effectuée lors de son estimation est rarement négligeable. En outre, l'intérêt d'une discrétisation angulaire réside dans la possibilité de s'affranchir des conditions de vitesse sur les traitements du signal postérieurs. Le paragraphe suivant détaille la théorie qui justifie l'utilisation de l'approche angulaire ainsi que les premiers outils de diagnostic disponibles dans la littérature.

2.2.2 Fondamentaux de l'observation angulaire

Dans le chapitre précédent, le signal vibratoire échantillonné en angle fut intuitivement transformé dans l'espace de Fourier par analogie à l'analyse conventionnelle des signaux échantillonnés en temps, et l'avantage procuré par l'approche angulaire ne fut qu'exprimée qualitativement. Néanmoins, l'isomorphisme de Wold apparaît comme une fondation théorique solide justifiant l'avantage de l'observation angulaire, qu'elle se situe dans le domaine spatial ou temporel.

¹comprendre « vitesse de rotation instantanée »

C'est une pratique courante en mécanique vibratoire que de qualifier les processus vibratoires de stochastiques. Les signaux vibratoires sont ainsi analysés par l'évolution discrète d'une variable aléatoire qui les caractérise. Cette approche fait intervenir dans ses développements théoriques des moyennes d'ensemble qu'il est difficile d'estimer dans la pratique. Il est en effet nécessaire de réitérer la même expérience un grand nombre de fois. L'échantillonnage angulaire permet de substituer à l'analyse du processus stochastique $\{x(\theta_i)\}_{\theta_i \in \mathbb{N}}$, celle du processus

$$\{x_{\Theta}(\theta_i, \zeta)\}_{\theta_i=0}^{N_{\Theta}-1} \triangleq x(\theta - \zeta \cdot N_{\Theta}, \xi_i) \quad (2.5)$$

défini sur la longueur angulaire N_{Θ} du cycle avec ζ une variable aléatoire qui prend des valeurs entières dans un espace de probabilité donné. En d'autres termes, à une trajectoire particulière $x(\theta, \xi_i)$ issue de l'épreuve ξ_i et de durée extrêmement longue (correspondant à une mesure), on associe un grand nombre de trajectoires $x_{\Theta}(\theta, \zeta_i)$ de durée la longueur du cycle issue des épreuves ζ_i (chacune correspond à un cycle machine de la mesure). Cette mise en correspondance définit l'isomorphisme de Wold qui est une idée similaire à celle d'ergodicité [GAR 90, ANT 09b]. En simplifiant, les statistiques angulaires de $x(\theta, \xi_i)$ sont les statistiques d'ensemble de $x_{\Theta}(\theta)$ dont les motifs sont répétés à l'infini de manière à les rendre périodiques. Cet artifice permet de remplacer la moyenne d'ensemble par une moyenne sur les cycles et est utilisé plus ou moins directement aussi bien dans les observations spatiales que spectrales. Le principe de l'isomorphisme de Wold est schématisé sur la Fig. 2.6.

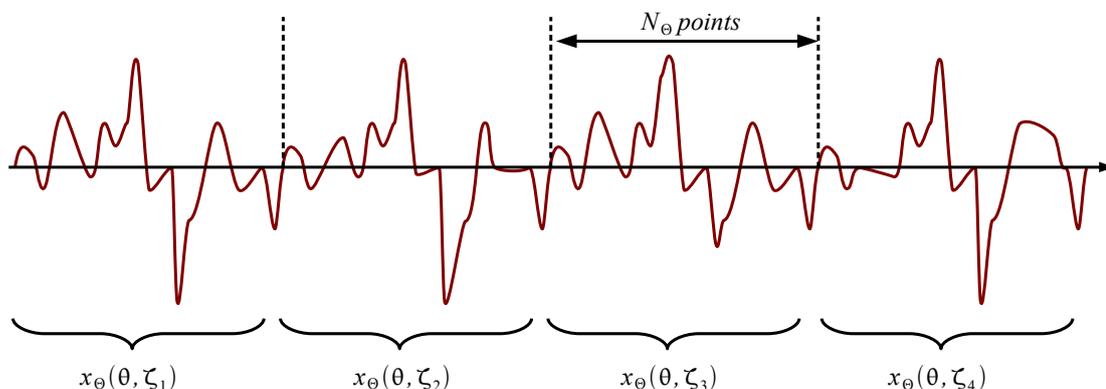


FIG. 2.6: Illustration de l'isomorphisme de Wold sur une réalisation $x(\theta, \xi)$ du processus aléatoire.

2.2.2.1 Observation spatiale

L'observation spatiale de la vitesse instantanée est initialement mise en valeur à travers l'analyse de l'Erreur de Transmission. Dans les mécanismes impliquant une

transmission de puissance par engrenage, l'Erreur de Transmission est définie comme la différence entre la position réelle de la roue et la position qu'elle aurait occupée si l'engrenage avait été parfait : sans déformation, avec une cinématique parfaite de la développante de cercle. Elle peut être généralisée comme un déphasage angulaire entre les deux arbres liés par l'engrenage. De nombreux travaux ont été réalisés dans ce domaine, en particulier pour définir la qualité des engrenages en quasi-statique [FAU 89]. Parmi les techniques permettant d'accéder à l'Erreur de Transmission Dynamique, celles utilisant des tachymètres appliquent la mesure digitale de comptage simultanément aux deux codeurs pour reconstruire la loi d'évolution de la position des arbres qui portent les codeurs optiques [KON 87, MUN 92, RÉM 98].

À l'instar de l'Erreur de Transmission, l'analyse des variations de vitesse proposée dans ce mémoire n'utilise qu'un seul capteur. Cet avantage en terme de simplicité d'installation et d'acquisition est malheureusement associé à une plus grande fragilité vis à vis des perturbations extérieures. En ce sens, Bruyère a proposé d'adapter les techniques de moyennage angulaire synchrone à l'observation de vitesse instantanée pour retrouver les balourds d'une ligne d'arbre d'éolienne [BRU 07]. Plus récemment, Girardin et al ont mis à l'épreuve la détection d'un défaut d'outil sur une machine d'usinage par l'analyse de la vitesse de rotation instantanée. L'analyse du ralentissement induit par le contact entre chaque dent de fraise et la pièce usinée est apparue comme un indicateur original et pertinent pour identifier rapidement et simplement l'apparition d'un défaut mécanique [GIR 10].

Très sensible aux effets de masque, l'observation spatiale n'est cependant pas l'espace qui mettra le plus en valeur l'isomorphisme de Wold. La périodicité introduite par la rotation du mécanisme et conservée par l'échantillonnage angulaire est mieux révélée par l'observation spectrale.

2.2.2.2 Observation spectrale

L'échantillonnage angulaire d'un signal vibratoire ou représentatif de la vitesse instantanée conduit naturellement à la notion de fréquence angulaire. Ce concept est fortement relié au caractère discret des éléments généralement utilisés dans les transmissions de puissance (engrenages, courroies synchrones, chaînes, ...) [RÉM]. Néanmoins, pour éviter tout amalgame avec l'homonyme anglophone « angular frequency » qui caractérise la vitesse de rotation, la notion de « fréquence cyclique » sera employée dans ce mémoire. Comme précédemment évoqué, l'avantage fondamental de l'échantillonnage angulaire réside dans l'asservissement de la discrétisation sur la position angulaire de la ligne d'arbre. Par conséquent, l'estimation de la Densité Spectrale de Puissance (DSP) sur une séquence déterministe synchronisée sur le cycle machine restitue un spectre de raies, quelque soit la fluctuation de vitesse. Ceci n'est évidemment pas possible lorsque la même séquence est échantillonnée en temporel, la DSP souffrant alors d'un mélange des composantes de fréquence voisine (spectral leakage). En d'autres termes, la DSP conserve

sa résolution maximale avec l'échantillonnage angulaire et s'identifie avec le spectre de puissance de la série de Fourier. Pour son estimation, il est possible de calculer la transformée de Fourier discrète sur la durée d'un cycle machine. Dans la plupart des cas, le cycle machine regroupant l'ensemble des périodes portées par le mécanisme tournant est bien trop long pour être maîtrisé. On se contente alors d'une estimation biaisée de la DSP par la méthode classique du périodogramme qui, appliquée au signal x de longueur N , prend la forme :

$$\hat{\mathcal{D}}_{xx}(f_\theta) = \frac{\|\mathcal{F}_x(f_\theta)\|^2}{N} \quad (2.6)$$

On note $\hat{\mathcal{D}}_{xx}$ l'estimation de la DSP du signal x . Cette estimation offre l'opportunité de révéler les périodicités cachées dans le signal de vitesse instantanée et de localiser cinématiquement les phénomènes impliqués. Dans le cas particulier où le signal x est représentatif de la vitesse instantanée, il peut prendre plusieurs formes dont les qualités respectives sont discutées dans le paragraphe suivant.

2.2.3 Nature du signal vitesse instantanée

Bien que l'analyse fréquentielle soit motivée par l'observation des variations de vitesse cyclo-périodiques, la Transformée de Fourier ne s'applique pas forcément sur le signal vitesse $\omega(\theta)$ tel qu'il est défini Eq.2.4. Dans la littérature, Rémond effectue la transformée de Fourier sur le signal $\tau(\theta)$ dans [RÉM , REN 10] et ne justifie autrement ce choix que par l'étape qu'il permet de court-circuiter :

La TFD est réalisée directement sur les temps mesurés entre chaque front montant du signal du codeur, mesure brute issue du capteur [...], car ils sont représentatifs de la vitesse de rotation de l'arbre.

Cependant, pour les besoins d'une analyse plus fine où une corrélation est recherchée entre expérimentation, simulation et diagnostique, il peut paraître intéressant de mesurer l'observation fréquentielle des variations de vitesse instantanée en terme de vitesse de rotation plutôt qu'en nombre d'impulsions délivrées par l'horloge de comptage, comme c'était le cas jusqu'alors. Il est expliqué dans un premier paragraphe pourquoi il peut être pertinent d'appliquer la Transformée de Fourier sur le signal $\tau(\theta)$ plutôt que $\omega(\theta)$. Dans le second paragraphe, un moyen est proposé pour traduire le résultat de la transformée de Fourier en terme de vitesse de rotation.

2.2.3.1 Transformée de Fourier sur le signal brut

Dans notre application comme dans beaucoup d'autres, la Transformée de Fourier est utilisée pour obtenir l'amplitude des composantes harmoniques qui constituent un signal x . Pour y parvenir, l'algorithme discrétisé somme les termes de ce signal x pondérés par

une exponentielle complexe.

$$\mathcal{F}_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \cdot e^{-j2k\pi \frac{(n-1)}{N}} \quad (2.7)$$

Il s'agit maintenant de savoir si la Transformée de Fourier doit être appliquée sur la réalisation $\tau(\theta)$ ou sur son inverse $\omega(\theta)$. L'objectif de cette partie n'est pas de condamner une méthode par rapport à l'autre, mais plutôt d'apporter un éclairage sur ce choix et ses conséquences. Un premier axe distingue ces deux méthodes en s'appuyant sur le fait que la Transformée de Fourier est appliquée au signal vitesse échantillonné en angle.

Limite de l'échantillonnage angulaire.

Il est ici souligné que les propriétés statistiques de la vitesse instantanée ne peuvent être retrouvées à partir de la transformée de Fourier appliquée au signal vitesse $\omega(\theta)$. La notion d'estimée n'est pas utile dans ce paragraphe car le résultat ne dépend pas de la qualité de l'estimation. Le cas de la vitesse moyenne, résultat particulier de la Transformée de Fourier correspondant à la fréquence nulle, en est le parfait exemple. On démontre, en Annexe B.1.1, la propriété suivante :

la moyenne obtenue à partir du signal vitesse échantillonné angulairement correspond à la vitesse moyenne du signal si et seulement si la vitesse est constante sur l'intervalle de mesure.

Ainsi, la Transformée de Fourier appliquée directement à la vitesse instantanée échantillonnée en angle ne fournit pas la vitesse moyenne de l'échantillon. Le carré apparaissant dans l'équation B.5 traduit l'effet illustré Fig. 2.7 où la répartition des échantillons angulaires apparaît d'autant plus dense que la vitesse est élevée. En effet, l'estimation de la vitesse moyenne est faussée par la répartition non linéaire des points de mesure. L'amplitude des coefficients spectraux obtenus à partir du signal $\omega(\theta)$ ne peut donc pas être strictement assimilée à l'amplitude d'une variation de vitesse, sauf si le système mécanique suit un régime de fonctionnement stationnaire.

Cependant, si la Transformée de Fourier est directement appliquée au signal $\tau(\theta)$ qui sépare chaque impulsion provenant du capteur angulaire :

$$\mathcal{D}_{tr}(f_\theta) \triangleq \frac{\|\mathcal{F}_\tau(f_\theta)\|^2}{N} \quad (2.8)$$

il est alors possible de remonter à la vitesse moyenne du signal comme indiqué par l'équation 2.9 :

$$\bar{\omega} = \frac{2 \cdot \pi / R}{N \mathcal{F}_\tau(0)} \quad (2.9)$$

L'équation 2.7 rappelle que l'ensemble des coefficients spectraux résulte d'un moyennage des échantillons du signal vitesse. L'ensemble des coefficients spectraux obtenus par l'application de la TFD sur le signal de vitesse instantanée est donc concerné par ce résultat.

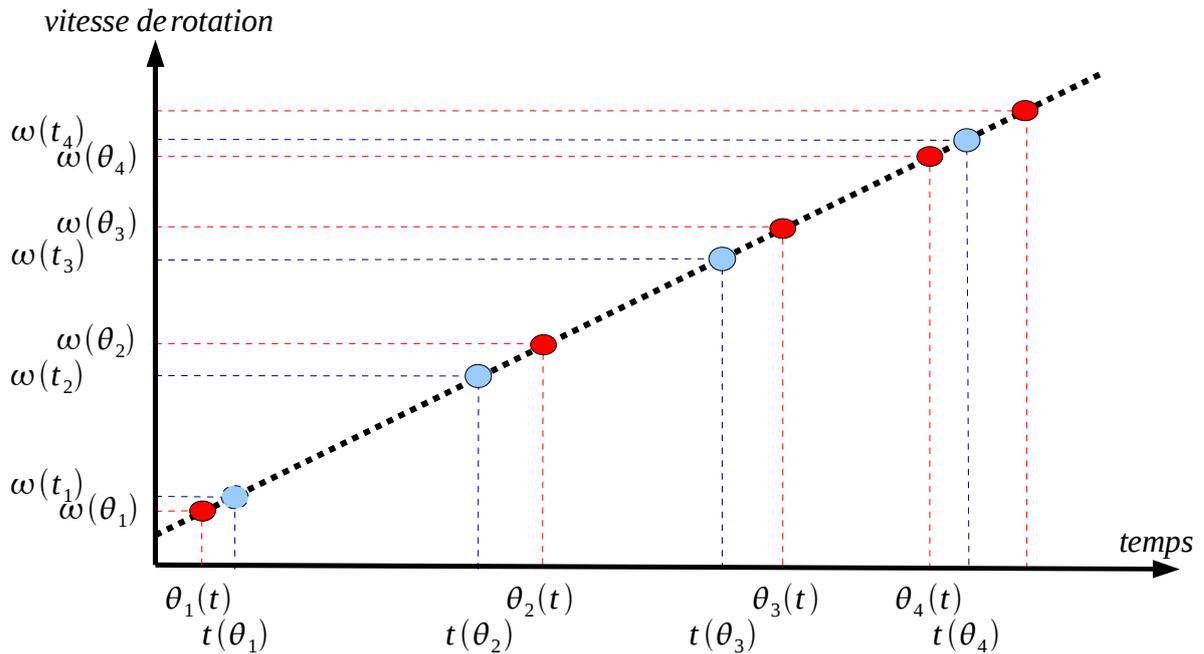


FIG. 2.7: Illustration de l'influence de l'échantillonnage sur l'estimation de la vitesse moyenne (bleu : échantillonnage temporel, rouge : échantillonnage angulaire)

Variation constante en temps ou en vitesse ?

Il est ici souligné l'importance de la connaissance du modèle phénoménologique recherché. Comment varie l'amplitude de la composante spectrale du phénomène cyclique qui caractérise l'état de santé du mécanisme quand la vitesse moyenne du mécanisme varie ? On peut distinguer 3 possibilités :

1. l'amplitude de la composante spectrale du phénomène cyclique est constante quand elle est exprimée en vitesse angulaire (tour par minute).
2. l'amplitude de la composante spectrale du phénomène cyclique est constante quand elle est exprimée en temps (nombre de top horloge).
3. l'amplitude varie, qu'elle soit exprimée en vitesse ou en temps.

Si la vitesse de rotation du mécanisme porte des phénomènes cycliques dont l'amplitude de variation est constante quand elle est exprimée en tour par minute, comme c'est le cas Fig.2.8, la TF donnera de meilleurs résultats si elle est appliquée sur le signal $\omega(\theta)$. Le même phénomène cyclique décrit selon $\tau(\theta)$ verra son amplitude diminuer quand la vitesse qui porte le phénomène cyclique considéré augmente.

Dans le cas contraire où l'amplitude de variation est constante quand le phénomène est exprimé en seconde, les courbes des figures 2.8-c) et 2.8-d) deviennent respectivement les courbes présentées sur les figures 2.8-a) et 2.8-b). En définitive, la variation d'amplitude, caractéristique des phénomènes non stationnaires, n'est pas l'apanage de la Transformée de Fourier : le phénomène cyclique se disperse sur plusieurs harmoniques res-

pectivement altérées de *spectral leakage*. Reste à savoir dans quelle catégorie se classent

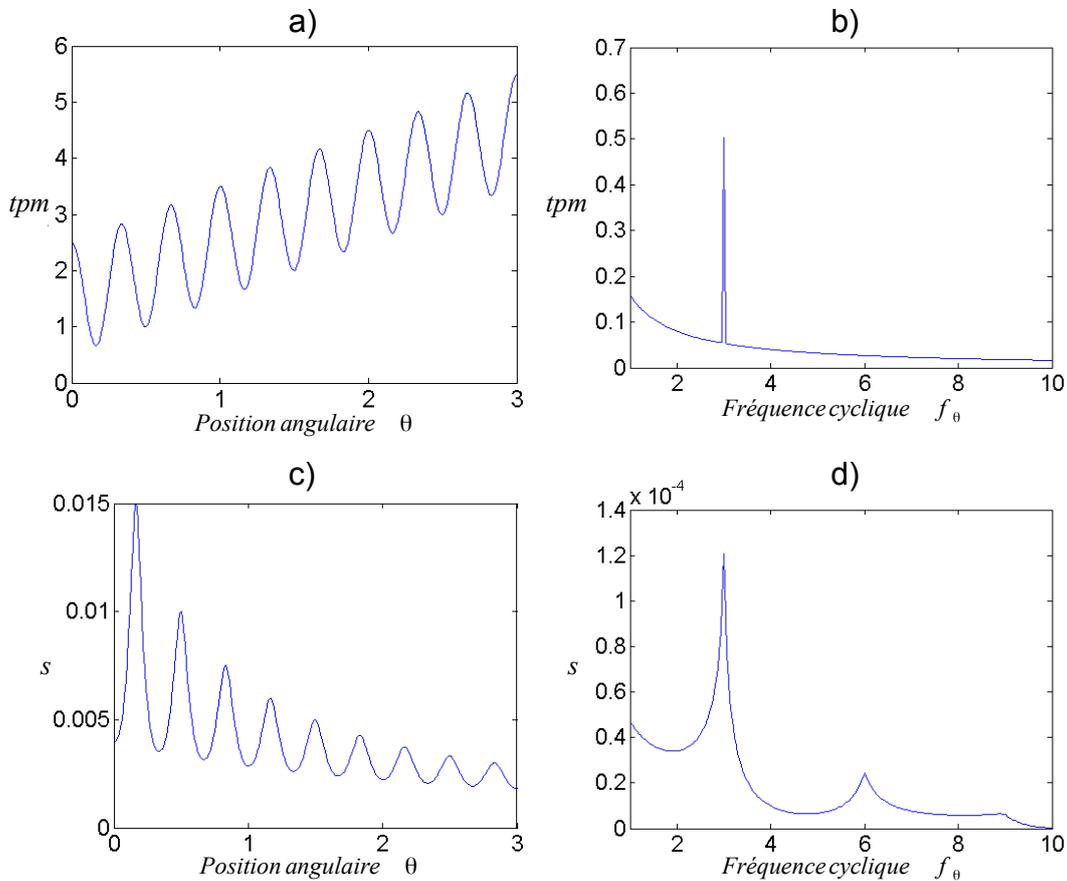


FIG. 2.8: Illustration de l'influence du choix d'unité dans le cas où $x(\theta, \xi)$ L'amplitude est constante quand elle est exprimée en vitesse angulaire. a) : observation spatiale en vitesse de rotation. b) : observation spectrale en vitesse de rotation. c) : observation spatiale en temps. d) : observation spectrale en temps.

les phénomènes cycliques qui caractérisent le mécanisme. Dans le chapitre suivant, l'influence de l'erreur de quantification apporte un premier indice en faveur de l'analyse du signal ET avant qu'il ne soit converti en vitesse de rotation par l'équation 2.4.

Par la suite, l'observation spectrale sera appliquée sur le signal **écart temporel** $\tau(\theta)$ car elle permet une estimation physique des paramètres statistiques et de rester cohérent avec le phénomène de quantification. L'observation spectrale est alors graduée en « $s^2 \cdot Hz^{-1}$ » pour la DSP, et en « s » pour le spectre d'amplitude.

2.2.3.2 Conversion entre les signaux « vitesse » et « écart temporel »

Intéressé par une observation spectrale mesurée en « $(tpm)^2 \cdot Hz^{-1}$ » plutôt qu'en « $s^2 \cdot Hz^{-1}$ », ou idéalement, un spectre d'amplitude dont l'ordonnée est directement graduée en « tour par minute », une conversion est développée à partir de l'observation

du signal ET proposé dans le paragraphe précédent. Pour généraliser l'observation en tenant compte des différents outils de fenêtrage proposés par la suite, on considère le cas général où le signal est pondéré par une fenêtre d'apodisation $(w_j)_{1 \leq j \leq N}$.

Sans considérer les défauts présentés dans le chapitre suivant, chaque coefficient de la TFD appliquée à un signal idéal de vitesse instantanée peut être manipulé selon l'équation triviale 2.10 pour faire apparaître la vitesse moyenne du signal.

$$\frac{|\mathcal{F}_{\omega_i(\theta)}(f_\theta)|}{\sum_{j=1}^N w_j} = \frac{1}{2} \left[\left(m_{\omega_i(\theta)}^{(1)} + \frac{|\mathcal{F}_{\omega_i(\theta)}(f_\theta)|}{\sum_{j=1}^N w_j} \right) - \left(m_{\omega_i(\theta)}^{(1)} - \frac{|\mathcal{F}_{\omega_i(\theta)}(f_\theta)|}{\sum_{j=1}^N w_j} \right) \right] \quad (2.10)$$

avec $\omega_i(\theta)$ une réalisation du processus stochastique de taille N dont $m_{\omega_i(\theta)}^{(1)}$ est la moyenne empirique. Chaque coefficient d'une série de Fourier correspond à une harmonique complexe dont l'amplitude et la fréquence correspondent respectivement à l'amplitude et au canal du coefficient en question. Ainsi, les deux termes mis en exergue dans l'Eq. 2.10 représentent les extrema de la sinusoïde de fréquence f_θ quand elle est portée par une vitesse de rotation $m_{\omega_i(\theta)}^{(1)}$. Les termes correspondant aux fréquences strictement positives peuvent alors être exprimés en fonction de la Transformée de Fourier de la réalisation $\tau_i(\theta)$

$$\frac{|\mathcal{F}_{\omega_i(\theta)}(f_\theta)|}{\sum_{j=1}^N w_j} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2\pi/R}{m_{\tau_i(\theta)}^{(1)} - \frac{|\mathcal{F}_{\tau_i(\theta)}(f_\theta)|}{\sum_{j=1}^N w_j}} \right) - \left(\frac{2\pi/R}{m_{\tau_i(\theta)}^{(1)} + \frac{|\mathcal{F}_{\tau_i(\theta)}(f_\theta)|}{\sum_{j=1}^N w_j}} \right) \right] \quad (2.11)$$

ce qui se simplifie sous la forme

$$\frac{|\mathcal{F}_{\omega_i(\theta)}(f_\theta)|}{\sum_{j=1}^N w_i} = \frac{2\pi}{R \cdot \sum_{j=1}^N w_i} \cdot \left[\frac{|\mathcal{F}_{\tau_i(\theta)}(f_\theta)|}{\left(m_{\tau_i(\theta)}^{(1)} \right)^2 - \frac{|\mathcal{F}_{\tau_i(\theta)}(f_\theta)|^2}{\left(\sum_{j=1}^N w_i \right)^2}} \right] \quad (2.12)$$

Ainsi, la densité spectrale idéale de la vitesse instantanée ω peut être estimée par le périodogramme $I_{\tau\tau}(f_\theta)$ basé sur la Transformée de Fourier du signal $\tau(\theta)$ tel que :

$$\mathcal{D}_{\omega\omega}(f_\theta) \triangleq \left(\frac{2\pi}{R} \right)^2 \cdot \frac{I_{\tau\tau}(f_\theta)}{\left[\left(m_{\tau_i(\theta)}^{(1)} \right)^2 - \frac{\left(\sum_{j=1}^N w_i^2 \right)}{\left(\sum_{j=1}^N w_i \right)^2} \cdot I_{\tau\tau}(f_\theta) \right]^2} \quad (2.13)$$

Ce procédé permet donc de graduer le spectre d'amplitude du signal ET en « tour par minutes » plutôt qu'en « seconde ». On a vu que l'estimation d'une variation de vitesse correspondant à une certaine fréquence cyclique dépend de la valeur moyenne de la vitesse de rotation, valeur moyenne qui n'est correctement estimée par une observation angulaire spectrale que si elle est appliquée sur le signal temps plutôt que vitesse (du moins, sous des conditions non stationnaires).

2.3 Détermination de la précision d'une mesure de vitesse instantanée par écart temporel

La mise en place de l'analyse des variations de vitesse angulaire instantanée est une entreprise intéressante et prometteuse, spécialement si un seul capteur angulaire s'avère suffisant pour surveiller une ligne d'arbre d'éolienne dans sa totalité. Fondamentalement, un tel avantage dépend de deux facteurs indépendants :

- l'amplitude de la variation de vitesse représentative d'un défaut,
- l'amplitude de la variation de vitesse détectable par le système de mesure.

L'amplitude de la variation de vitesse représentative d'un défaut est abordée dans l'annexe ?? lié à la modélisation angulaire. Il s'agit de connaître la variation de vitesse que subit un mécanisme quand il est soumis à une excitation caractéristique du défaut. Cette information est extrêmement délicate à prédire avec des modèles mécaniques. Dans le vaste domaine de la lubrification élasto-hydrodynamique, les modèles actuels ne sont pas en mesure de simuler le comportement dynamique du système si le roulement est perturbé par plus qu'une indentation de quelques μm de profondeur. L'amplitude caractéristique du défaut ne sera donc probablement connue avec précision qu'empiriquement. Et si le moyen de mesure de variation de vitesse est utilisée à cette fin, il convient d'abord de déterminer la fiabilité d'un tel système en terme de précision. En effet, la variation de vitesse détectable correspond à la précision de la mesure de vitesse angulaire instantanée. L'objectif de cette section est justement de comprendre ainsi que d'analyser cette précision, spécialement quand elle est observée dans le domaine spectral. Étonnement, ce sujet n'a pas été largement traité par la communauté scientifique. Gu et al. ont focalisé leur attention sur le bruit de mesure et la méthode de réduction de bruit concernant les méthodes temporelles - analogiques et ont résumé leur recommandations en insistant sur l'importance de la résolution du codeur ainsi que le taille de signal [GU 06] (voir partie 2.2.1.2). Ces conclusions ne peuvent être étendues aux méthodes angulaires basées sur des compteurs, telles que celles employées dans ce mémoire.

Comme la plupart des instruments métrologiques, le bruit résulte du cumul de perturbations intervenant à différents niveaux du processus de mesure. Premièrement, l'erreur géométrique qui déséquilibre les pas angulaires du capteur est inévitablement générée lors de sa fabrication. On peut aussi associer à cette perturbation géométrique l'influence d'une salissure fixée sur la mire du capteur ou de l'incertitude liée à l'installation du capteur sur le mécanisme. Les **perturbations géométriques** caractérisent l'ensemble des aléas menant à dévier la position réelle d'un segment angulaire de sa position théorique, et ce de manière stabilisée : cette perturbation n'évolue pas dans le temps.

Ensuite, c'est la conversion du mouvement mécanique en un signal électrique qui introduit une perturbation sur la mesure de vitesse angulaire instantanée. Cette conversion est constituée d'une succession d'opérateurs électroniques traitant le signal pour le mettre aux normes TTL depuis l'information magnétique, optique, potentiométrique, etc... Les

perturbations électriques sont l'association de plusieurs phénomènes stochastiques dont l'ampleur dépend autant de la qualité des éléments électriques que de la nature de l'environnement (température, humidité, champs magnétique).

Enfin, l'estimation du temps qui sépare deux fronts montant successifs est approximé au plus proche multiple de la période de l'horloge (cf Fig. 2.4), introduisant ainsi **l'erreur de quantification**.

Une étude globale de ces différentes perturbations menant à la caractérisation de la précision du système de mesure de vitesse angulaire instantanée est proposée dans cette section. Il est conseillé de se reporter tout d'abord à l'Annexe B.2 qui introduit les concepts, terminologies et autres théorèmes d'analyse statistiques utilisés tout au long de cette section, elle-même organisée en quatre parties. L'erreur de quantification est traitée dans une première partie car justifie l'intérêt de l'approche statistique. Les parties suivantes s'intéressent respectivement aux erreurs géométriques puis électriques. Enfin, une validation expérimentale permet d'appuyer les résultats innovants proposés dans cette section, et s'intéresse particulièrement à l'influence d'une mesure non stationnaire sur l'estimation de ces différents bruits.

2.3.1 Erreur de quantification

L'erreur de quantification correspond à l'erreur introduite lors de la mesure d'un instant à l'aide de l'horloge de comptage. Il est peu probable que les impulsions délivrées par le compteur soient parfaitement synchronisées avec les impulsions émises par le capteur angulaire. C'est dans le retard pris par le compteur pour constater le franchissement d'un niveau TTL par le capteur que réside l'erreur de quantification. Ainsi, la figure 2.4 présente les valeurs réelles que l'on ne peut mesurer sans erreur, tandis que la figure 2.9 présente les valeurs mesurées en ne tenant compte que du bruit de quantification. Dans une première approche du problème, la vitesse de rotation est considérée comme étant une fonction constante de l'angle. Bien que la probabilité d'observer de telles conditions dans la pratique soit proche de zéro, cette étape permet d'introduire avantageusement l'approche statistique, abordée dans la partie suivante pour permettre de manipuler ce bruit de nature originale. Bien sûr, les erreurs géométriques et électriques sont considérées comme inexistantes dans cette approche.

2.3.1.1 Vitesse angulaire constante

Deux conditions de fonctionnement sont ici distinguées pour caractériser le phénomène de quantification quand la vitesse de rotation est constante :

- un nombre entier d'impulsions de l'horloge-compteur sépare deux impulsions consécutives du capteur angulaire,
- un nombre rationnel et non entier d'impulsions de l'horloge-compteur sépare deux impulsions consécutives.

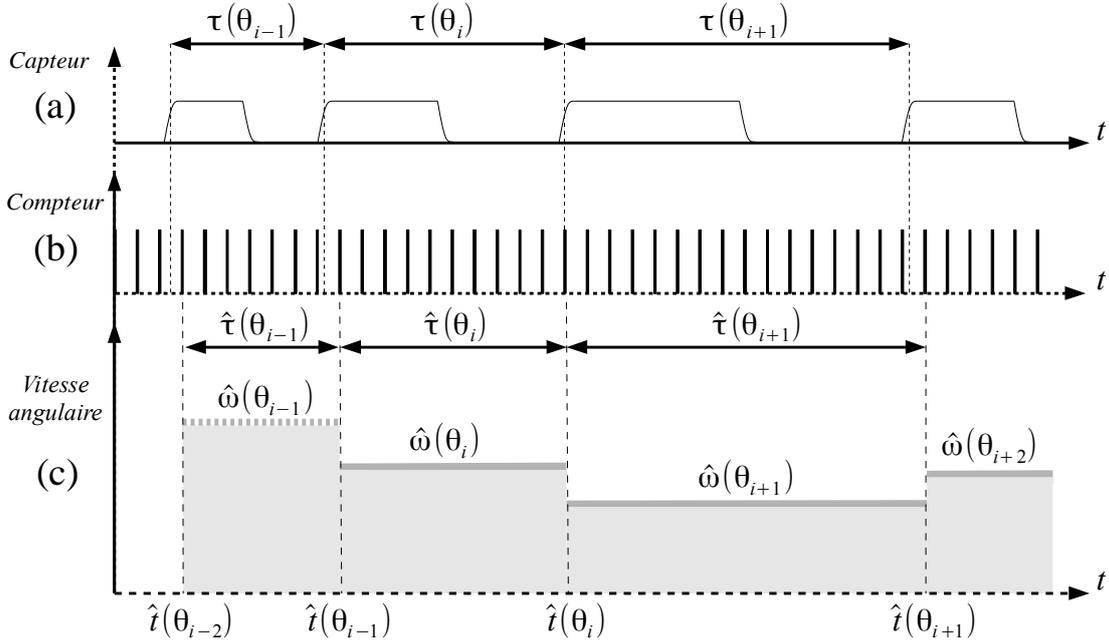


FIG. 2.9: Mesure de vitesse angulaire instantanée en utilisant la technique de comptage, avec erreur de quantification.

Le cas où le nombre d'impulsions n n'est ni naturel, ni rationnel n'est pas considéré dans cette partie, pour des raisons de simplicité. Cette dernière alternative n'apportant pas d'intérêt pour la compréhension du phénomène, et paraissant encore moins probable que les deux premières.

Nombre entier d'impulsions.

Si, par hypothèse, un nombre entier d'impulsions sépare deux impulsions consécutives du capteur angulaire, on peut alors définir $\tau(\theta_i)$ tel que

$$\exists p \in \mathbb{N} / \forall i \in [1, N], \tau(\theta_i) = p \cdot T_c \quad (2.14)$$

Ainsi, le « temps réel » séparant le $i^{\text{ème}}$ front montant du début de l'acquisition dépend du temps $t_0 = t(\theta_0)$ qui sépare le lancement du compteur et le premier front montant issu du capteur angulaire.

$$\exists p, t_0 \in \mathbb{N} \times [0; p \cdot T_c[/ \forall i \in [1, N], t(\theta_i) = i \cdot p T_c + t_0 \quad (2.15)$$

On fait intervenir le phénomène de quantification en utilisant l'opérateur $\langle x \rangle$ qui arrondit x à l'entier directement supérieur et en notant $\hat{t}(\theta_i)$ le « temps mesuré » séparant le $i^{\text{ème}}$ front montant du début de l'acquisition,

$$\hat{t}(\theta_i) = \left\langle \frac{i \cdot p \cdot T_c + t_0}{T_c} \right\rangle \cdot T_c = i \cdot p \cdot T_c + \left\langle \frac{t_0}{T_c} \right\rangle \cdot T_c \quad (2.16)$$

Comme illustré sur la Figure 2.9, le « temps mesuré » $\hat{\tau}(\theta_i)$ correspondant à chaque segment angulaire θ_i est obtenu par différence finie aux instants d'apparition de deux impulsions $\hat{t}(\theta_i)$ et $\hat{t}(\theta_{i-1})$. D'après les équations 2.15 et 2.16, on obtient finalement

$$\hat{\tau}(\theta_i) = p \cdot T_c = \tau(\theta_i) \quad (2.17)$$

où le temps mesuré apparaît identique au temps réel. L'égalité étant conservée par la TF, l'erreur de quantification apparaît sans influence sur l'observation spectrale d'un signal de vitesse constant sous réserve qu'un nombre entier d'impulsions sépare deux impulsions consécutives du capteur angulaire.

Nombre rationnel d'impulsions.

Si, par hypothèse, un nombre rationnel non entier sépare deux impulsions consécutives du capteur angulaire, on peut alors définir $\tau(\theta_i)$ tel que

$$\exists(p, q) \in \mathbb{N}^2 \ / \ \tau(\theta_i) = \frac{p}{q} \cdot T_c \quad (2.18)$$

où p et q sont premiers entre eux. On peut montrer dans ce cas que l'erreur de quantification est non nulle et cyclo-périodique (cf preuve ci dessous) de période q . Le phénomène de quantification porté par le signal vitesse est donc mis en avant sur une observation spectrale au travers, à minima, des harmoniques successives de la fréquence cyclique R/q événements par tour. La perturbation de l'observation spectrale par le phénomène de quantification ne se limite pas forcément à un seul groupe d'harmoniques. La preuve ci-dessous permet néanmoins d'indiquer que les perturbations induites peuvent être confondues avec un phénomène mécanique cyclique sur le spectre d'amplitude de la variation de vitesse.

Preuve. Reprenant les notations utilisées dans le paragraphe précédent, le « temps réel » séparant le franchissement du $i^{\text{ème}}$ seuil du début de la mesure est défini tel que

$$t(\theta_i) = \frac{i \cdot p}{q} \cdot T_c + t_0 \quad (2.19)$$

Comme précédemment, l'erreur de quantification est introduite avec le « temps mesuré » \hat{t}_i

$$\hat{t}(\theta_i) = \left\langle \frac{i \cdot p}{q} + \frac{t_0}{T_c} \right\rangle \cdot T_c \quad (2.20)$$

où $i \cdot p/q$ n'est à priori pas entier. Ainsi, le temps mesuré pris par le capteur pour franchir le segment θ_i est défini par :

$$\hat{\tau}(\theta_i) = \left(\left\langle \frac{i \cdot p}{q} + \frac{t_0}{T_c} \right\rangle - \left\langle \frac{(i-1) \cdot p}{q} + \frac{t_0}{T_c} \right\rangle \right) \cdot T_c \quad (2.21)$$

Bien sur, le temps mesuré ne pouvant être constitué que d'un nombre entier de période T_c , on a $\forall i \in [1; N], \hat{\tau}(\theta_i) \neq \tau(\theta_i)$. « Précisément », $\hat{\tau}(\theta_i)$ prend parmi les valeurs entières

avoisinant la valeur exacte $\tau(\theta_i)$.

Ensuite, on sait que $\forall k \in \mathbb{N}$, $\exists! (n, r) \in \mathbb{N} \times \llbracket 0 : q - 1 \rrbracket / k = n \cdot q + r$. D'après 2.20, il existe donc un et un seul couple $(n, r) \in \mathbb{N} \times \llbracket 0 : q - 1 \rrbracket$ t.q.

$$\begin{aligned}
 \hat{t}_k &= \left\langle \frac{(n \cdot q + r) \cdot p}{q} + \frac{t_0}{T_c} \right\rangle \cdot T_c \\
 \implies \hat{t}(\theta_k) &= nt(\theta_q) + \hat{t}(\theta_r) \\
 \implies \hat{\tau}(\theta_k) &= nt(\theta_q) + \hat{t}(\theta_r) - (nt(\theta_q) + \hat{t}(\theta_{r-1})) \\
 \implies \hat{\tau}(\theta_{k+n \cdot q}) &= \hat{\tau}(\theta_k), \quad k \in \mathbb{N}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

On démontre ainsi l'apparition d'une périodicité liée à la quantification.

Validation numérique.

Deux signaux sont simulés selon le paramétrage indiqué dans la table 2.1. Les deux signaux simulent une acquisition selon deux vitesses constantes d'amplitude très légèrement différentes. Le choix du couple numérateur-dénominateur est réalisé de manière à correspondre aux 2 cas précédemment évoqués pour une vitesse de rotation sensiblement identique. Les simulations sont tracées sur la figure 2.10. Dans le premier cas, le processus de quantification n'a effectivement aucune influence aussi l'estimation de la vitesse de rotation et l'observation spectrale ne présente rien d'autre que la valeur moyenne. Dans le second cas, la périodicité de signal simulé ressort comme un train d'impulsion. L'amplitude des impulsions correspond à la largeur de quantification T_c . La courbe correspondant à $t(\theta_i) - \hat{t}(\theta_{i-1})$ représente le temps qui sépare l'instant réel de passage du front montant de l'instant mesuré du front montant précédent. Apparaissant en dent de scie, cette courbe traduit la remise à zéro de l'erreur de quantification accumulée dès que la largeur de quantification est atteinte.

Paramètres	Signal 1	Signal 2
Fréquence de Compteur (F_c en Hz)	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$
Résolution du capteur (R en $Pts.rev^{-1}$)	100	100
Taille du signal (N)	1000	1000
Vitesse de rotation (ω en $rad.s^{-1}$)	80.6	80.65
Numérateur (p)	124	1613
Dénominateur (q)	1	13

TAB. 2.1: Paramètres utilisés pour les simulation numériques.

Le spectre d'amplitude de la seconde simulation est présenté sur la figure 2.11, où les composantes fréquentielles multiples de R/q sont clairement visibles.

Conclusion.

On a montré qu'en dehors du cas improbable où le capteur angulaire est parfaitement synchronisé avec l'horloge de comptage, le phénomène de quantification crée des artefacts

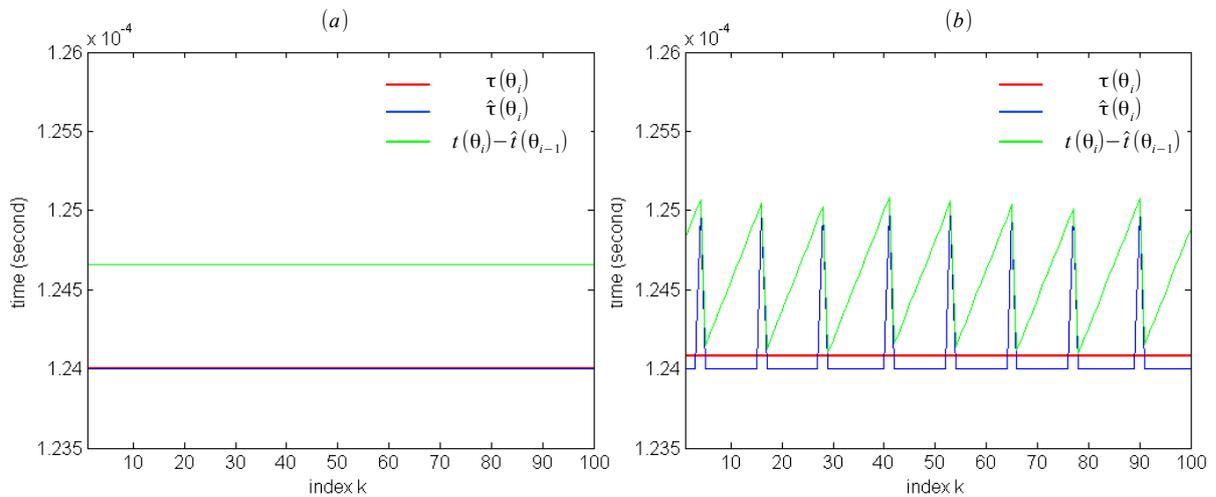


FIG. 2.10: Simulation de mesure (a) avec un nombre un entier d'impulsions, (b) avec un nombre rationnel d'impulsions.

périodiques en angle quand la vitesse de rotation est constante. En outre, il s'avère possible de localiser la fréquence cyclique de certains artefacts en utilisant le dénominateur du rapport entre la vitesse angulaire et la fréquence de comptage. Le dénominateur de ce rapport peut être déterminé tant que la fréquence de comptage ainsi que la vitesse angulaire sont constantes. La manière dont la moindre variation de vitesse va affecter ce rapport est imprévisible et invite à la modélisation à l'aide de processus stochastiques. Ainsi, on suspecte la tendance non stationnaire suivie par une vitesse de rotation d'introduire une composante aléatoire dans la localisation fréquentielle des artefacts induits par le processus de quantification. Cette modélisation est proposée dans la section suivante au moyens d'outils statistiques.

2.3.1.2 Vitesse angulaire variable

Une approche statistique est entreprise pour manipuler la perturbation aléatoire induite par le phénomène de quantification, en cas de comportement non stationnaire. De nouveau, il peut s'avérer utile de consulter l'annexe B.2 où sont définies les grandeurs et notations statistiques employées dans cette partie. Dans la pratique, on attend de cette approche qu'elle retourne l'estimation d'un seuil capable de distinguer les composantes spectrales induites par l'erreur de quantification des composantes spectrales correspondant à une information mécanique réelle. On appelle **seuil de quantification** cette frontière entre le signal et le bruit de quantification. Le premier paragraphe présente un moyen de manipuler le seuil de quantification sur l'observation spectrale du signal aléatoire \hat{t} (cf Fig. 2.9). L'estimation du seuil de quantification est ensuite recherchée pour le signal aléatoire $\hat{\tau}$ obtenu par différence finie de la séquence précédente. Les résultats théoriques sont enfin validés numériquement dans un dernier paragraphe.

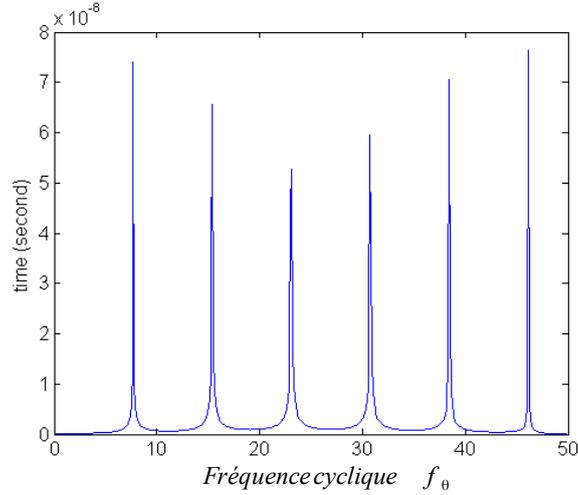


FIG. 2.11: Spectre d'amplitude de la simulation (nombre rationnel d'impulsion) avec $R/q = 7.7 \text{ ev.rev}^{-1}$.

Erreur de quantification en forme simple.

Le cas le plus simple d'une variable aléatoire unique, notée $\varepsilon(\theta_i, \xi)$, est considéré en premier lieu. Elle correspond à l'erreur de quantification induite lors de l'estimation de la variable aléatoire $t(\theta_i, \xi)$:

$$\varepsilon(\theta_i, \xi) = \varepsilon_i = t_i - \hat{t}_i = t_i - \left\langle \frac{t_i}{T_c} \right\rangle \cdot T_c \quad (2.23)$$

On émet l'hypothèse que la variable aléatoire ε_i suit une loi uniforme sur l'intervalle $[0 : T_c]$. Cette hypothèse est réaliste tant que l'intervalle de quantification est petit devant la dynamique du signal et si le signal ne favorise pas une vitesse de rotation plutôt qu'une autre. Cette condition relativement restrictive marque la différence significative avec les conditions exposées dans la section précédente. Si les résultats obtenus sont radicalement différents de ceux obtenus quand la vitesse de rotation est constante, le cas où la vitesse est presque constante ne pourra être traité qu'expérimentalement (voir partie 2.3.4.3).

À l'appui des hypothèses précédentes, on déduit que les propriétés statistiques du signal aléatoire ε ne dépendent pas de l'angle et qu'elle peuvent être déduites d'une réalisation unique si elle est suffisamment longue : ε est un signal stochastique qui présente les qualités d'ergodicité et de stationnarité. Ainsi, ce signal aléatoire est caractérisé dans le domaine spectral par sa DSP $\mathcal{D}_{\varepsilon\varepsilon}(f_\theta)$ à partir de laquelle nous estimerons le seuil de quantification² $\eta_{\varepsilon\varepsilon}(f_\theta)$, qui pourra directement être comparé à la DSP représentative des variations de vitesse du mécanisme $\mathcal{D}_{\tau\tau}(f_\theta)$. À partir du périodogramme d'une réalisation $\varepsilon_i(\theta)$, on estime la DSP du signal aléatoire par :

$$\mathcal{D}_{\varepsilon\varepsilon}(f_\theta) \triangleq \frac{1}{N} \left(\mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) \cdot \mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}^*(f_\theta) \right) \quad (2.24)$$

²le seuil de quantification est une notion exclusivement définie en annexe

Les coefficients spectraux complexes $\mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta)$ et leurs conjugués sont obtenus après sommation des éléments composant la réalisation $\varepsilon_i(\theta)$ respectivement pondérés par une exponentielle complexe. Soient $a_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta)$ et $b_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta)$ les processus aléatoires indépendants représentant respectivement la partie réelle et la partie imaginaire du processus $\mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta)$. L'estimation de la DSP devient alors :

$$\mathcal{D}_{\varepsilon\varepsilon}(f_\theta) \triangleq N \cdot (a_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta)^2 + b_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta)^2) \quad (2.25)$$

En invoquant le théorème central limite, on montre que $a_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta)$ et $b_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta)$ convergent en distribution vers la loi normale d'espérance nulle et de variance $\frac{m_{\varepsilon_i}^{(2)}}{2N}$, qui dans le cas d'une loi uniforme peut être simplifiée par $\sigma^2 = \frac{T_c^2}{24 \cdot N}$, d'après l'équation B.7. L'estimation de la DSP peut alors être exprimée sous forme réduite :

$$\mathcal{D}_{\varepsilon\varepsilon}(f_\theta) \triangleq \frac{\sigma^2}{2} \cdot \left(\left(a_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) \cdot \frac{\sqrt{2N}}{\sigma} \right)^2 + \left(b_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) \cdot \frac{\sqrt{2N}}{\sigma} \right)^2 \right) \quad (2.26)$$

Soit $X(f_\theta)$ la somme de deux variables carrées suivant respectivement une loi normale centrée réduite, définie telle que :

$$X(f_\theta) = \left(a_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) \cdot \frac{\sqrt{2N}}{\sigma} \right)^2 + \left(b_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) \cdot \frac{\sqrt{2N}}{\sigma} \right)^2 \quad (2.27)$$

D'après la loi du χ^2 , $X(f_\theta)$ présente les critères caractéristiques d'une distribution du χ^2 avec 2 degrés de liberté. À partir de la densité de probabilité de cette loi générique peut être déduit le seuil de quantification η_X de la variable aléatoire $X(f_\theta)$ sous la probabilité α :

$$\left. \begin{aligned} P(X < \eta_X) &= 1 - \alpha \\ P(X < \eta_X) &= \int_0^{\eta_X} f_{\chi^2(2)}(t) dt \end{aligned} \right\} \implies \eta_X = -2 \ln \alpha \quad (2.28)$$

Il est enfin possible de combiner les équations 2.26 et 2.28 pour déterminer le seuil de quantification $\eta_{\mathcal{D}_{\varepsilon\varepsilon}}$ défini pour tester l'hypothèse qu'une composante spectrale peut être induite par l'erreur de quantification sous la probabilité α :

$$\eta_{\mathcal{D}_{\varepsilon\varepsilon}} = - \left(\sigma \sqrt{2N} \right)^2 \cdot \ln(\alpha) \quad (2.29)$$

Dans la pratique, le périodogramme d'une réalisation $\varepsilon_i(\theta)$ convergeant vers $\mathcal{D}_{\varepsilon\varepsilon}(f_\theta)$ quand N tend vers l'infini aura une proportion de composantes fréquentielles dépassant le seuil $\eta_{\mathcal{D}_{\varepsilon\varepsilon}}$ qui tend vers α quand $N \rightarrow \infty$. L'influence de la quantification sur le processus aléatoire $\varepsilon_i(\theta)$ est équivalente à celle sur la mesure réelle $t_i(\theta)$. Le paragraphe suivant s'intéresse à l'effet de la quantification sur l'observation spectrale de la mesure $\tau_i(\theta)$.

Erreur de quantification en différence finie.

S'appuyant sur les résultats obtenus sur l'erreur de quantification quand elle perturbe une mesure simple, il est ici question d'étendre l'approche à la variable aléatoire $\Delta\varepsilon_i$, définie comme étant l'erreur effectuée sur la mesure du temps $\tau_i(\theta)$ qui sépare des impulsions consécutives du capteur angulaire. Les variables aléatoire t_i et t_{i-1} sont considérées comme étant indépendantes, hypothèse qui une fois de plus, nous place dans des conditions très différentes de celles présentées dans la partie où la vitesse est constante.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta\varepsilon_i = \tau_i - \hat{\tau}_i \\ \hat{\tau}_i = \hat{t}_i - \hat{t}_{i-1} \\ \tau_i = t_i - t_{i-1} \end{array} \right\} \implies \Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1} \quad (2.30)$$

On montre qu'il est possible d'établir une relation entre la DSP de la variable aléatoire $\Delta\varepsilon_i$ et celle de ε_i qui vérifie³ :

$$\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}(f_\theta) = 4 \cdot \mathcal{D}_{\varepsilon\varepsilon}(f_\theta) \cdot \sin\left(\frac{f_\theta\pi}{R}\right)^2 \quad (2.31)$$

À partir des équations 2.29 et 2.31, il est enfin possible de déterminer le seuil noté $\eta_{\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}}$

$$\eta_{\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}}(f_\theta) = -4 \ln \alpha \cdot (\sigma\sqrt{2N})^2 \cdot \sin\left(\frac{f_\theta\pi}{R}\right)^2 = -\ln \alpha \cdot \frac{T_c^2}{3} \cdot \sin\left(\frac{f_\theta\pi}{R}\right)^2 \quad (2.32)$$

On pose ensuite $\eta_{\mathcal{D}_{\tau\tau}}(f_\theta) = \eta_{\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}}(f_\theta)$. Il faut noter que ces deux seuils n'ont pas exactement la même signification :

- le seuil de quantification $\eta_{\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}}(f_\theta)$ permet, pour chaque fréquence cyclique, d'estimer l'amplitude qui sépare les composantes fréquentielles d'une réalisation estimant $\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}(f_\theta)$ en deux groupes complémentaires de taille respective α et $1 - \alpha$. Ce point sera validé numériquement dans la section suivante,
- le seuil de quantification $\eta_{\mathcal{D}_{\tau\tau}}(f_\theta)$ permet quant à lui de distinguer le bruit de quantification qui perturbe l'observation spectrale d'une réalisation $\tau_i(\theta)$ suffisamment longue des variations de vitesse réelle sous une probabilité α . En utilisant la formulation qui permet de convertir une observation spectrale en unité homogène à une vitesse de rotation (cf. equation 2.13), il est possible d'étendre l'estimation du seuil à la densité spectrale $\mathcal{D}_{\omega\omega}(f_\theta)$ en utilisant le résultat de l'équation 2.32 :

$$\eta_{\mathcal{D}_{\omega\omega}}(f_\theta) = \left(\frac{2\pi}{R}\right)^2 \cdot \frac{\eta_{\mathcal{D}_{\tau\tau}}(f_\theta)}{\left(\left(m_{\tau_i(\theta)}^{(1)}\right)^2 - \frac{1}{N}\eta_{\mathcal{D}_{\tau\tau}}(f_\theta)\right)^2} \quad (2.33)$$

³la preuve est disponible en fin de paragraphe

preuve

Le théorème de Wiener Khintchine indique que la DSP du signal aléatoire $\Delta\varepsilon$, stationnaire et ergodique, peut être estimée par la TF d'une réalisation $\Delta\varepsilon_i(\theta)$ telle que

$$\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}(f_\theta) \triangleq \mathcal{F}_{\Delta\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) \cdot \mathcal{F}_{\Delta\varepsilon_i(\theta)}^*(f_\theta) \quad (2.34)$$

La transformée de Fourier étant linéaire, l'expression précédente peut être développée en utilisant l'équation 2.30 :

$$\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}(f_\theta) \triangleq (\mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) - \mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta-1)}(f_\theta)) \cdot (\mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) - \mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta-1)}(f_\theta))^* \quad (2.35)$$

La propriété de translation de la transformée de Fourier permet de simplifier l'estimation :

$$\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}(f_\theta) \triangleq \left(\mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) - \mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) \cdot e^{-\frac{2i\pi f_\theta}{R}} \right) \cdot \left(\mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) - \mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) \cdot e^{-\frac{2i\pi f_\theta}{R}} \right)^* \quad (2.36)$$

Sachant que $\mathcal{F}_X^*(f_\theta) = (\mathcal{F}_X(f_\theta))^*$, après distribution, l'estimation précédente devient :

$$\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}(f_\theta) \triangleq (\mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) \cdot \mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta)^*) \cdot \left(2 - e^{-\frac{2i f_\theta \pi}{R}} - e^{\frac{2i f_\theta \pi}{R}} \right) \quad (2.37)$$

Avec $\sin(x)^2 = \left(\frac{e^{ix} - e^{-ix}}{-2i} \right)^2$, on obtient :

$$\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}(f_\theta) \triangleq (\mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta) \cdot \mathcal{F}_{\varepsilon_i(\theta)}(f_\theta)^*) \cdot \left(2 \sin \frac{f_\theta \pi}{R} \right)^2 \quad (2.38)$$

Utilisant de nouveau le théorème de Wiener Khintchine, on a bien :

$$\mathcal{D}_{\Delta\varepsilon\Delta\varepsilon}(f_\theta) \triangleq \mathcal{D}_{\varepsilon\varepsilon}(f_\theta) \cdot \left(2 \sin \frac{f_\theta \pi}{R} \right)^2 \quad (2.39)$$

Validation numérique.

Ce paragraphe est d'abord l'occasion de valider numériquement l'approche statistique proposée dans cette partie. La simulation est effectivement capable de valider les modèles faisant intervenir des variables statistiques dont les caractéristiques peuvent s'avérer trop sensibles à l'environnement extérieur pour qu'il soit possible de travailler avec un grand nombre de processus aux caractéristiques similaires.

Pour valider les résultats obtenus sur la quantification simple puis la quantification en différence finie, une série de réalisations du signal aléatoire est générée sous *Matlab*. Chaque réalisation contient 10^5 tirages d'une variable aléatoire qui suit une loi uniforme sur $[0, T_c]$. Chaque réalisation sera successivement observée directement dans le domaine spectral, en tant qu'erreur de quantification simple, puis convolué par différence finie pour simuler l'erreur de quantification réalisée sur $\Delta\varepsilon$. Un exemple de densité spectrale obtenue à partir de chaque type d'observation est présenté sur la figure 2.12. Les taux de probabilité de différents seuils de quantification sont explicités sur la partie gauche de la Table 2.2. Les résultats numériques sont présentés sur la partie droite de la même table sous

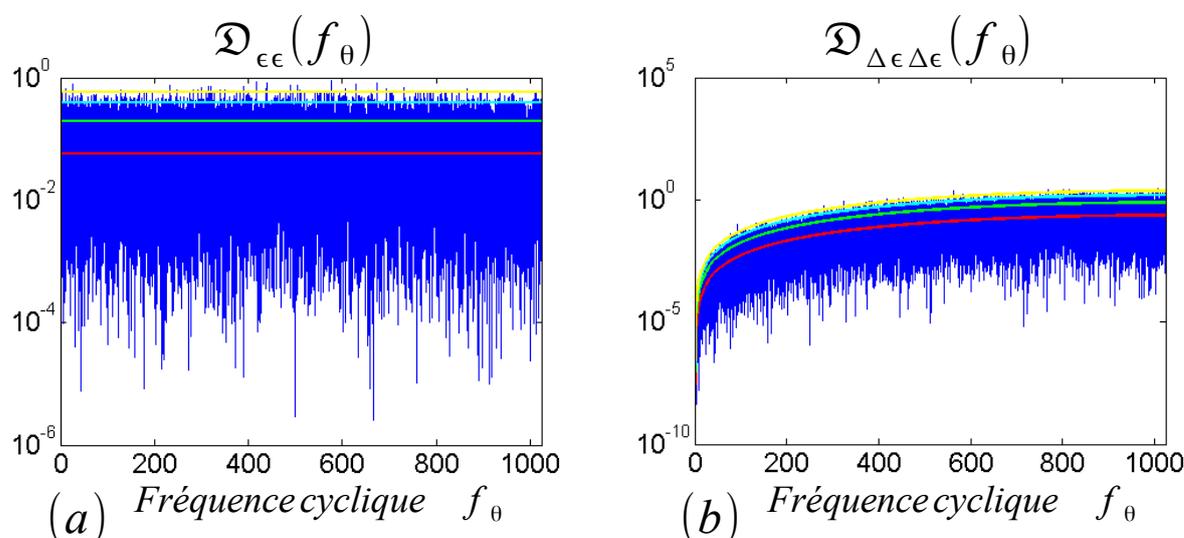


FIG. 2.12: DSP de l'erreur de quantification (a) en forme simple et (b) en différence finie.

Seuil de quantification		Résultats numériques (en %)			
Couleur (Fig. 2.12)	α en %	Erreur de quantification en forme simple		Erreur de quantification en différence finie	
		Moyenne Empirique	Variance Empirique	Moyenne Empirique	Variance Empirique
Rouge	50	49.97	$3.43 \cdot 10^{-2}$	50.08	$3.7 \cdot 10^{-2}$
Vert	10	10.00	$1.43 \cdot 10^{-2}$	10.09	$1.6 \cdot 10^{-2}$
Cyan	1	1.00	$1.13 \cdot 10^{-2}$	1.06	$3.6 \cdot 10^{-3}$
Jaune	0.1	0.10	$1.75 \cdot 10^{-3}$	0.15	$1.6 \cdot 10^{-3}$

TAB. 2.2: Paramètres utilisés pour les simulations numériques.

forme de moyennes et variances empiriques de la proportion des composantes spectrales dont l'amplitude dépasse chaque seuil de quantification. Par exemple, une moyenne de 10.09% des composantes spectrales obtenues sur les 100 réalisations du processus voient leur amplitude dépasser le seuil de quantification défini avec $\alpha = 10\%$, seuil tracé en vert sur la figure 2.12. Bien que les résultats obtenus soient assez encourageants pour valider l'approche statistique, les variances empiriques prouvent que l'estimation du seuil de quantification est légèrement sous-estimée. Cette imprécision est induite par des effets de bord perturbant la transformée de Fourier qu'il s'avèrera possible de corriger en fenêtrant chaque réalisation (voir partie 3.3).

Application numérique.

L'équation analytique du seuil de quantification est utilisée pour qualifier l'influence

de certains paramètres sur l'amplitude des coefficients spectraux, offrant ainsi la possibilité de dimensionner un système d'acquisition vis à vis du bruit de quantification. En effet, sous réserve que les résultats soient validés expérimentalement (voir §2.3.4.1), ces résultats peuvent être utilisés, de manière innovante, pour dimensionner un système de surveillance vis à vis des limites qu'impose le bruit de quantification sur les phénomènes cycliques attendus sur un système particulier. En effet, le seuil de quantification apparaît comme ne dépendant que de quatre paramètres que l'on propose de classer selon deux groupes :

- la fréquence angulaire d'un phénomène cyclique et la vitesse de rotation moyenne pendant une mesure $m_{\tau_i}^{(1)}$. Ce sont des paramètres que l'on qualifie d'expérimentaux, car directement imposés par l'application,
- la résolution du capteur angulaire R et la fréquence du compteur T_c . Ce sont des paramètres de conception car ils peuvent être choisis de manière à atteindre un niveau de bruit acceptable.

La figure 2.13 présente l'évolution du bruit de quantification en fonction des paramètres de chaque groupe quand les 2 autres paramètres sont maintenus fixes. Simple application numérique de l'équation 2.33, il conviendra de réactualiser ces tracés pour une application précise en fonction des paramètres imposés, ou choisis. La figure de gauche montre par exemple que la fréquence de compteur est comme un levier influent vis à vis du niveau de bruit de quantification. La figure de droite, quant à elle, repère les composantes fréquentielles détectables pour un système d'acquisition dont les paramètres de conception sont figés.

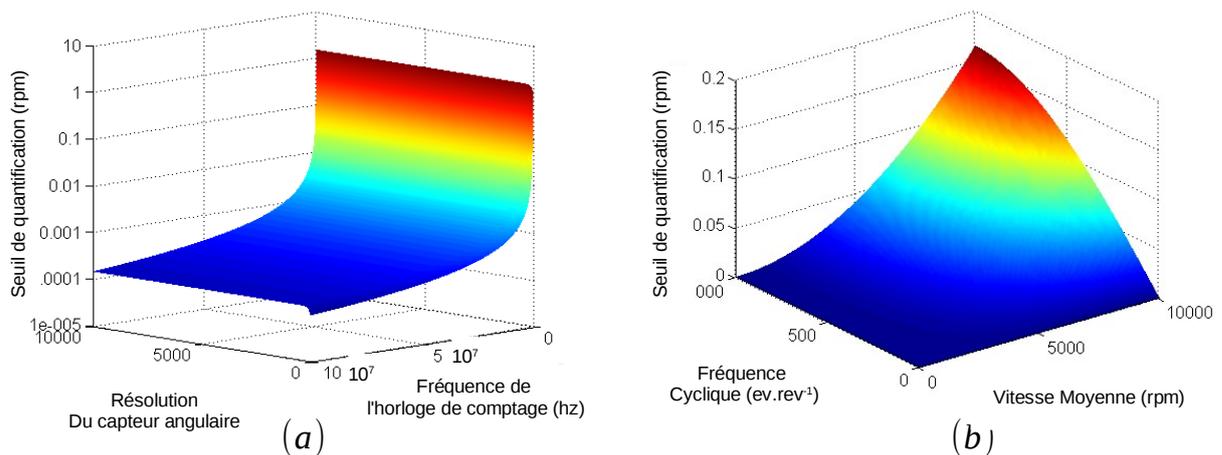


FIG. 2.13: Evolution du bruit de quantification η_{ω} (a) en fonction des paramètres de conception et (b) expérimentaux.

2.3.2 Erreur géométrique

2.3.2.1 Généralités

Dans le domaine de la mesure des vibrations de torsion, Vance suggéra de contrer le problème engendré par les erreurs de gravure en pré-enregistrant le bruit de mesure quand le capteur tourne à vitesse constante et en le soustrayant par soustraction ultérieure [WAN 92]. Il fut ensuite proposé d'analyser la composante stationnaire pour identifier la signature causée par la répartition non uniforme de segments constitutifs de la mire William [WIL 96]. Différentes procédures permettant d'effectuer l'identification ainsi que la correction furent présentées depuis. Très récemment, Kaul et Al. ont porté leur attention sur l'erreur globale des capteurs angulaires de type résolveur [KAU 08] et leurs conclusions sont représentatives des limites qui freinent l'approche de William. Après avoir calibré un profil de l'erreur géométrique à l'aide d'une table de rotation haute précision, une analyse harmonique de la mesure montre le caractère très majoritairement cyclo-périodique de cette erreur. Les résolveurs étant réputés pour leur faible précision, les perturbations géométriques sont logiquement prépondérantes devant les autres types d'erreur. Ainsi, la méthode basée sur l'observation harmonique de dé-bruitage proposée dans l'article de William ne peut être mise en place sur un capteur que si les deux conditions suivantes sont réunies :

- le signal doit être traité avant qu'il ne soit conditionné sous forme TTL,
- le capteur doit être calibré sur une table de rotation de grande précision.

Si le premier point découragera les industriels friands de solutions simples et peu coûteuses, c'est le second point qui s'avère le plus restrictif. Ainsi, Resor propose une méthode de caractérisation in-situ du codeur en utilisant le moyennage synchrone, offrant ainsi la possibilité de traiter l'erreur géométrique du capteur sur une mesure en fonctionnement normale [RES 05]. Si la signature géométrique du capteur angulaire est corrigée, il en va de même pour tout phénomène cyclique dont la fréquence angulaire est multiple de la rotation de l'arbre considéré. Plutôt qu'une bonne nouvelle, cette dernière méthode affaiblit l'espoir de surveiller un jour les phénomènes cycliques tels que le balourd ou les engrenements liés à l'arbre porteur du capteur sans être gêné par sa signature. Pourtant, une méthode similaire est proposée dans un brevet déposé en 2010 pour surveiller les harmoniques de rotation après avoir retiré la signature du codeur [DES 10]. Bien que non vérifiable, par manque de communication scientifique la défendant, cette avancée est d'autant plus étonnante qu'elle est développée dans le cas particulier autrement plus complexe des mesures en régime non stationnaire.

2.3.2.2 Caractérisation statistique

Fort de cette analyse, l'objectif de cette partie n'est pas de corriger le défaut géométrique mais de comprendre son influence sur l'observation spectrale de la vitesse de rotation. La caractérisation recherchée par la communauté scientifique n'a pour l'instant pas permis de déterminer la qualité géométrique que doit satisfaire un capteur

pour pouvoir être utilisé dans un cas particulier.

Différentes déclinaisons de l'erreur géométrique peuvent être regroupées selon deux catégories illustrées sur la figure 2.15.

1. les erreurs de position sur un tour (qualité et propreté de la mire, défaut de concentricité, désalignement)
2. les erreurs de position sur une période (induites lors des étapes intervenant dans le processus d'interpolation)

Les erreurs de position sur un tour

Ces erreurs sont, par définition, cyclo-périodiques de période la révolution du capteur. À titre d'exemple, Heidenhain estime cette erreur à $\pm 3\%$ de la période du signal pour leur capteur optique [HEI 05]. En ce qui concerne les capteurs rotatifs sans contact (cf §. 2.2.1.1) le montage ainsi que le réglage de la tête de lecture ont, en marge de la précision intrinsèque de la mire, un incidence significative sur la précision totale visée. Le montage excentrique de la gravure associé aux défauts de circularité de l'arbre à mesurer ont un rôle prépondérant. L'excentricité e , le diamètre médian de la gravure D et l'erreur de mesure $\Delta\phi$ présentés Figure 2.14 sont liés par l'approximation suivante :

$$\Delta\phi = \pm \cdot \frac{e}{\pi D} \text{ revolutions} \quad (2.40)$$

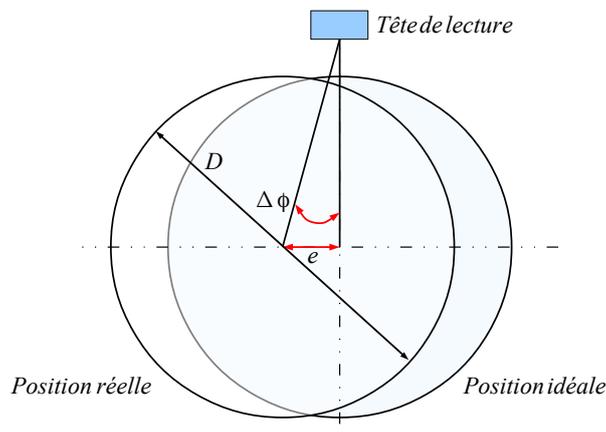


FIG. 2.14: Ecart de position induit par un défaut d'excentricité.

L'erreur de mesure $\Delta\phi$ introduit une erreur sur l'estimation du temps qui sépare deux fronts montants et se répétera exactement une fois par tour. C'est entre autre la non-circularité de l'arbre qui permet à l'excentricité de varier avec la position angulaire θ , et de rendre l'erreur géométrique stochastique sur un tour.

Les erreurs de position sur une période

Ce sont des erreurs cyclo-périodiques qui interviennent sur les capteurs dont la résolution du signal TTL est obtenue après interpolation. L'interpolation arc-tangente, par exemple, compare l'amplitude de deux signaux sinusoïdaux représentatifs de l'angle et déphasés de 90° . Le rapport des valeurs simultanées de chaque sinusoïde est numérisée selon des seuils approxinant la forme théorique de la fonction tangente. Cette approximation, assurée par des comparateurs analogiques, introduit une erreur identique pour chaque nouvelle période du signal d'origine. À titre d'exemple, Heidenhain estime cette erreur à $\pm 1\%$ de la période du signal pour leurs capteurs optiques à roulement [HEI 05].

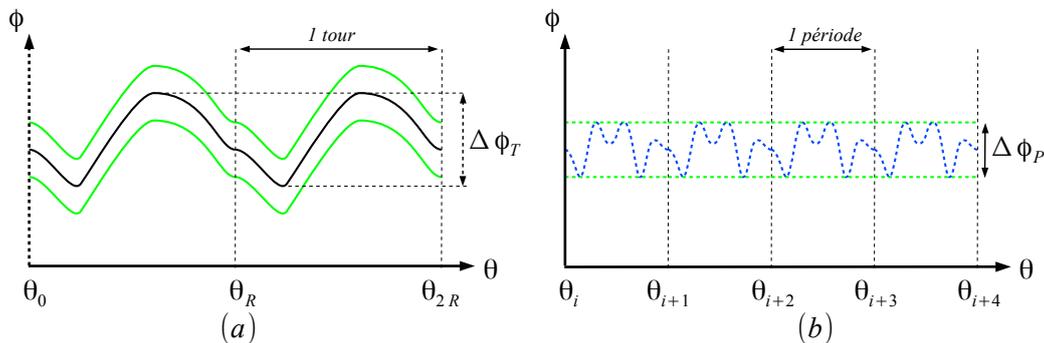


FIG. 2.15: Écart de position sur (a) un tour et (b) sur une période.

Cyclo-périodicité de l'erreur géométrique, sous conditions stationnaires

La caractéristique intrinsèque de ce type d'erreur est à la fois son avantage et son défaut. Tout d'abord, sous réserve de conditions stationnaires, l'erreur géométrique est strictement périodique en angle : le signal aléatoire $(\varepsilon_g(k, \xi))$ lui correspondant est alors parfaitement caractérisé par un cycle unique. L'erreur géométrique du capteur étant parfaitement caractérisée sur un cycle, la densité spectrale de puissance estimée sur une mesure ne contenant que cette erreur converge indubitablement vers le périodogramme calculé sur un unique cycle. La densité spectrale de puissance répartit alors les composantes fréquentielles des variations de vitesse associées au défaut de ce capteur sur les harmoniques successives de la fréquence de ce cycle, le cycle étant soit un tour, soit une période, en fonction de la nature de l'erreur géométrique. Trop rarement souligné par la communauté scientifique, l'observation fréquentielle des phénomènes cycliques non multiples entier de la rotation de l'arbre porteur du capteur ne sont donc pas perturbés par la signature du capteur, et ce quelque soit sa "qualité". Le revers de la médaille est supporté par les composantes fréquentielles multiple entier de l'arbre porteur sur lesquelles sont concentrées les artefacts induits par les défauts cycliques du capteur. Aujourd'hui, seuls les capteurs de bonne facture peuvent être utilisés pour surveiller l'évolution d'un désalignement de l'arbre sur lequel ils sont installés.

Les résultats obtenus lors de l'étude sur le bruit de quantification permettent d'estimer

l'amplitude de ces composantes spectrales. Si l'on considère que l'erreur de positionnement ε_ϕ suit une loi normale centrée et d'écart type σ_ϕ sur un cycle de longueur N_c , on peut estimer les propriétés statistiques suivies par les coefficients de Fourier d'une réalisation sur un cycle. En effet, le théorème centrale limite indique que les parties réelle et imaginaire de la Transformée de Fourier suivent une loi normale centrée de variance $\sigma^2 = \frac{m_{\varepsilon_\phi}^{(2)}}{2 \cdot N_c} = \frac{\sigma_\phi^2}{2 \cdot N_c}$. Alors, le seuil de quantification défini par l'équation 2.29 peut être utilisé pour estimer le niveau spectral de l'erreur géométrique sur un cycle N_c du périodogramme d'une mesure de longueur N (en supposant $N \gg N_c$).

$$\kappa_{\mathcal{D}_{\varepsilon_\phi \varepsilon_\phi}(f_\theta)} = -\ln \alpha \cdot \left(\sigma \sqrt{2N} \right)^2 = -\ln \alpha \cdot \sigma_\phi^2 \cdot \frac{N}{N_c} \quad (2.41)$$

Notons que σ_ϕ est ici homogène à un temps et non à un angle, ce qui n'est envisageable que dans le cas des conditions stationnaires. De plus, il est intéressant de noter que l'erreur étant appliquée sur les segments angulaires plutôt que sur les fronts montants séparément, son influence sur l'observation spectrale n'est plus pondérée par une sinusoïde.

Validation numérique

Pour valider les résultats obtenus sur l'estimation de l'influence de l'erreur géométrique sur l'observation spectrale de la vitesse angulaire instantanée, une série de réalisations du signal aléatoire est générée sous *Matlab*. Chaque réalisation $(\varepsilon_g(k, \xi_i))_{k=\llbracket 1, p \cdot N_c \rrbracket}$ est formée à partir d'un tirage $(\varepsilon_g(k, \xi_i))_{k=\llbracket 1, N_c \rrbracket}$ de $N_c = 2048$ valeurs prises par une variable aléatoire qui suit une loi normale $\mathcal{N}(0, \sigma_\phi^2)$. L'écart type σ_ϕ , homogène à un temps, prend différentes valeurs explicitées dans la table 2.3 comme fonction de l'écart type de l'erreur de quantification σ_q dont l'influence est prise en compte dans le modèle. Le soin est pris de centrer chaque tirage en fonction de sa moyenne empirique pour simuler un capteur dont la somme des angles de chaque segment soit bien égale à $2\pi \text{ rad}$. Ensuite, les tirages sont dupliqués puis assemblés de manière à simuler une erreur géométrique de taille $p \cdot N_c$ et de période N_c .

Chaque trajectoire $\Delta\varepsilon_g$, convoluée par différence finie pour simuler la méthodologie de mesure, est observée dans le domaine spectral. Un exemple de densité spectrale obtenue à partir de la simulation $\sigma_\phi = 0.1\sigma_q$ est présenté sur les figures 2.16, dont la seconde courbe met bien en valeur la focalisation de l'erreur sur les multiples de la fréquence cyclique associée à l'erreur géométrique. Comme précédemment, les taux de probabilité menant à l'estimation de différents seuils sont explicités sur la partie gauche de la table 2.3, le code couleur est inchangé. Les résultats numériques sont présentés sur la partie droite de la même table sous forme de moyennes et variances empiriques de la proportion des composantes spectrales dont l'amplitude dépasse chaque seuil (la taille du cycle N_c est désormais le dénominateur du rapport). À écart type équivalent, l'erreur géométrique reste prépondérante devant l'erreur de quantification, résultat prévisible étant donné que la perturbation géométrique est concentrée sur un nombre de coefficients spectraux plus faible.

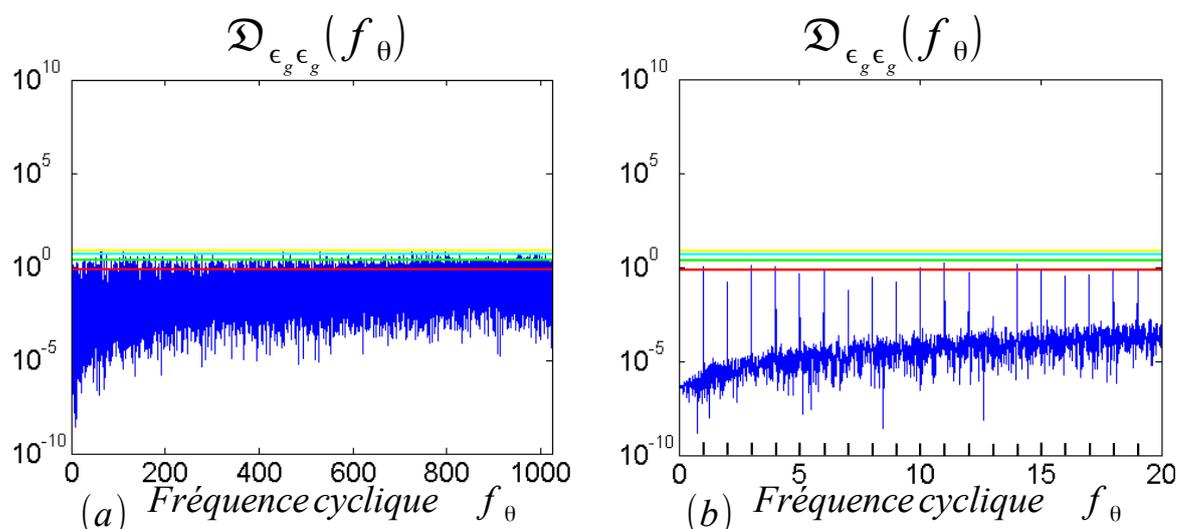


FIG. 2.16: DSP de l'erreur géométrique (a) sur $[0R]$ et (b) sur $[0, 20]$. $\sigma_\phi = 17 \cdot \sigma_q$

Seuil	Résultats numériques (en %)				
	$\sigma_\phi = 10 \cdot \sigma_q$		$\sigma_\phi = 1 \cdot \sigma_q$	$\sigma_\phi = 0.1 \cdot \sigma_q$	$\sigma_\phi = 0.01 \cdot \sigma_q$
α en %	Moyenne Empirique	Variance Empirique	Moyenne Empirique	Moyenne Empirique	Moyenne Empirique
50	49.94	3.3	49.94	70.77	462
10	9.93	0.92	9.95	10.24	361
1	0.98	0.10	0.99	1.05	297
0.1	0.092	$7.8 \cdot 10^{-3}$	0.09	0.13	257

TAB. 2.3: Paramètres utilisés pour les simulations numériques sur l'observation en temps.

Influence de l'erreur géométrique sur la variation macroscopique de vitesse.

Par analogie à l'étude de l'erreur de quantification, dont l'influence n'est maîtrisée que si la transformée de Fourier est effectuée sur l'écart temporel $\tau(\theta)$, une réflexion est menée sur le domaine d'observation à utiliser préférentiellement pour isoler/maitriser l'erreur géométrique. Sous des conditions de vitesse stationnaires, il est montré dans la partie 2.2.3.1 qu'appliquer la Transformée de Fourier sur le signal Écart Temporel $\tau(\theta)$ ou sur le signal vitesse $\omega(\theta)$ est équivalent. L'intérêt est donc porté aux situations où l'erreur géométrique est portée par une vitesse macroscopique non stationnaire.

Soit i et j deux segments d'un capteur angulaire de résolution R tournant à la vitesse

constante Ω , et respectivement d'angle θ_i et θ_j définis tels que :

$$\theta_i = \frac{1}{R} + \phi_i \quad \theta_j = \frac{1}{R} + \phi_j \quad (2.42)$$

où ϕ_i et ϕ_j représentent les erreurs géométriques respectives de segments i et j . On peut les assimiler à deux réalisations d'une loi normale centrée d'écart type $\hat{\sigma}_\phi$ qui sont homogènes à un angle⁴.

En posant $\omega(\theta_i) = \frac{1}{R \cdot \tau(\theta_i)}$, l'estimation de la vitesse instantanée obtenue à partir de l'écart temporel théorique $\tau(\theta_i)$ défini tq. $\tau(\theta_i) = \frac{\theta_i}{\Omega}$, les variations de vitesse respectivement observées en temps ou en vitesse par comparaison de ces deux segments prennent la forme :

$$\left\{ \Delta_{\theta_i}^{\theta_i}(\tau) \right\}_\Omega = \tau(\theta_j) - \tau(\theta_i) = \frac{\phi_j - \phi_i}{\Omega} \quad (2.43)$$

$$\left\{ \Delta_{\theta_i}^{\theta_i}(\omega) \right\}_\Omega = \omega(\theta_j) - \omega(\theta_i) = \frac{(\phi_i - \phi_j)\Omega}{\left(\frac{1}{R} + \phi_i\right) \cdot \left(\frac{1}{R} + \phi_j\right)} \quad (2.44)$$

L'équation 2.43 montre que la variation d'écart temporel induite par l'erreur géométrique diminue si la vitesse augmente. Inversement, l'équation 2.44 montre que la variation de vitesse instantanée de rotation (exprimée en tour par minute) induite par l'erreur géométrique augmente avec la vitesse de rotation macroscopique.

Les variations macroscopiques de vitesse ont donc une influence sur l'amplitude de la variation de vitesse angulaire induite par l'erreur géométrique, que la vitesse soit exprimée à travers l'écart temporel ou directement en tour par minute. Que ce soit en *temps* ou en *vitesse*, l'évolution de la vitesse de rotation macroscopique fera donc apparaître une fuite spectrale sur les composantes cycliques concernées par l'erreur géométrique, car elle introduit un phénomène aperiodique dans la transformée de Fourier.

Dans le cas où la transformée de Fourier est appliquée sur le signal ET (voir §2.2.3.1), c'est donc la valeur minimale que prend la vitesse de rotation pendant la mesure qui majore alors le bruit géométrique, dont l'estimation prend la forme :

$$\kappa_{\mathcal{D}_{\Delta\epsilon\Delta\epsilon}}(f_\theta) = -4 \cdot \ln \alpha \cdot \frac{\hat{\sigma}_\phi^2}{\min(\omega)^2} \cdot \frac{N}{N_c} \cdot \sin\left(\frac{f_\theta \pi}{R}\right)^2 \quad (2.45)$$

2.3.2.3 Composante déterministe

Dans le paragraphe présentant l'erreur de position sur un tour, la non circularité apparaît comme l'élément indispensable à la défense de l'aspect aléatoire que prend le défaut géométrique. Néanmoins, si l'on se place dans des conditions où la composante

⁴ $\hat{\sigma}_\phi$ se distingue de σ_ϕ car est défini par un angle plutôt qu'un temps.

déterministe de l'erreur géométrique est prépondérante, le théorème centrale limite ne peut plus être utilisé. Il est alors nécessaire de maîtriser parfaitement les paramètres du système déterministe pour prévoir la forme de la perturbation induite sur l'observation spectrale de la vitesse angulaire instantanée. Si l'erreur géométrique $\epsilon_g(\theta)$ associée à ce capteur est par exemple définie telle que :

$$\begin{cases} \epsilon_g(\theta) = a \cdot \theta & , \quad \forall \theta \in [0, 2\pi] \\ \epsilon_g(\theta + 2k\pi) = \epsilon_g(\theta) & , \quad \forall k, \theta \in \mathbb{N} \cdot [0, 2\pi] \end{cases} \quad (2.46)$$

où a , une constante qui représente la dérivée de l'erreur de positionnement des segments d'un capteur angulaire, est illustré par la figure 2.17 dans le cas d'une mire de capteur angulaire en « bande zébrée ». L'erreur géométrique, non nulle, est presque

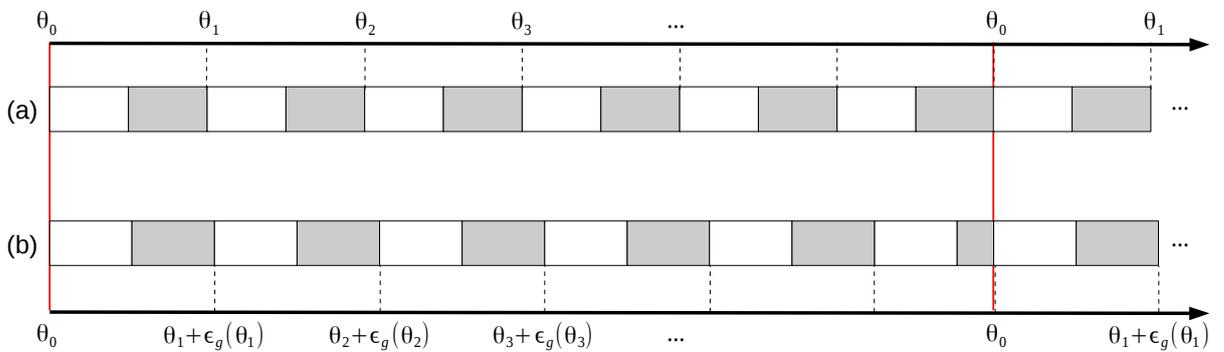


FIG. 2.17: Illustration d'une erreur déterministe de positionnement à partir d'une mire de capteur angulaire en « bande zébrée », a) mire idéale, b) mire présentant une erreur déterministe.

déterministe : il n'existe qu'une seule trajectoire possible pour l'erreur géométrique. Le spectre d'amplitude de la transformée de Fourier associée à cette erreur prend alors la forme suivante, elle aussi déterministe :

$$\mathcal{F}_{\epsilon_g}(f_\theta) = \frac{a}{4\pi^2 f_\theta^2} \quad (2.47)$$

où a joue effectivement un rôle prépondérant. S'il était possible de maîtriser ce genre de paramètres, il suffirait alors d'associer la composante aléatoire de l'erreur géométrique par superposition. Néanmoins, ce paramètre est à priori hors de contrôle, car dépendant intrinsèquement d'une erreur d'installation ou de positionnement inquantifiable à priori.

2.3.3 Erreur électrique

Les connaissances de l'auteur en matière de bruit électrique sont relativement limitées, et s'appuient principalement sur des cours d'électronique laissés à libre disposi-

tion sur internet ^{5 6 7}. L'étude présentée dans cette partie est donc ouverte à discussion, et ne peut prétendre résoudre le problème lié à l'erreur électrique en l'état.

En ne considérant que le bruit dont l'effet sur la mesure est inévitable ⁸, une première catégorie de bruit à considérer est celle associée à la nature discontinue des porteurs de charge [MUL 02] et communément dénommée bruit de grenaille (électrique!). L'agitation thermique des électrons provoque des fluctuations aléatoires de la tension en tout point d'un circuit, et se manifeste dans le domaine spectrale par un bruit blanc de faible amplitude. Le courant électrique, qui paraît continu à l'échelle macroscopique, est donc au niveau microscopique constitué par un grand nombre d'impulsions de couran.

Le bruit en « $1/f$ » ou « flicker », décroissant avec la fréquence, apparaît dans les semi-conducteurs et dans les résistances au carbone. L'électronique du capteur angulaire ainsi que le système d'acquisition sont concernés par ce bruit. La bande de fréquence où il est supérieur au bruit thermique tend à se rétrécir au fur et à mesure des progrès technologiques. Il est supérieur au bruit thermique en-dessous de quelques dizaines de Hz pour les meilleures technologies actuelles. Sans maîtriser l'amplitude exacte de l'observation spectrale de l'erreur électrique, on s'attend donc à une perturbation comme celle présentée figure 2.18, avec f_{im} la fréquence cyclique où les perturbations qui prennent la forme de bruit blanc deviennent prépondérante devant les perturbations en « $1/f$ ».

Il est intéressant de mettre en comparaison l'erreur électrique avec l'erreur de quantification, présentée sur la figure 2.12 pour constater que si l'erreur électrique est suspectée d'être particulièrement influente au niveau des basses fréquences, la différence finie aura tendance à masquer celles qui ont été initiées en amont de l'opération différentielle. Il est à craindre que la perturbation électrique n'intervienne pas uniquement en amont de l'opération différentielle, bien que ce phénomène nous permette néanmoins de gérer les imperfections du système de lecture, d'interpolation et de transport du signal. Le bruit en « $1/f$ » est susceptible d'altérer l'instant de changement d'état de chaque unité de mémoire ou portes constitutive du système d'acquisition. Une partie de la thèse, qui ne peut apparaître dans ce mémoire, a visé à optimiser le développement des applications d'acquisition pour réduire le nombre de bascules employées pour les applications mises en œuvre expérimentalement. Enfin, il est à noter que f_{im} étant l'inverse d'une constante temporelle, sa localisation graduée en « événement par tour » évolue avec la vitesse macroscopique de rotation de l'arbre porteur du capteur angulaire. S'il a été démontré que l'amplitude de l'erreur de quantification dépend elle aussi de la vitesse macroscopique, ce

⁵Cisco System : Networking Academy Program, couche 1, Electronique et signalisation 2011, <http://jibbingame.com/rsi/ccna/c1/start.html>

⁶S. DosSantos : Cours de Traitement du Signal 2008, www.enivlien.fr/Annales/3A/Cours_TS_3A.pdf

⁷G. Chagnon : Cours de Génie Electrique 2003, www.gchagnon.fr/cours/cours.pdf

⁸de nombreux problèmes liés aux perturbations électriques ont été corrigés en améliorant le processus d'acquisition.

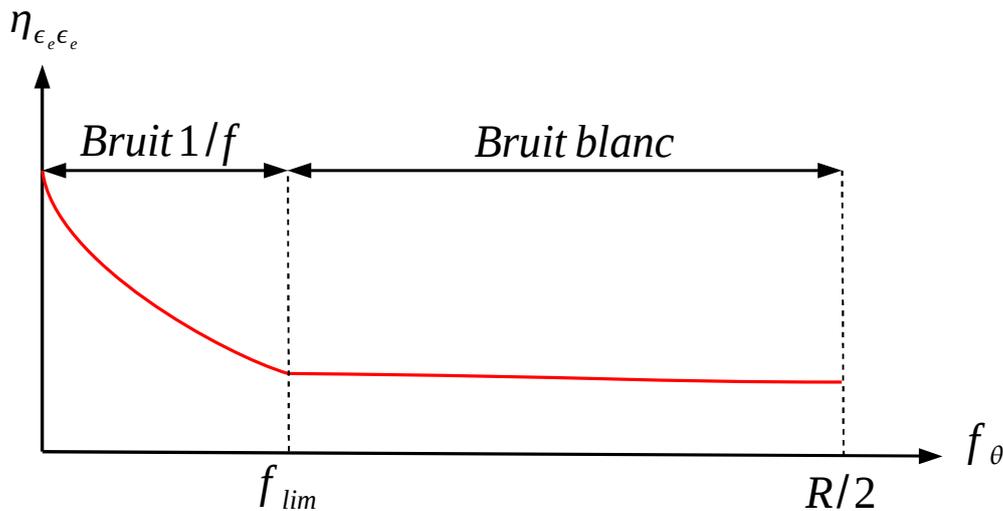


FIG. 2.18: Forme suspectée pour l'erreur électrique sur l'observation spectrale de la vitesse angulaire instantanée.

dernier point rajoute une difficulté supplémentaire à l'estimation du bruit dans sa globalité dans des conditions non stationnaires.

2.3.4 Validation expérimentale

Les approches présentées dans la partie précédente sont originales et méritent à ce titre d'être validées expérimentalement. Le banc d'essais Boite de vitesses présente l'avantage de pouvoir fonctionner sous des régimes entièrement paramétrables (vitesse constante, rampe...). Ce premier point est indispensable pour valider l'influence du phénomène de quantification ainsi que celle des perturbations électriques sur l'observation spectrale de la vitesse de rotation. Le système d'acquisition utilisé sur ce banc est identique à celui utilisé sur l'éolienne et les arbres qui le composent sont équipés de capteurs angulaires assimilables à ceux installés dans l'éolienne. Les résultats obtenus sur l'erreur géométrique peuvent donc être extrapolés aux mesures effectuées sur l'éolienne. Ce banc, détaillé en annexe §D.1.1, est utilisé pour aboutir aux résultats suivants.

2.3.4.1 Erreur de quantification

Deux mesures sont ici présentées pour valider l'estimation du bruit de quantification. Ces mesures sont effectuées simultanément, si bien que les informations contenues dans les signaux sont identiques, mis à part les perturbations induites par l'erreur de quantification. L'évolution globale du signal vitesse est présentée figure 2.19. La mesure bleue est effectuée avec une horloge de fréquence $20kHz$ et la mesure rouge avec une horloge de fréquence $105kHz$. Ces fréquences de comptage particulièrement basses mettent en avant le bruit de quantification afin de le rendre prépondérant vis à vis du bruit

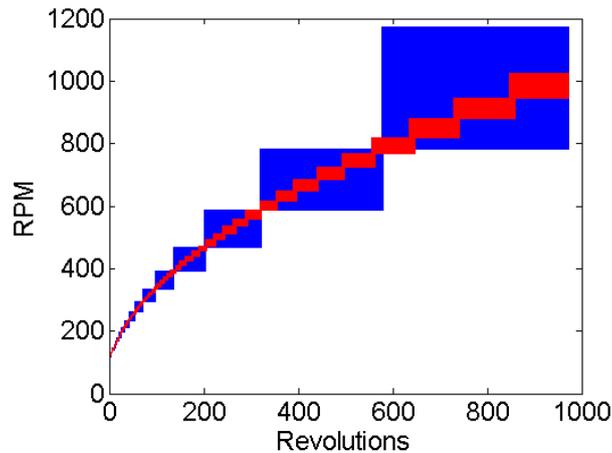


FIG. 2.19: Évolution angulaire de la vitesse de rotation observée par mesure Elapse Time. avec $Fh = 20kHz$ en bleu, $Fh = 105kHz$ en rouge.

électrique. Les DSP obtenues à partir de chaque mesure sont superposées sur les figures 2.20 avec le seuil de quantification défini pour $\alpha = 0.10\%$. Les observations spectrales ainsi que les seuils de quantification sont convertis en une unité homogène à une vitesse de rotation sur le graphe de droite. Pour estimer la validité de l'approche, les proportions des composantes spectrales dépassant le seuil de quantification ont été mesurées sur l'intervalle qui sépare les fréquences cycliques $f_{\theta} = 100ev/rev.$ et $f_{\theta} = 260ev/rev.$, apparemment représentatif du bruit de fond et donc du bruit de quantification. Sur l'observation $\mathcal{D}_{\omega\omega}(f\theta)$, ces taux sont respectivement égaux à 0.10% et 0.05% pour les fréquences de comptage $F_c = 105kHz$ et $F_c = 20kHz$, confirmant ainsi l'hypothèse que le bruit de quantification est prépondérant sur cette bande fréquentielle et validant l'approche proposée.

En outre, même si de nombreux phénomènes cycliques se distinguent sur les fréquences plus basses, le seuil de quantification visible sur la figure 2.20 n'apparaît pas comme un excellent indicateur du bruit de fond de l'observation spectrale. En ce sens, la forme hyperbolique pourrait être interprétée, à tort, comme un bruit électrique en « $1/f$ ». En réalité, ce phénomène est l'artefact d'une perturbation spectrale induite par la variation macroscopique de vitesse. La méthode de fenêtrage est un moyen efficace de contourner ce problème et de profiter de l'absence de bruit de quantification pour les fréquences les plus basses. Cette perturbation ne s'apparentant pas à une erreur métrologique, elle sera expliquée, discutée puis corrigée dans la partie §3.3. Comme il est délicat de dissocier l'erreur de quantification de l'erreur géométrique, l'importance de l'hypothèse de non stationnarité est abordée à travers une expérience mêlant les deux types d'erreurs dans la partie §2.3.4.3.

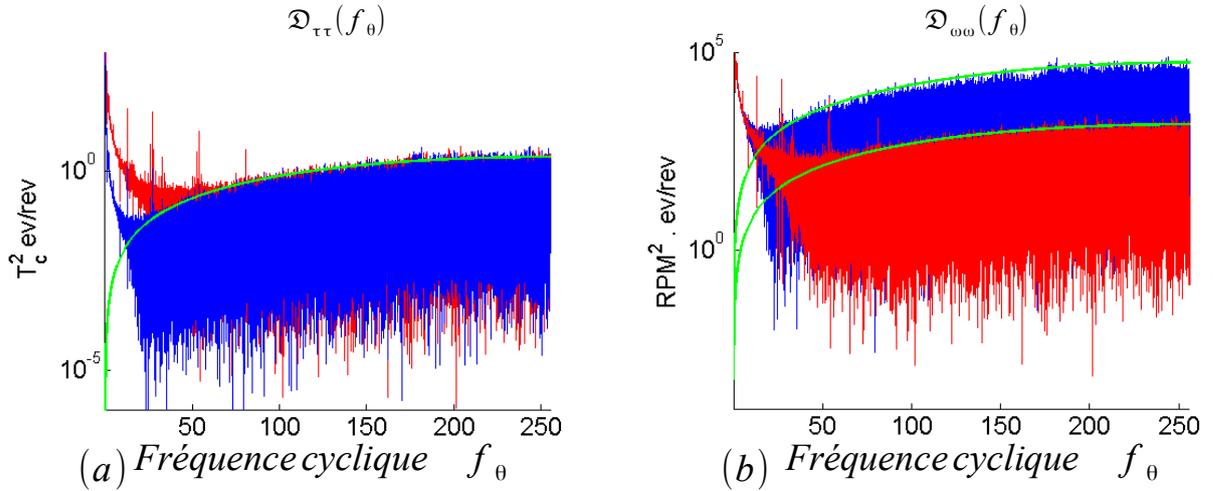


FIG. 2.20: DSP des mesures observée (a) en ET et (b) en vitesse. Frequence de compteur : $F_c = 20kHz$ en bleu, $F_c = 105kHz$ en rouge. $\alpha = 0.1\%$

2.3.4.2 Erreur géométrique

L'erreur géométrique est beaucoup moins facile à vérifier expérimentalement, car la valeur exacte de σ_ϕ , l'écart type de la loi gaussienne représentative de l'erreur aléatoire sur un cycle, n'est pas connue, et reste estimée par un échantillon dont la taille est limitée par la résolution du codeur, ou encore par la longueur du cycle. Les valeurs délivrées par le constructeur du codeur à titre indicatif s'avèrent dans la pratique largement supérieures à la réalité. Ensuite, rien n'assure que la partie déterministe de l'erreur géométrique soit négligeable devant la partie aléatoire. L'étude ci-dessous propose donc de caractériser en premier lieu l'erreur géométrique du codeur magnétique Lika installé sur l'arbre lent de l'éolienne. Ensuite, le capteur magnétique Admotec sera étudié comme un exemple pertinent d'erreur géométrique déterministe (le système d'acquisition de l'éolienne est présenté en Annexe D.1.3.3).

Erreur géométrique stochastique.

Les mesures sont issues de l'expérience sur l'éolienne MM82 MAIA EOLIS dont les détails techniques sont donnés en annexe. On suspecte le codeur magnétique d'être perturbé par les deux types d'erreur discutés précédemment. En effet, la piste magnétique constituée de 512 poles émet 20480 fronts montants par tour d'arbre. Un facteur d'interpolation de 40 est donc à considérer, en plus de l'erreur sur un tour inévitablement induite lors de la fabrication du codeur. La figure 2.21 présente l'observation spatiale de la séquence $\tau(\theta)$ en fonction de la position du codeur respectivement sur 1 tour et sur 1 période d'interpolation. À l'appui de la figure 2.15 et en considérant que les perturbations géométriques suivent une loi normale, on calcule rapidement les écarts type en fonction de la fréquence du compteur : $\sigma_\phi^T = \frac{\Delta\phi_T}{6} = 170$ et $\sigma_\phi^P = \frac{\Delta\phi_P}{6} = 1200$ impulsions d'hor-

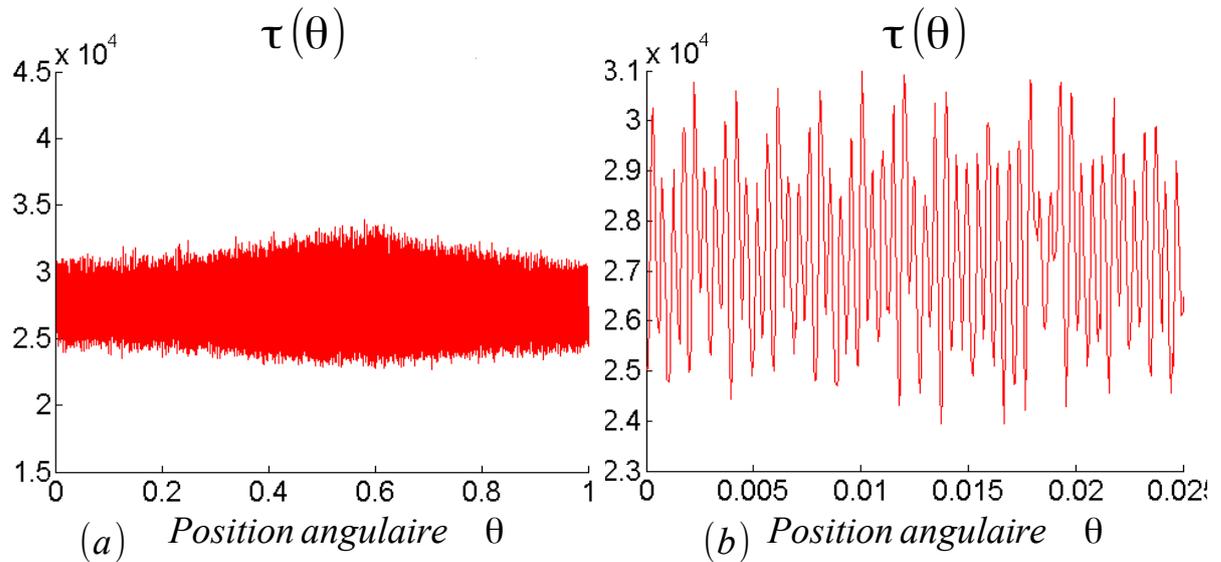


FIG. 2.21: Observation spatiale du codeur magnétique LIKA sur une période des erreurs géométrique. (a) erreur sur un tour, (b) erreur sur une interpolation à droite.

loge. L'estimation du bruit géométrique est représentée sur la figure 2.22 par les points correspondant aux composantes fréquentielles où se concentre l'erreur périodique. Sur le graphe de gauche, l'erreur induite par le processus d'interpolation est estimée pour un taux de probabilité $\alpha = 5\%$. Un point dépasse largement le seuil censé majorer l'erreur géométrique, signe qu'un phénomène mécanique induit des variations de vitesse 2048 fois par tour d'arbre lent ou alors, et c'est plus probable, que le phénomène d'interpolation introduit une seconde erreur géométrique se répétant tout les 10 fronts montants. L'erreur géométrique sur un tour est majorée avec succès par un taux $\alpha = 0.1\%$ sur le graphe de droite. De nouveau, même si la seule composante fréquentielle supérieure au point censé la majorer correspond à l'ordre 1 de l'arbre porteur du codeur, il est impossible d'assurer, à ce stade, que l'erreur provient d'un phénomène mécanique de type balourd plutôt qu'une erreur géométrique favorisant les fréquences basses (cf §. 4.2).

Erreur géométrique Déterministe.

Le codeur Admotec installé sur l'éolienne est le parfait exemple d'une erreur géométrique dont la partie déterministe est prépondérante. Ce capteur est un codeur magnétique de type sans contact, dont la mire est une bande flexible en elastomère ajustée au périmètre de l'arbre. La lumière inévitablement générée par la jointure des extrémités de la mire induit une perturbation géométrique très importante, 1 fois par tour. La figure 2.23 présente une observation spectrale de la vitesse angulaire instantanée obtenue avec ce capteur sur l'éolienne. Caractéristique d'une exponentielle évanescence, les ordres entiers apparaissent comme évoluant selon une droite sur l'observation spectrale en échelle log. Si nous parvenions à estimer la fonction suivie par la partie déterministe des ordres entiers,

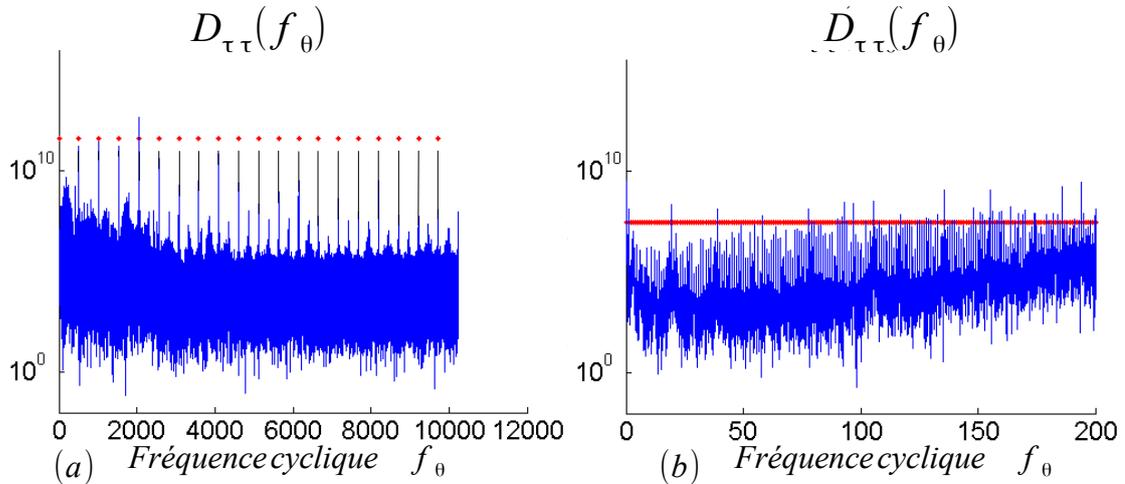


FIG. 2.22: Observation spectrale obtenue avec le codeur magnétique LIKA focalisée sur (a) l'erreur d'interpolation puis sur (b) l'erreur se répétant à chaque tour.

il serait possible d'ajouter l'estimation de l'erreur aléatoire associée au bruit d'interpolation, clairement visible sur le graphe de gauche aux multiples de la fréquence $f_\theta = 128$ évènements par tour. C'est un axe d'amélioration intéressant.

2.3.4.3 L'erreur électrique ?

L'erreur de quantification ayant été montrée expérimentalement capable de supplanter l'erreur électrique sous certaines conditions et les deux ayant été présentées comme agissant sur les mêmes composantes en théorie, on propose d'observer l'apparition de l'erreur électrique en réduisant graduellement l'erreur de quantification. Il sera ainsi possible de vérifier la forme prise par le bruit de fond en présence de cette dernière perturbation.

Une mesure effectuée sous les mêmes conditions que dans la partie 2.3.4.1 a été réalisée avec une fréquence de compteur de 120MHz . Obtenir une telle fréquence de compteur impose l'utilisation d'une horloge surfréquentée⁹ par trois et profite entièrement du potentiel de la carte d'acquisition utilisée sur le banc d'essais. À partir de cette mesure sont simulées des acquisitions que l'on aurait pu obtenir en utilisant une horloge de comptage dont la fréquence est plus faible. Parmi ces simulations, celle obtenue en réduisant artificiellement la fréquence de comptage par 1143 fut comparée avec succès à la mesure réelle à 105kHz présentée dans la partie 2.3.4.1 pour valider l'ensemble des simulations. La figure 2.24 présente l'influence de l'horloge de quantification sur la vitesse de rotation quand elle est observée spatialement. La perturbation induite par la variation macroscopique de vitesse est corrigée par une technique de

⁹traduction du terme anglais peut être plus connu *overclocking*

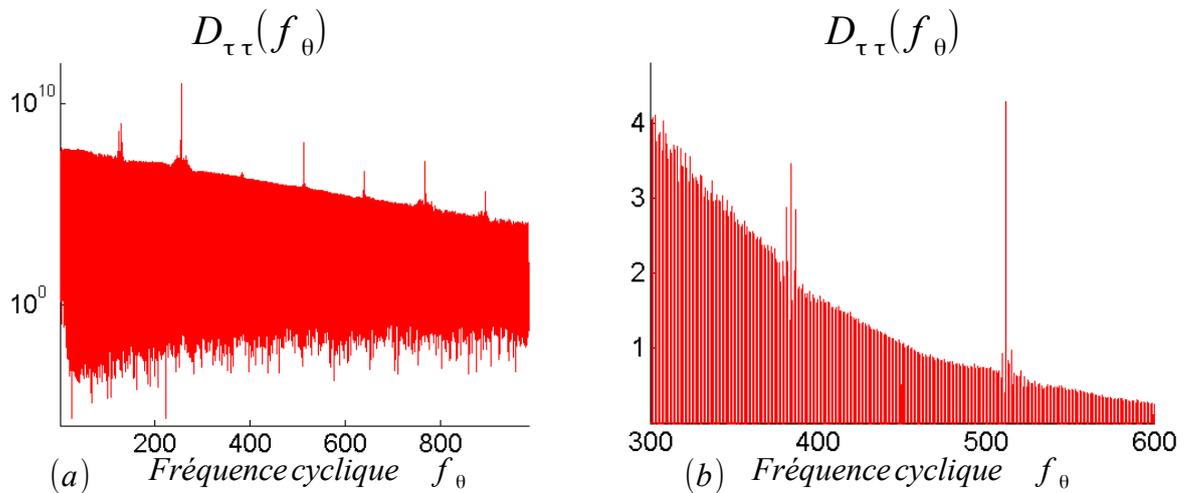


FIG. 2.23: Observation spectrale, obtenue avec le codeur Admotec, fortement perturbée par une erreur géométrique déterministe. ordonnées graduée selon (a) une échelle log, (b) une échelle linéaire)

fenêtrage (dont il sera question dans la section suivante) de manière à ne conserver que les bruits métrologiques : de quantification, géométrique et électrique. La figure 2.25 présente ensuite la densité spectrale de puissance obtenue pour chaque simulation. Le code couleur employé pour les figures mentionnées ci-dessus permet d'identifier les fréquences de compteur les plus faibles (spectre turquoise) ou les plus élevées (spectre jaune). L'évolution du pied de spectre est ainsi identifiable et la forme vers laquelle il tend quand la fréquence du compteur est la plus grande (spectre jaune) converge vers la prédiction proposée sur la figure 2.18 : le pied de spectre présente alors un bruit rose pour les fréquences événementielles les plus basses tandis que pour les fréquences cycliques plus élevées, la perturbation semble effectivement devenir blanche.

En dernier lieu, une expérience est effectuée sous des conditions macroscopiques stationnaires, pour une vitesse de rotation avoisinant les 1000 tours par minute, sur le banc d'essais BV. Les densités spectrales de puissance obtenues pour chaque simulation sont représentées sur la figure 2.27 et apportent plusieurs résultats importants.

L'hypothèse de non stationnarité ayant permis l'estimation du seuil de quantification dans la partie 2.3.1.2 n'est plus respectée dans cet exemple. Ainsi, la répartition des coefficients spectraux influencés par l'erreur de quantification n'a plus de raison d'être uniforme. Ce phénomène, d'autant plus visible sur la figure 2.27 que la fréquence de comptage est faible, peut être assimilé à tort à une zone de résonance torsionnelle. En effet, une zone de résonance torsionnelle correspond à un phénomène temporel n'apparaissant qu'à une certaine vitesse de rotation et aura tendance à se dissiper si la vitesse

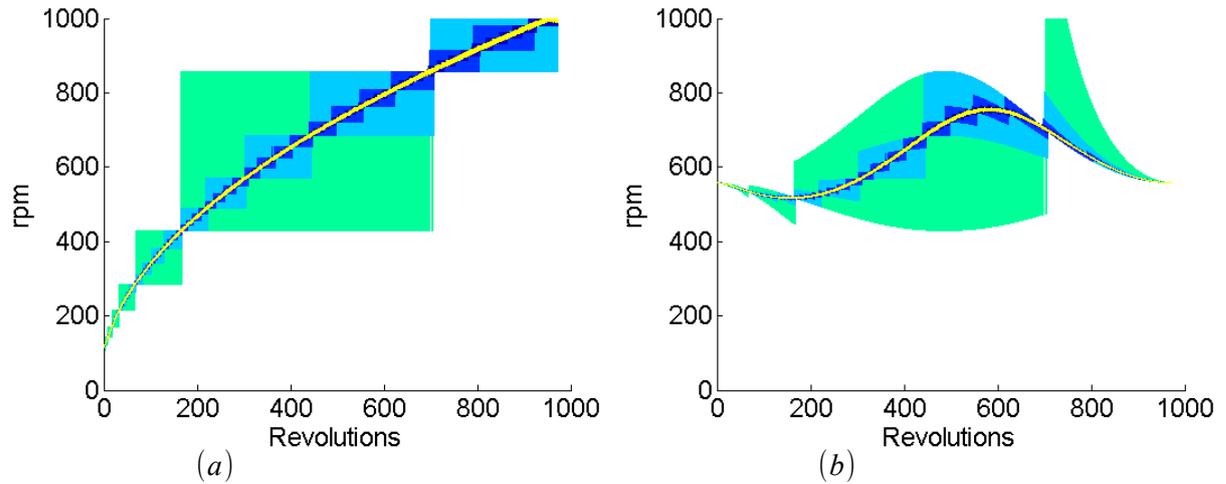


FIG. 2.24: Observation spatiale de la vitesse angulaire instantanée (a) brute et (b) fenêtrée, sous conditions largement non stationnaires.

macroscopique varie. Il ne serait donc pas étonnant de percevoir différentes zones de résonance à différentes vitesses de rotation, tant qu'elles ne varient pas pendant l'observation. Néanmoins, la claire dépendance entre la localisation fréquentielle de ce phénomène et la fréquence du compteur F_h permet de le distinguer d'une variation de vitesse réelle. Effectivement, ces « zones de résonance » se déplacent, s'amointrissent puis disparaissent quand le seuil de quantification augmente. Ce constat expérimental, appuyé par les résultats théoriques présentés dans la partie 2.3.1.2 permet de développer une méthode visant à distinguer les résonances de quantification des résonances physiques : si une mesure, effectuée à la fréquence de comptage optimale présente une zone de résonance. Le phénomène de quantification peut être reconnu à partir des deux propriétés suivantes :

1. le pied de spectre est strictement inférieur au seuil de quantification sur un intervalle fréquentiel. En effet, à l'appui du taux utilisé pour déterminer le seuil de quantification, on peut détecter les zones fréquentielles où le spectre est trop bas par une simple comparaison entre le taux réel et le taux théorique (voir partie 2.3.4.1).
2. les zones où le seuil de quantification théorique paraît sous estimé se déplacent quand la fréquence de comptage est réduite par post traitement.

Sous des conditions non stationnaires, si l'enveloppe du spectre coïncide effectivement avec l'estimation du bruit de quantification pour les fréquences de compteur les plus faibles, un seuil semble définir une fréquence de compteur au delà de laquelle le niveau de bruit du spectre n'est plus réduit (voir figure 2.27). Sous ces conditions, le fond de spectre est beaucoup moins régulier et prend une forme ressemblant au bruit électrique dont le profil fut esquissé dans la figure 2.18.

Pour valider cette hypothèse, une première vérification confirme que l'intersection f_{lim} de l'enveloppe du bruit électrique en $1/f$ et du bruit de grenaille apparaît effectivement

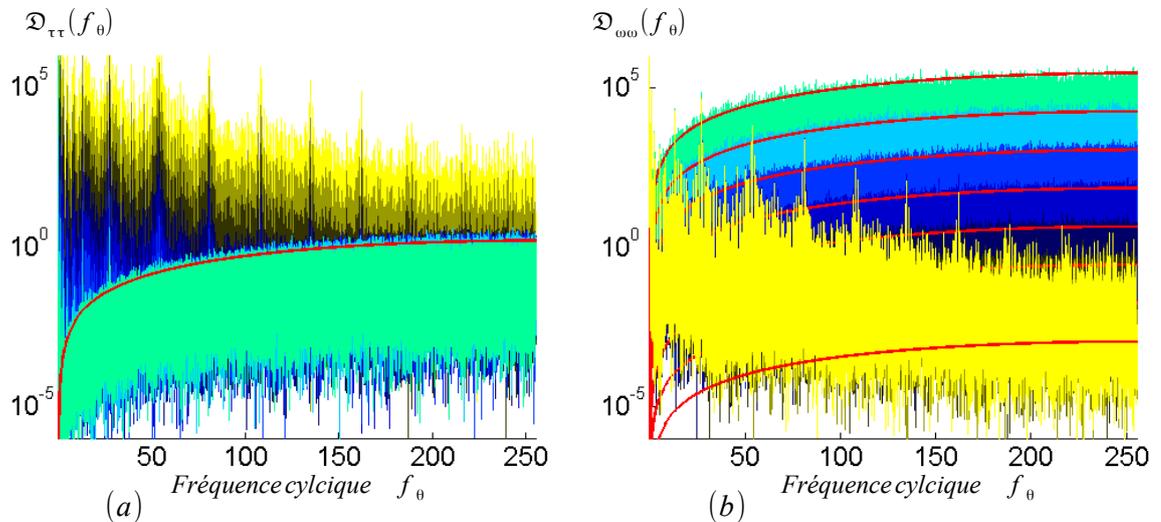


FIG. 2.25: Evolution de la DSP en fonction de la fréquence de l'horloge de comptage. (a) $\mathcal{D}_{\tau\tau}(f_{\theta})$ et (b) $\mathcal{D}_{\omega\omega}(f_{\theta})$, sous conditions largement non stationnaires.

dépendre de la vitesse de rotation. Néanmoins, cette intersection étant approximativement identifiée au dessus de 2000 Hertz¹⁰ ne correspond pas aux caractéristiques usuelles du bruit de quantification [MUL 02]. Les connaissances de l'auteur ne sont pas suffisantes pour déterminer la nature de ce « bruit de mesure », dont les caractéristiques principales sont énoncées ci dessous :

1. une composante « bruit blanc » et une composante « bruit rose ».
2. l'intersection entre « bruit rose » et « bruit blanc » semble pouvoir être approximée par une fréquence temporelle (environ 2200Hz)
3. la valeur efficace du « bruit blanc » est constante quand l'amplitude du spectre est gradué en vitesse plutôt qu'en temps.

¹⁰à 150 évènements par tour sur la mesure à 1000rpm, et à 210 évènement par tour sur la mesure à 600rpm

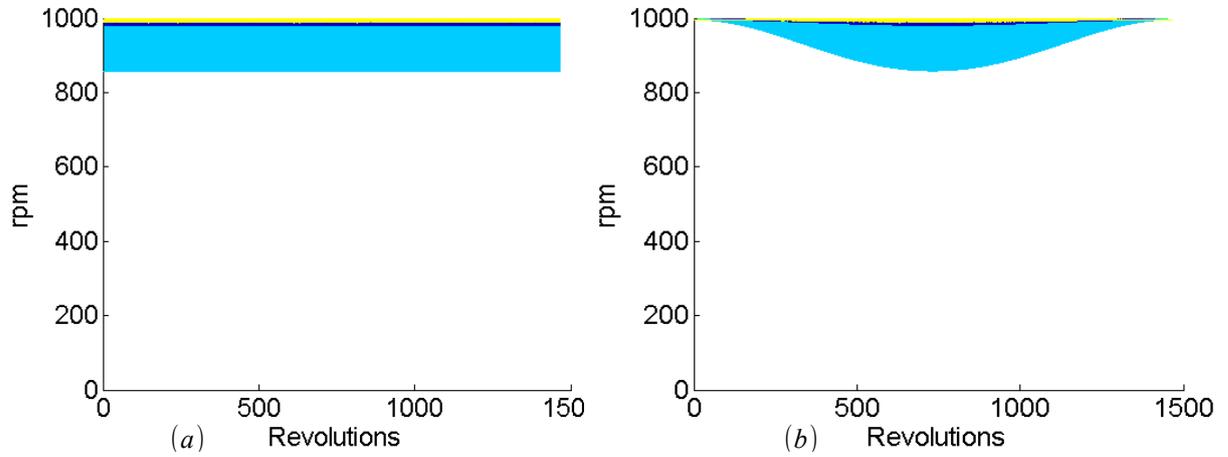


FIG. 2.26: Observation spatiale de la vitesse angulaire instantanée (a) brute et (b) fenêtrée, sous conditions stationnaires.

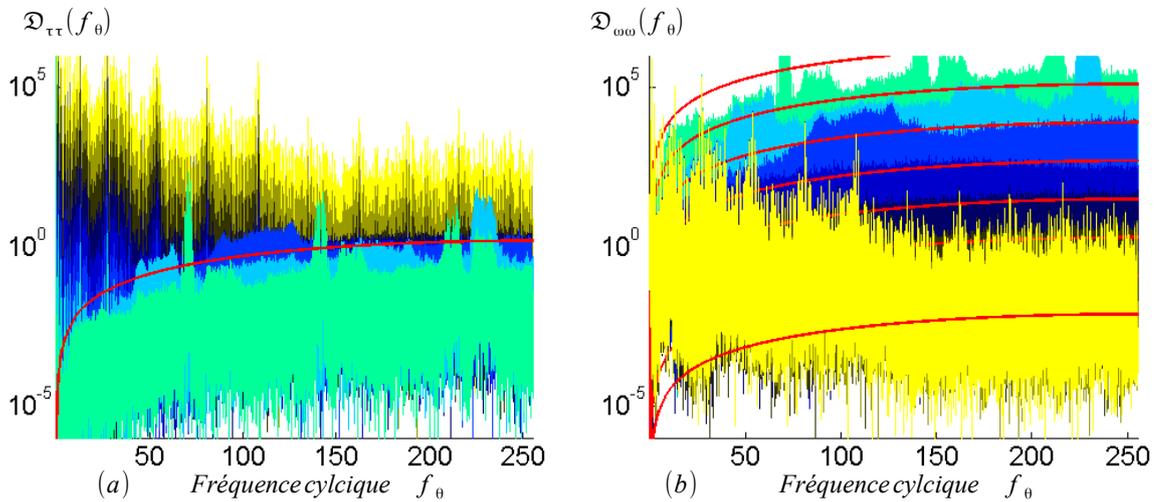


FIG. 2.27: Evolution de la DSP en fonction de la fréquence de l'horloge de comptage.(a) $\mathcal{D}_{\tau\tau}(f_{\theta})$ et (b) $\mathcal{D}_{\omega\omega}(f_{\theta})$, sous conditions stationnaires.

2.4 Conclusion

Ce chapitre fut tout d'abord l'occasion de présenter différentes méthodes menant à la vitesse instantanée. Celles qualifiées de temporelles, majoritaires dans la littérature, ne sont pas retenues pour l'instrumentation d'une éolienne car ne bénéficient pas des avantages du synchronisme cyclique, indispensables sous les conditions de fonctionnement qui marquent une ligne d'arbre d'éolienne.

La vitesse angulaire instantanée est ici obtenue par la méthode d'écart temporel. Si cette méthode mesure un temps plutôt qu'une vitesse de rotation, l'analyse spectrale est préférablement effectuée sur le signal original, quitte à ce que l'amplitude du périodogramme soit ensuite convertie en variation de vitesse de rotation. Ce choix est aujourd'hui basé sur l'estimation du bruit de quantification, permise uniquement si la transformée de Fourier est appliquée sur la mesure Écart Temporel originale.

Le phénomène de quantification et l'erreur géométrique sont les principales sources de bruit qui marquent une acquisition de vitesse instantanée à partir de cette méthode. La forme que prennent ces erreurs sur l'observation spectrale est désormais connue, et peut être utilisée avantageusement pour dimensionner un système de surveillance basée sur l'acquisition angulaire de l'écart temporel.

Si l'utilisation d'un capteur de résolution élevée amplifie ce bruit de mesure, installer le capteur angulaire sur la partie rapide de la ligne d'arbre peut, sous certaines conditions, s'avérer fructueux. Les fréquences caractéristiques des éléments sous surveillance, présentant des fréquences cycliques plus faibles que si le capteur était positionné sur la partie lente, sont moins impactées par le phénomène de quantification. Cette observation invite par ailleurs à travailler sur un capteur angulaire dont le choix de la résolution ferait replier les phénomènes haute fréquence sur une zone dépourvue de bruit de quantification...

Le bruit géométrique est quant à lui plus difficilement contournable. Les constructeurs de capteurs angulaires maîtrisent mal ce paramètre, dont l'influence sur l'observation spectrale s'avère particulièrement gênante vis à vis des éléments synchrones de l'arbre où le capteur est installé.

En outre, une troisième forme de bruit limite la précision de l'observation spectrale quand les paramètres de dimensionnement réduisent suffisamment le bruit de quantification. L'hypothèse selon laquelle cette troisième source est liée aux perturbations électriques ne présente aujourd'hui pas suffisamment de résultats pour être défendue. Ce phénomène peut aussi être représentatif de l'amortissement structurel du système mécanique, qui relierait les modes propres visible en torsion par un pied de spectre...

Ce chapitre ne résout malheureusement pas toutes les énigmes que cachent ce procédé

de mesure. Il ouvre néanmoins les pistes de réflexion sur les travaux à mener par la suite, notamment en terme de modélisation, qui seront étayées dans la conclusion générale de ce travail. En outre, l'observation spectrale de la vitesse angulaire instantanée est une introduction indispensable aux outils de traitement originaux qui sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Développement d'Outils Originaux pour l'Analyse Angulaire

Après avoir justifié le choix des méthodes de mesure de type « périodomètre » et analysé ses limites, il est désormais question de présenter les outils qui faciliteront l'analyse spectrale de tels signaux.

Si la plupart ont pu être adaptés des techniques usuellement employées en surveillance vibratoire, un premier outil doit être développé pour traiter la forte perturbation induite par la tendance macroscopique du signal vitesse.

Sommaire

3.1	Introduction	79
3.2	Localisation fréquentielle du défaut et augmentation de la résolution	80
3.2.1	Motivation	80
3.2.2	Fonction de repérage événementiel	81
3.2.3	Réduction de résolution	85
3.3	Traitement de la tendance macroscopique	90
3.3.1	Présentation de la perturbation	90
3.3.2	Analyse de l'accélération angulaire instantanée	92
3.3.3	Adaptation des techniques de fenêtrage	95
3.3.4	Bilan	97
3.4	Adaptation des outils de traitement vibratoire	99
3.4.1	Vers un meilleur estimateur de la DSP	99
3.4.2	Enveloppe Spectrale et approche cyclo-non stationnaire	100
3.5	Observation angle / fréquence cyclique	105
3.5.1	Adaptation de la TFCT aux signaux angulaires	105
3.5.2	Distinctions des phénomènes cycliques, temporels et « autres »	106
3.5.3	Relocalisation d'un phénomène temporel replié	107
3.5.4	Validation sur l'éolienne	111
3.5.5	Proposition pour les phénomènes cycliques repliés	112
3.6	Conclusion	115

3.1 Introduction

Dans le chapitre 1, les outils de traitement du signal proposent différents modes d'observation des caractéristiques statistiques d'un phénomène vibratoire. Chaque indicateur de surveillance vibratoire s'appuie sur un ou plusieurs de ces outils et met ainsi en valeur les propriétés correspondant au phénomène recherché. L'objectif global du présent chapitre est de présenter des techniques de traitement qui mettent en valeur le signal de vitesse instantanée, quand il est obtenu par une méthode de type « périodogramme ».

L'intérêt sera tout d'abord porté sur l'amélioration de la résolution spectrale, rendue nécessaire par la complexité mécanique de l'éolienne et par la volonté de n'utiliser qu'un seul capteur angulaire pour surveiller l'ensemble de la ligne d'arbre. Deux solutions seront proposées à cet effet (3.2).

Il a été montré précédemment qu'à ce jour, ce type de variation de vitesse angulaire instantanée ne fut traité que par une Transformée de Fourier ou par un moyennage angulaire menant à l'observation directe des variations de vitesse en fonction de la position du capteur. Appliqués à une mesure représentative du fonctionnement typique de l'éolienne, ces outils se révéleront insuffisants. Plusieurs solutions alternatives seront proposées pour contourner le problème lié à la tendance macroscopique de la vitesse de rotation (3.3).

Dès lors que le problème de non stationnarité est contourné, des outils de traitement plus conventionnels peuvent être adaptés à la surveillance par la vitesse instantanée. Ainsi en sera t'il de l'estimation du périodogramme moyenné et du calcul de l'enveloppe carrée ajustée par la méthode du kurtogramme (3.4).

Enfin, les avantages d'une observation de type temps / fréquence sur un signal angulaire en général, et un signal de vitesse instantanée en particulier, seront détaillés (3.5). Il sera même proposé une combinaison originale entre approche angulaire et temporelle, permettant d'imaginer un procédé capable d'identifier la fréquence originale d'un phénomène vibratoire replié.

L'ensemble de ces trois parties sera systématiquement l'objet d'une application et d'une validation expérimentale sur la base des mesures réalisées sur l'éolienne instrumentée.

3.2 Localisation fréquentielle du défaut et augmentation de la résolution

3.2.1 Motivation

La mesure de vitesse angulaire instantanée et l'échantillonnage angulaire accélérométrique s'avèrent être des outils de surveillance prometteurs, de part le positionnement angulaire parfaitement régulier que respecte l'acquisition d'un tour sur l'autre. L'isomorphisme de Wold, présenté dans la section 2.2.2, favorise effectivement les phénomènes dont la fréquence cyclique est multiple de la résolution spectrale δf_θ . La durée d'une acquisition n'est plus limitée par la contrainte liée à la stabilité cinétique, et permet alors d'affiner la résolution fréquentielle de la surveillance. Il devient théoriquement possible de viser une fréquence événementielle avec une grande précision et de faire apparaître des phénomènes peu énergétiques respectant la régularité angulaire de l'échantillonnage. Néanmoins, la durée des mesures est limitée par des contraintes physiques de stockage et de traitement inhérentes aux systèmes informatiques sollicités. Cette limite se traduit directement sur l'observation spectrale par une minoration de la résolution fréquentielle et pose deux problèmes distincts à l'observation angulaire :

1. sans connaître la fréquence d'apparition exacte d'un défaut, on perd l'avantage présenté par l'isomorphisme de Wold et le défaut se retrouve perturbé par le « picket fence effect ».
2. un système mécanique complexe peut voir des fréquences de plusieurs phénomènes cycliques trop proches pour que la résolution fréquentielle minimale puisse permettre de les distinguer

Nous proposons ici une solution pour chaque problème. La première, algorithmique, manipule la technique bien connue de « Zero Padding » à la surveillance en vitesse pour contrer le phénomène de « picket fence effect » qui peut cacher certaines composantes fréquentielles. La seconde, matérielle, est une solution développée sur la carte d'acquisition pour augmenter la résolution fréquentielle physique sans changer la résolution du capteur angulaire. Ces deux solutions, qui peuvent être aisément élargies à la surveillance vibratoire sous échantillonnage angulaire, sont regroupées dans cette partie car elles modifient la largeur des canaux fréquentiels d'une observation spectrale. Néanmoins, seule la deuxième méthode modifie réellement la résolution spectrale de l'observation.

Tout comme celles présentées dans la partie suivante, ces méthodes sont mises en pratique sur une mesure expérimentale issue de l'éolienne, présentée dans l'annexe D.1.3. L'observation brute de la vitesse angulaire et l'amplitude de la transformée de Fourier obtenue à partir de cette mesure sont présentées côte à côte sur la figure 3.1. La variation macroscopique de vitesse sur les 1500 tours que dure la mesure est caractéristique d'un fonctionnement en régime non établi qui induit sur les composantes fréquentielles de faible fréquence une perturbation large bande qui sera détaillée par la suite. La taille de la mesure, ici présentée en nombre de tours, est limitée par les caractéristiques du système

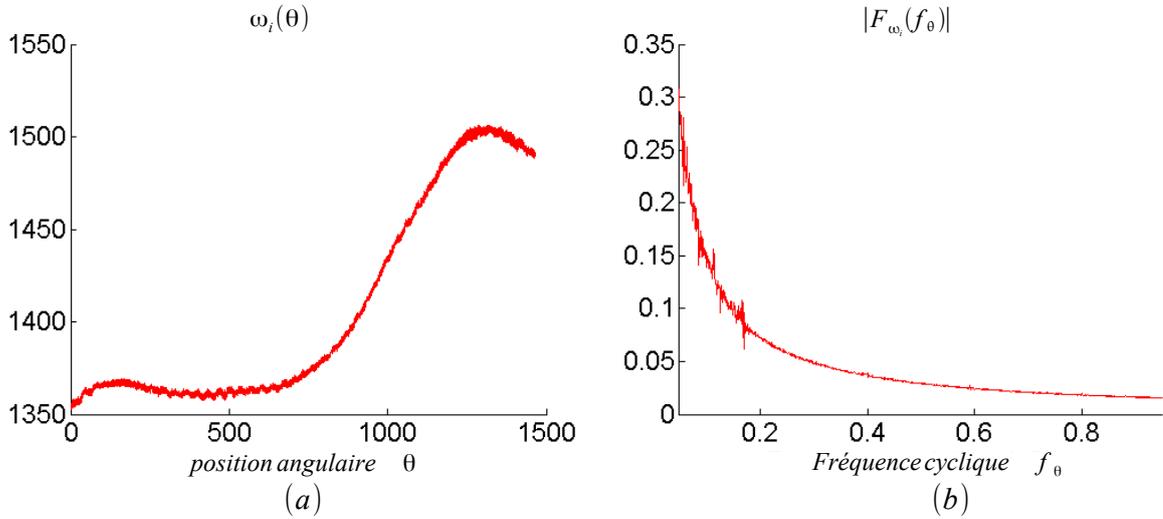


FIG. 3.1: Observation (a) angulaire et (b) spectrale du signal vitesse angulaire instantanée depuis le capteur optique L&L.

d'acquisition, la puissance de calcul nécessaire pour effectuer les traitements ultérieurs ainsi que l'espace mémoire disponible pour archivage. Les différentes méthodes seront testées sur les excitations cycliques les plus éloignées du capteur : à savoir le comportement mécanique de l'arbre lent (AL) ainsi que l'engrènement qui sépare l'arbre lent des satellites (AL-Sat). Les fréquences cycliques correspondant à ces phénomènes angulaires sont cinématiquement reliées à la fréquence du capteur angulaire par les rapports d'engrènement successifs. Depuis le référentiel lié à l'arbre rapide, le comportement de l'AL ainsi que les engrènements AL-Sat sont respectivement caractérisés par les fréquences cycliques $f_{\theta}^{AL} = \frac{21}{174} \cdot \frac{21}{92} = 9.5 \cdot 10^{-3} \text{ ev} \cdot \text{rev}^{-1}$ et $f_{\theta}^{AL-Sat} = \frac{21}{174} \cdot \frac{21}{92} \cdot 93 = 8.8 \cdot 10^{-1} \text{ ev} \cdot \text{rev}^{-1}$ et leurs harmoniques respectives. La figure 3.2 présente l'observation fréquentielle focalisée sur chacun de ces éléments et met ainsi en exergue les limites d'observation spectrale du signal vitesse angulaire instantanée sous conditions non stationnaires.

3.2.2 Fonction de repérage évènementiel

Pour de multiples raisons, détaillées dans la partie 4.4.1.1, la fréquence d'apparition d'un défaut d'élément roulant n'est pas maîtrisée avec précision. À défaut de formuler la fréquence évènementielle exacte du défaut *a priori*, on suppose connu un intervalle de fréquences évènementielles à l'intérieur duquel le pic du défaut de l'élément roulant apparaîtra. Une méthode est ici présentée pour créer un maillage qui tend vers la Transformée de Fourier Continue (TFC) de la mesure correspondant à cet intervalle fréquentiel. Une fois la TFC correctement estimée sur l'intervalle suspecté, son maximum appartient au spectre que nous qualifions de meilleur représentant du phénomène cyclique surveillé.

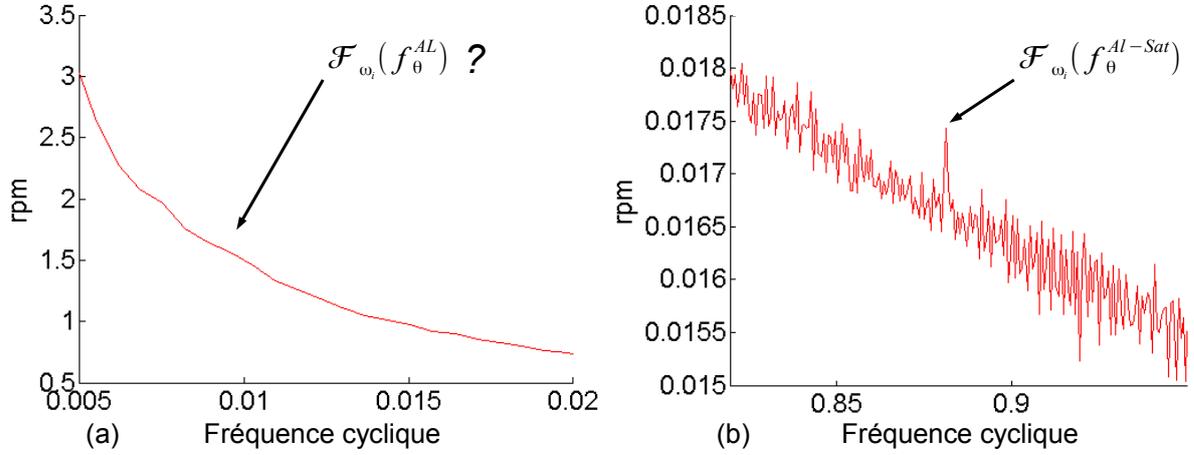


FIG. 3.2: Observation spectrale du signal vitesse instantanée focalisé sur la fréquence cyclique représentative du comportement (a) de l'arbre lent et (b) du train d'engrenage séparant l'arbre lent des satellites.

L'originalité de cette méthode réside dans l'estimation de la TFC, qui diminue le volume de mémoire virtuelle nécessaire aux méthodes conventionnelles. Usuellement, la TFC est estimée par « zero padding », où la Transformée de Fourier Discrète (TFD) est appliquée sur un signal dont la taille est artificiellement multipliée par un rapport correspondant à l'augmentation de résolution fréquentielle¹. Néanmoins, la mémoire vive des ordinateurs actuels limite aussi la taille des échantillons sur lesquels peuvent s'appliquer une TFD. La fonction ici présentée s'appuie sur la détermination de la TFC d'un échantillon pour obtenir la représentation spectrale qui maximise l'observation du phénomène cyclique recherché.

3.2.2.1 Résumé de l'Algorithme

Soit x le vecteur du signal échantillonné angulairement sur N_0 points tel qu'il est délivré par le système d'acquisition. Soit N le nombre de points utilisés pour calculer la TF. On note $\mathcal{F}_{x(1:N)}(k)$ le coefficient spectral correspondant au $k^{\text{ème}}$ canal de ce spectre, avec $k \in [0, N-1]$. Quelque soit la fréquence f_θ , il existe un couple (N, k) tel que

$$f_\theta = \frac{kR}{N}, \quad k \in [0, N-1], N \in [N_0, \infty[\quad (3.1)$$

Dans le cas où nous devons surveiller l'intervalle évènementiel $[f_\theta - \Delta f_\theta; f_\theta + \Delta f_\theta]$, on propose alors de calculer les coefficients spectraux $\mathcal{F}_{X(1:N)}(k)$ qui vérifient les conditions

¹l'augmentation de cette résolution est elle aussi artificielle, dans le sens où elle ne permet pas l'appariation des phénomènes vibratoires jusqu'alors masqués par un phénomène vibratoire prépondérant situé dans le même canal fréquentiel.

suivantes :

$$\mathcal{F}_{x(1:N)}(k) / \begin{cases} N > N_0 & C_1 \\ N < 2 \cdot N_0 & C_2 \\ \frac{k \cdot R}{N} \in [f_\theta - \Delta_{f_\theta}; f_\theta + \Delta_{f_\theta}] & C_3 \end{cases}$$

La première condition assure que la transformée de fourier soit appliquée sur le signal entier. La condition C_2 est une limite arbitraire de précision, réglable, tandis que la condition C_3 définit l'intervalle évènementiel dont les coefficients sont retenus.

Pour appliquer la TF sur $N > N_0$ points, il convient de compléter le signal par des points correspondant à la moyenne empirique de l'échantillon. À vrai dire, le terme « zero padding » est employé par abus de langage, car les valeurs ajoutées au signal ne sont nulles que pour les signaux centrés, ce qui n'est plus le cas dans la mesure de vitesse angulaire instantanée.

Ensuite, le sommet que l'estimation de la TFC atteint sur l'intervalle évènementiel considéré indique le spectre que renvoie l'algorithme. Ce n'est pas la résolution fréquentielle réelle du spectre qui est modifiée, mais la taille de l'échantillon sur lequel est calculée la TFC.

3.2.2.2 Exemple numérique et validation expérimentale.

Sur la figure 3.3 a) est présentée l'évolution angulaire d'un sinus pur de fréquence angulaire 6.54321 évènements par tour. L'acquisition est faite sur 8192 points pour une résolution angulaire de 512 évènements par tour (16 tours d'acquisition). Sur la figure 3.3 b) sont superposés le spectre découlant d'une TFD obtenue sur 8192 points (en vert), le repérage fréquentiel (en bleu) et le spectre découlant d'une TFD obtenue sur un nombre de points indiqué par l'algorithme proposé (en rouge). Le repérage évènementiel apparaît, à travers cet exemple, comme un outil permettant d'étudier la TFC obtenue à partir d'un signal fenêtré car limité en temps. La courbe bleue tend effectivement vers un sinus cardinal (la transformée de fourier continue d'une sinusoïde multipliée par une fenêtre rectangle) dont le maximum correspond à l'amplitude du phénomène oscillatoire.

La figure 3.4 présente la mesure vibratoire de l'éolienne focalisée sur les deux phénomènes d'intérêt. La courbe rouge correspond au spectre fenêtré dont la résolution est optimisée par réduction². La courbe verte correspond à l'estimation de la Transformée de Fourier Continue autour des fréquences des phénomènes d'intérêt. Enfin, la courbe bleue correspond au spectre qui maximise l'amplitude du pic correspondant au phénomène d'intérêt. La légère amélioration qui distingue ces 2 courbes est moins visible que dans l'exemple numérique présenté par la figure 3.3b) en raison de la complexité du signal vibratoire, et de la forme du spectre de Hanning utilisé comme fenêtrage.

²Ces outils sont présentés par la suite. Leur application est nécessaire pour que l'influence du balayage fréquentiel soit perceptible

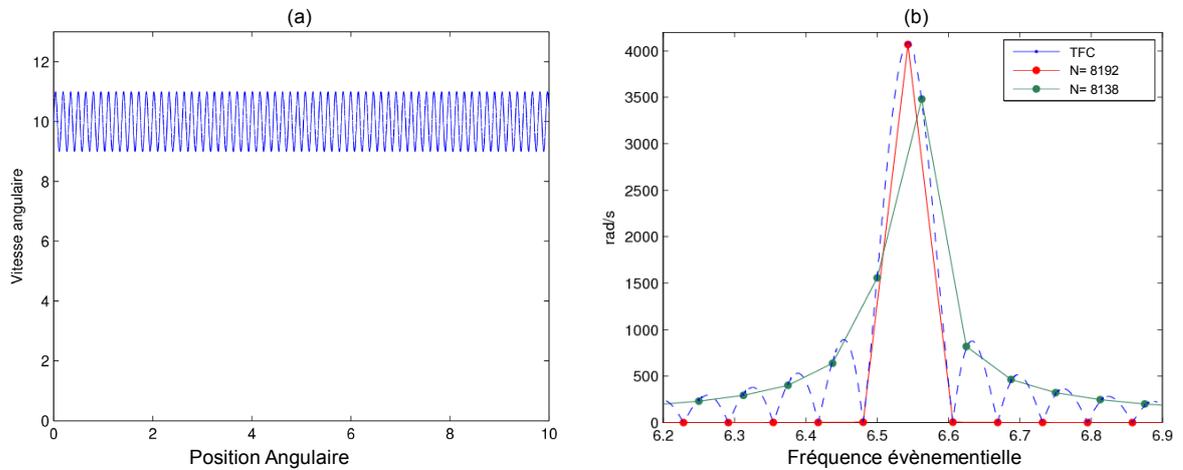


FIG. 3.3: Exemple d'application de la fonction de repérage fréquentiel. a) simulation d'un signal de vitesse instantanée. b) représentation spectrale utilisant différentes tailles d'échantillons.

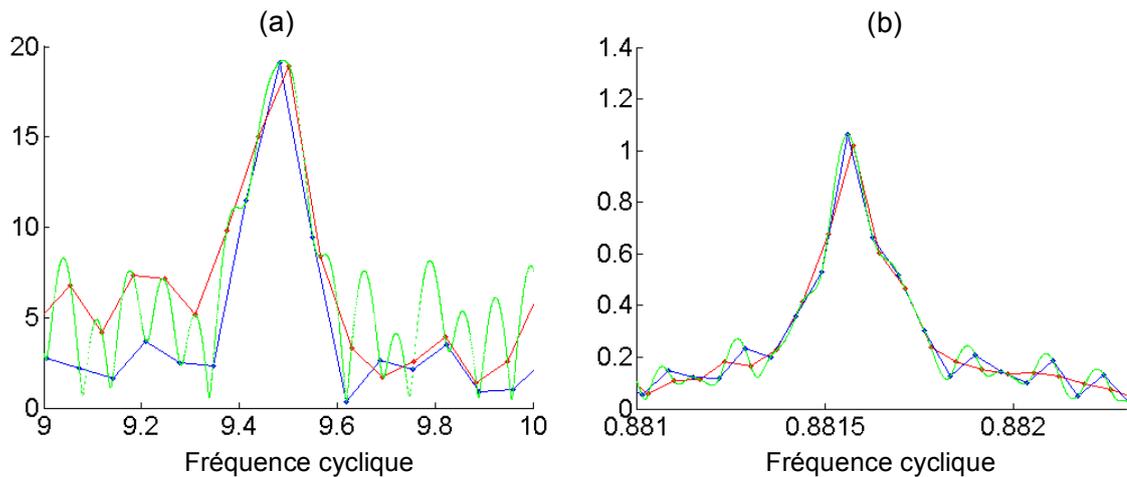


FIG. 3.4: Application du balayage fréquentiel pour augmenter l'amplitude du pic caractéristique (a) de l'arbre lent et (b) du train d'engrenage séparant l'arbre lent des satellites. courbe rouge : TFD originale. courbe verte : estimation de la TFD continue. courbe bleue : TFD optimisée.

3.2.2.3 Discussion

Comparaison avec la localisation fréquentielle instantanée

Il existe d'autres méthodes que celles basées sur le « zero-padding » pour estimer

avec haute précision la fréquence d'un phénomène vibratoire. Liguori et Al. recensent plusieurs qui permettent d'estimer la fréquence exacte d'un défaut malgré le *picket fence effect* en n'appliquant qu'une seule Transformée de Fourier [LIG 04]. Liguori identifie la forme continue induite par la fenêtre d'apodisation pour déterminer la localisation de la fréquence du phénomène vibratoire, et propose une méthode correspondant au cas où deux composantes fréquentielles juxtaposées sont en interférences (quelques canaux fréquentiels les séparent). Néanmoins, si l'algorithme de Liguori permet de retrouver rapidement la localisation fréquentielle exacte d'une composante vibratoire en l'absence de plus d'une perturbation, l'objectif du repérage fréquentiel ici proposé est de se placer dans les meilleures conditions pour observer le pic lié au défaut, et éventuellement amplifié par les conditions non stationnaires ou le bruit environnant. Il est aussi envisageable d'appliquer des indicateurs spectraux directement sur l'estimation haute fréquence de la TF continue.

Comparaison avec le « zoom FFT »

La technique de « zoom FFT », utilisée pour améliorer la résolution d'une mesure effectuée sur N points d'un facteur k en rallongeant le temps d'acquisition, n'est pas comparable à la solution du balayage fréquentiel. Quand la seconde permet de balayer la Transformée de Fourier Continue caractérisant l'échantillon de N points, la première nécessite l'acquisition d'une mesure de $k \cdot N$ points. La technique de « zoom FFT » est inapplicable dans notre cas car la taille de la mesure profite déjà des capacités maximales du système d'acquisition. Le « zoom FFT » est le plus souvent utilisé sur les systèmes où la TF est calculée sur un nombre de lignes beaucoup plus faible que la taille du signal mesurable.

Le jeu vaut-il la chandelle ?

L'inconvénient majeur de la méthode proposée est la répartition non homogène des coefficients de Fourier obtenus. La formulation de la résolution fréquentielle artificielle obtenue à travers cette méthode s'avère complexe, si bien que le paramétrage utilisé dans l'expérience ci-dessous est empirique et devrait être ajustée pour chaque fréquence cyclique sous surveillance. De plus, le calcul des TFD successives prend du temps, et le gain obtenu sur l'estimation de l'amplitude d'une composante fréquentielle est bien maigre. La mise en pratique de cette méthode pour traiter l'ensemble des mesures issues de l'étude expérimentale sur l'éolienne n'est aujourd'hui pas justifiée.

3.2.3 Réduction de résolution

Hormis les roulements et engrènements des trois satellites synchrones, 57 fréquences fondamentales doivent être surveillées par observation sur l'éolienne. Considérant le nombre important de fréquences cycliques que nous comptons surveiller, sans même tenir compte de leurs harmoniques, la dispersion fréquentielle induite par les rapports de transmission du multiplicateur est bienvenue pour faciliter la dissociation des phénomènes cycliques. La figure 3.5 présente la distribution des fréquences cycliques fondamentales

de chaque élément constitutif de la ligne d'arbre quand le capteur angulaire est localisé sur l'arbre rapide.

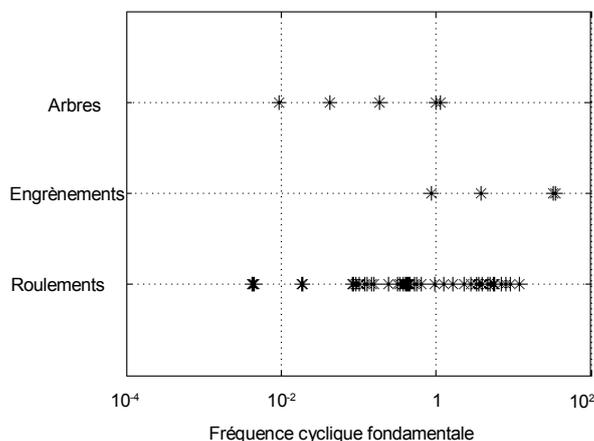


FIG. 3.5: Fréquence cyclique fondamentales des éléments constitutifs de la ligne d'arbre d'une éolienne MM82.

En effet, chaque fréquence cyclique est multipliée par le rapport de transmission qui relie l'arbre porteur du codeur à celui de l'élément considéré. Ainsi, les fréquences cycliques sont réparties le long de l'axe fréquentiel facilitant ainsi, à première vue, la distinction de chaque source potentielle. Néanmoins, de nombreuses fréquences cycliques restent groupées et demandent à l'observation spectrale d'assurer une résolution fréquentielle relativement fine. L'avantage précité se transforme alors en inconvénient, la méthode de mesure devant assurer une résolution fine sur une très large bande fréquentielle.

Au prix d'une installation plus lourde, le problème peut être contourné en utilisant un autre capteur angulaire sur la partie lente du mécanisme. C'est la solution qui fut premièrement envisagée, de peur que les phénomènes induits ne puissent se transmettre au travers des trains d'engrenage successifs. Une autre solution permettant de ne pas utiliser plus d'un capteur angulaire et de réduire artificiellement la résolution d'un capteur situé sur l'arbre le plus rapide. L'observation peut ainsi être remodelée pour les phénomènes cycliques basses fréquences en ignorant un nombre de front montant du capteur angulaire correspondant au facteur de réduction de la résolution initiale de ce dernier.

3.2.3.1 Présentation du dispositif

Ce procédé est illustré sur la figure 3.6 où la résolution du capteur angulaire est réduite par un rapport 4 à titre d'exemple. Techniquement réalisée par un développement particu-

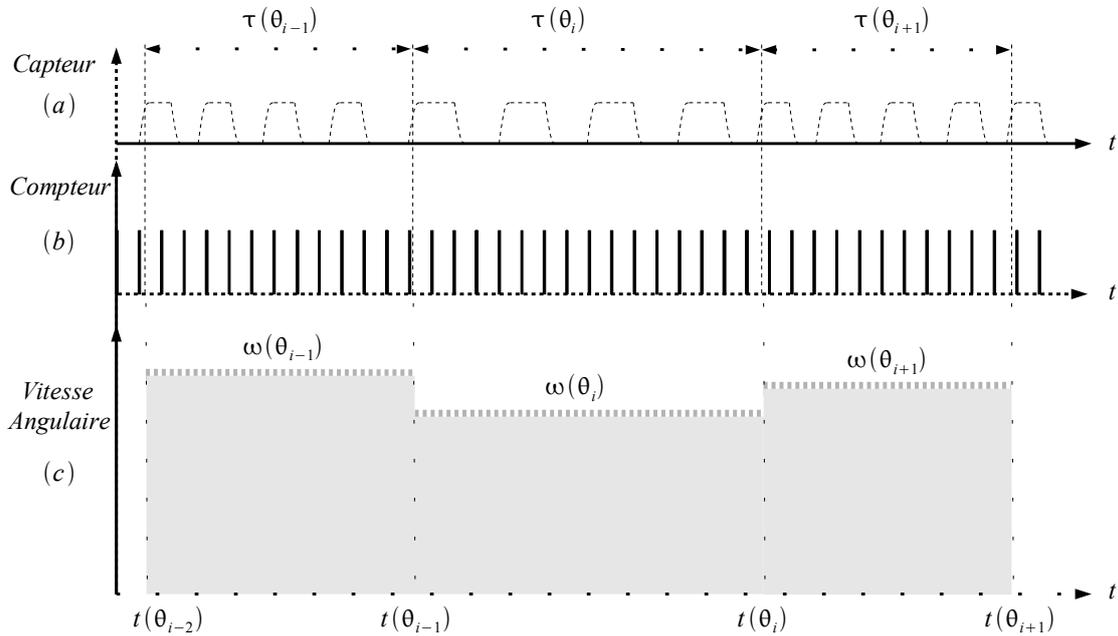


FIG. 3.6: Fréquence cyclique fondamentales des éléments constitutifs de la ligne d'arbre d'une éolienne MM82.

lier sur la carte d'acquisition, le coefficient de réduction de résolution peut prendre toute valeur entière souhaitée par l'utilisateur. Il est à noter qu'un tel algorithme ne protège pas du phénomène de repliement. Si c'est la résolution du codeur qui règle la fréquence de Shannon, la fréquence maximale contenue dans le signal n'est pas maîtrisée par un filtre analogique comme peuvent l'être les signaux vibratoires classiques. En ce sens, la résolution initiale du codeur est choisie suffisamment haute pour espérer dépasser les fréquences maximales contenues dans le signal. Néanmoins, si les fréquences cycliques les plus élevées des phénomènes vibratoires constitutifs du signal sont repérées lors d'une mesure où l'on profite de la résolution maximale du capteur angulaire, on peut prévoir les fréquences où apparaîtront les phénomènes repliés sur les mesures en fonction du coefficient de réduction choisi pour le capteur angulaire. Les notions de repliement seront de nouveau abordées à la fin de ce chapitre, où un outil est proposé pour retrouver la localisation fréquentielle exacte d'un phénomène vibratoire temporel dont la fréquence dépasse celle de Shannon (voir partie 3.5.3).

3.2.3.2 Validation expérimentale

Par extension de la réduction artificielle du nombre de segments que contient le capteur, on parlera d'observation spectrale « réduite » dès que la transformée de Fourier sera appliquée à un signal dont la résolution du capteur est divisée. Se référant à l'exemple

présenté en introduction (voir partie 3.2.1), la figure 3.7 présente conjointement la mesure initiale et la mesure dont la résolution du capteur est réduite par 16. Les observations étant constituées du même nombre de points, la mesure est logiquement 16 fois plus longue une fois exprimée en nombre de tours. En raison des conditions largement non stationnaires auxquelles est soumise l'éolienne, les spectres d'amplitude obtenus à partir de ces deux réalisations n'ont pas de raison d'estimer la même densité spectrale de puissance. La comparaison des observations spectrales doit donc tenir compte de ce point.

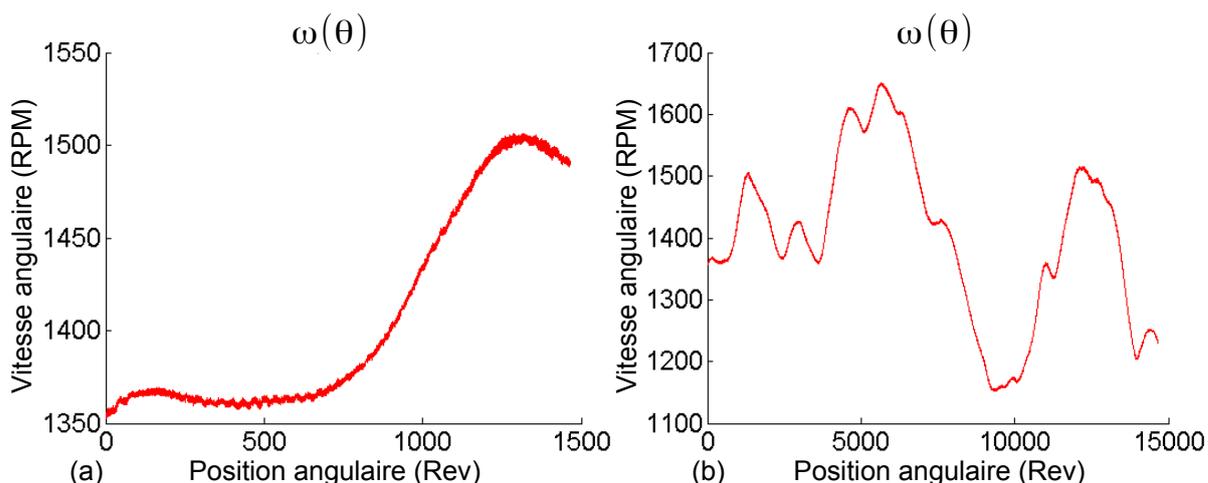


FIG. 3.7: Observation du signal vitesse angulaire instantanée en utilisant la résolution normale de 2048 ppr (à gauche) et en utilisant la résolution réduite de 128 ppr (à droite).

L'observation spectrale réduite est focalisée autour de la fondamentale f_{θ}^{AL} sur le graphe de gauche de la figure 3.8 et sur la fondamentale f_{θ}^{AL-Sat} sur le graphe de droite. Bien que la résolution fréquentielle soit améliorée, le phénomène cyclique basse fréquence (à gauche) n'est toujours pas clairement visible. Ensuite, l'amplitude de la composante fréquentielle f_{θ}^{AL-Sat} apparaît 6 fois plus faible que sur l'observation spectrale initiale présentée sur la figure 3.2. Théoriquement, les spectres d'amplitude de signaux stationnaires doivent présenter des amplitudes similaires quelque soit la résolution spectrale. Cependant, l'observation réduite s'étale sur un plus grand nombre de tours que l'observation originale ; les conditions de fonctionnement globales sont alors susceptibles de différer entre ces deux mesures. Ce résultat souligne la forte non stationnarité des signaux mesurés sur l'éolienne, et la difficulté associée à l'analyse du spectre d'amplitude sous ces conditions. Dans la partie 4.5, une méthode de normalisation est développée pour réduire la portée de cette difficulté qui perturbe aussi bien l'analyse du signal vitesse que celle du signal vibratoire. Dans la partie suivante, la perturbation large bande est étudiée plus en détail à travers l'influence de la variation de vitesse angulaire instantanée.

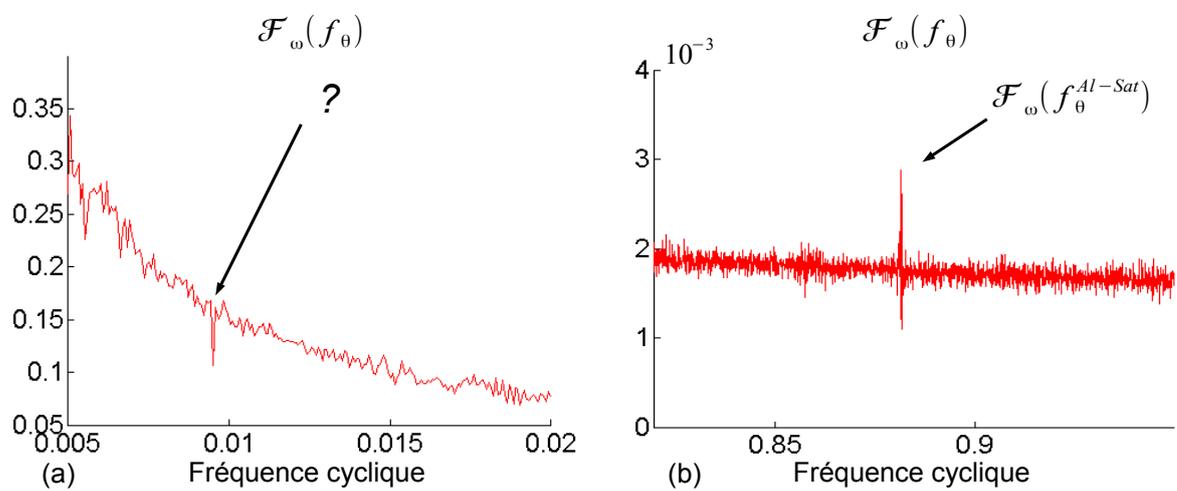


FIG. 3.8: Observation spectrale **réduite** du signal vitesse angulaire instantanée focalisé sur la fréquence cyclique représentative du comportement (a) de l'arbre lent et (b) du train d'engrenages séparant l'arbre lent des satellites.

3.3 Traitement de la tendance macroscopique

Subies à plusieurs reprises dans ce mémoire, les conditions non-stationnaires sont un frein majeur à la surveillance d'une éolienne en général, et en particulier quand elle est effectuée par un suivi de la vitesse angulaire instantanée. En effet, la variation macroscopique de la vitesse fait apparaître une perturbation large bande sur l'observation fréquentielle de vitesse angulaire instantanée, qui est expliquée dans une première partie dans le cas le plus simple d'une variation de vitesse linéaire. Cette interprétation phénoménologique a directement mené à la création d'un premier outil de correction basé sur la régression linéaire de la vitesse angulaire instantanée. Cet outil simple et intuitif, présentant cependant des défauts majeurs, a été amélioré sous deux formes distinctes. Le second paragraphe présente ainsi l'analyse de l'accélération instantanée tandis que le troisième paragraphe présente une adaptation originale des techniques de fenêtrage. Ces deux dernières méthodes, présentant elles aussi leurs inconvénients respectifs, se montrent néanmoins complémentaires.

3.3.1 Présentation de la perturbation

3.3.1.1 Modèle phénoménologique.

Rares sont les conditions où une éolienne peut être considérée comme évoluant en régime stationnaire. Plusieurs courbes l'ont déjà attesté au long de ce mémoire, les variations macroscopiques de vitesse de rotation introduisent des perturbations dans l'observation spectrale de vitesse angulaire instantanée. Ces variations macroscopiques peuvent être assimilées aux réponses que présentent le système électromécanique aux excitations stochastiques induites par le vent. L'inertie très élevée du moyeu principal fait de l'éolienne un filtre passe-bas favorisant la tendance basse fréquence imposée par le vent, menant à des signaux vitesse dont la variation macroscopique est aussi lente qu'innévitabile. En supposant que la tendance du signal de vitesse angulaire instantanée soit linéaire pendant la durée de l'observation, telle que :

$$\omega(\theta) = \omega_0 + a \cdot \theta + \sum_i (\Omega_i \cos(2\pi f_{\theta,i} \cdot \theta + \phi_i)) \quad (3.2)$$

où ω_0 est la vitesse de rotation en début d'observation, Ω_i représente l'amplitude du phénomène cyclique de fréquence $f_{\theta,i}$ et de phase ϕ_i , a est la pente suivie par la tendance macroscopique de la vitesse. Par linéarité de la transformée de Fourier, la transformée de la tendance est ajoutée à la transformée du phénomène cyclique surveillé. La transformée de Fourier induite par les variations macroscopiques de vitesse prend alors la forme :

$$\mathcal{F}_{\omega(\theta)}(f_\theta) = \frac{a}{4\pi^2 f_\theta^2} + i \cdot \frac{\omega_0}{2\pi f_\theta} \quad (3.3)$$

dont le module peut être simplifié à ses bornes par des équations plus simples :

$$|\mathcal{F}_{\omega(\theta)}(f_\theta)| = \frac{\sqrt{4\pi^2 \omega_0^2 f_\theta^2 + a^2}}{4\pi^2 f_\theta^2} \Rightarrow \begin{cases} |\mathcal{F}_{\omega(\theta)}(f_\theta)| & \underset{f_\theta \rightarrow 0^+}{\sim} & \frac{a}{4\pi^2 f_\theta^2} \\ |\mathcal{F}_{\omega(\theta)}(f_\theta)| & \underset{f_\theta \rightarrow +\infty}{\sim} & \frac{\omega_0}{2\pi f_\theta} \end{cases} \quad (3.4)$$

Par l'équation précédente, on montre que la tendance macroscopique suivie par la vitesse de rotation apporte une perturbation large bande sur l'observation fréquentielle de la vitesse angulaire instantanée dont l'amplitude décroît en $(1/f_\theta)^2$ pour les fréquences faibles, et décroît en $(1/f_\theta)$ pour les fréquences élevées (en considérant que la vitesse initiale ω_0 est non nulle). La perturbation, particulièrement gênante dans les fréquences cycliques faibles, voit son influence varier proportionnellement à la pente de la tendance suivie par la vitesse. La figure 3.1 est typiquement représentative de cette perturbation sur une mesure où la vitesse ne varie pourtant que de 10%.

3.3.1.2 Régression linéaire de la vitesse de rotation.

Supposant que la mesure soit assez courte pour que la tendance prise par la variation de vitesse soit considérée comme linéaire, il devient alors envisageable de retirer $\omega_d(\theta)$, la composante linéaire de la vitesse de rotation. La tendance est ici obtenue de la vitesse de rotation, telle qu'elle est exprimée dans l'équation 3.2, par une régression linéaire selon la méthode des moindres carrés dont le calcul est détaillé en annexe C.1 :

$$\omega_r(\theta) = \omega(\theta) - \omega_d(\theta) + \mu_{[1:N]}^{(1)}(\omega) \quad (3.5)$$

où $\mu_{[1:N]}^{(1)}(\omega)$ est la vitesse angulaire moyenne estimée à partir des N points. Cependant, la durée d'observation pendant laquelle la variation de vitesse peut être considérée constante est bien souvent inférieure à la longueur d'une mesure, particulièrement dans le cas des mesures "réduites" (cf Figure 3.7). Pour respecter ce critère restrictif, une mesure peut être scindée en plusieurs morceaux sur lesquels la régression est appliquée séparément. Néanmoins, la vitesse moyenne rajoutée à chaque morceau doit être calculée sur l'ensemble du signal. Si bien que pour une mesure sur N points, découpée en M morceaux consécutifs, la correction appliquée au signal vitesse prend la forme :

$$\omega_r(\theta) = \omega(\theta) - \left(\sum_{k=1}^M \omega_{d,k}(\theta) \right) + \mu_{[1:N]}^{(1)}(\omega) \quad (3.6)$$

3.3.1.3 In-validation expérimentale !

Cette procédure, logiquement qualifiée de « régression linéaire par morceau », est appliquée sur le signal réduit présenté dans la partie précédente. L'objectif de cette démonstration expérimentale étant de souligner la difficulté de manipulation de cet outil vis à vis de son paramétrage, la figure 3.9 présente l'évolution du signal angulaire régressé dans l'espace, obtenue pour 3 paramétrages différents. De gauche à droite sur la figure 3.9, le signal est respectivement découpé en morceaux de 400, 100 et 30 révolutions avant application de la régression. Si le signal régressé sur 400 révolutions apparaît comme clairement découpé, on imagine que la discontinuité est aussi flagrante pour les 2 autres paramétrages. Cette discontinuité étant strictement périodique en angle, elle induit une perturbation de même type que l'erreur de quantification simple (voir partie 2.3.1.1). On a montré dans cette partie que certaines composantes fréquentielles induites par ce type

de perturbation seront réparties sur les harmoniques successives de la fréquence cyclique correspondant à la taille d'un morceau.

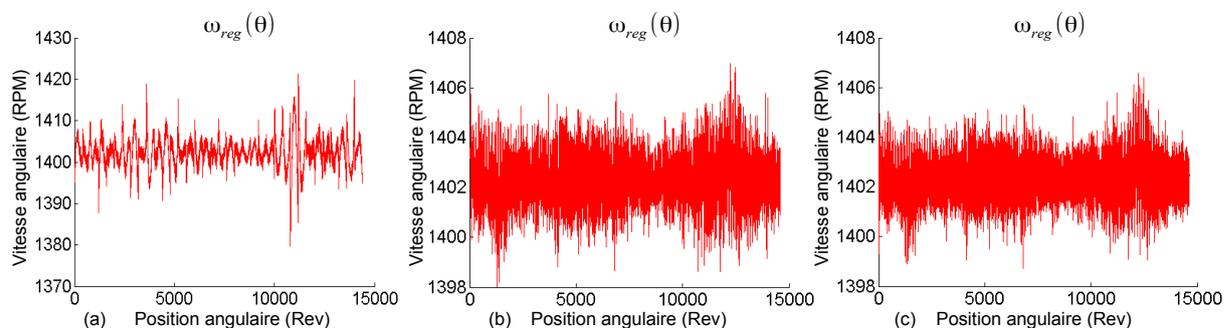


FIG. 3.9: Observation de la vitesse angulaire instantanée corrigée selon une régression linéaire par morceaux pour différentes tailles de morceaux : (a) 400, (b) 100 et (c) 30 révolutions.

Le spectre d'amplitude obtenu à partir de chaque observation régressée est présenté sur la figure 3.10. Seul le spectre correspondant à l'observation régressée du signal découpé par morceaux de 400 révolutions voit l'ensemble des fréquences cycliques multiples de 1/400 événements par tour perturber l'observation spectrale. Les observations spectrales découpées par morceaux de 30 et de 100 révolutions présentent des perturbations cycliques prépondérantes dont la périodicité n'est pas expliquée. Les perturbations large bande sont donc remplacées par des perturbations à bande étroite dont la localisation n'est pas prévisible *a priori*.

En outre, cet outil peut être interprété comme un filtre passe haut dont la fréquence de coupure dépendrait directement de la taille du morceau. Le compromis nécessaire entre la taille maximale qu'il faut imposer sur la longueur du morceau pour atténuer l'effet de la variation non linéaire de vitesse et la taille minimale ne filtrant pas la fréquence f_{θ}^{AL} n'est pas atteignable pour l'exemple ici présenté.

Une telle solution se dirige finalement à l'encontre des objectifs recherchés. Le spectre est toujours perturbé (bien que différemment) et les phénomènes basses fréquences sont masqués.

3.3.2 Analyse de l'accélération angulaire instantanée

En automatisme, l'opérateur dérivée est couramment utilisé pour retirer la composante continue d'un signal électrique. Dériver un signal réel revient à multiplier ses composantes spectrales par leurs pulsations respectives, valorisant de ce fait le bruit haute fréquence. Cette approche introduit donc aussi un effet de passe haut et permet de stationnariser la tendance du signal en évitant l'introduction de perturbation en bande étroite. Le signal « accélération » instantanée peut être défini sous deux formes distinctes.

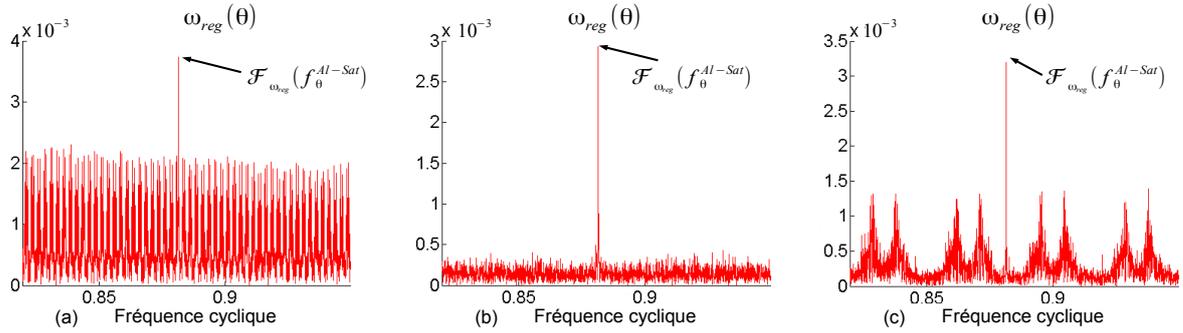


FIG. 3.10: Observation spectrale de la vitesse angulaire instantanée corrigée selon une régression linéaire par morceaux pour différentes tailles de morceau : (a) 400, (b) 100 et (c) 30 révolutions.

3.3.2.1 Différence finie du signal Écart Temporel

Dans un premier mode de réalisation, illustré par l'équation 3.7, le signal « accélération » instantanée est imagé par la différence finie du signal Écart Temporel. Bénéficiant d'une mise en place triviale, cette différenciation vient s'ajouter à celle déjà effectuée à l'acquisition du signal écart temporel, comme nous l'avons vu dans la partie 2.3.1. L'analogie avec l'obtention du signal Écart Temporel nous apporte quelques informations quand à l'analyse du signal noté $\Delta\tau$ et défini tel que,

$$\Delta\tau(n) = \tau(n) - \tau(n-1). \quad (3.7)$$

Tout d'abord, la variation du signal écart temporel par rapport à la position angulaire ne mènera pas à l'accélération angulaire. L'étude se borne donc à travailler sur le signal $\Delta\tau$, gradué en seconde. Néanmoins, une approche similaire à celle menée dans la partie 2.2.3.1 peut amener à graduer les variations de ce signal en unité homogène à une vitesse angulaire, facilitant ainsi l'interprétation de l'observation.

Ensuite, on peut déduire l'effet de cette différence finie sur l'observation spectrale globale. En effet, l'équation 2.31 permet de déduire :

$$\mathcal{D}_{\Delta\tau\Delta\tau}(f_\theta) = 4 \cdot \mathcal{D}_{\tau\tau}(f_\theta) \cdot \sin\left(\frac{f_\theta\pi}{R}\right)^2 \quad (3.8)$$

L'observation spectrale des signaux ainsi pré-traités est présentée sur la figure 3.11 où le processus est appliqué au signal initial (graphe a) ainsi qu'au signal réduit (graphe b). Sur le graphe (a), la différenciation seule n'apparaît pas suffisante pour révéler le phénomène représentatif du comportement de l'arbre lent, bien que la perturbation large bande induite par la variation macroscopique de vitesse soit largement réduite. En revanche, les résultats obtenus sur les graphes (b) et (c) en combinant les techniques de différenciation et de réduction de résolution révèlent les deux phénomènes cycliques liés à l'arbre lent sans introduire d'artefacts supplémentaires ni filtrer les fréquences basses.

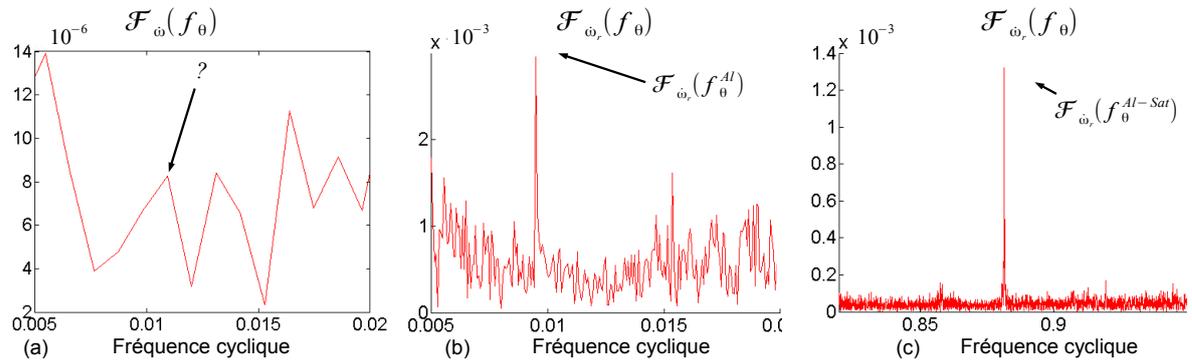


FIG. 3.11: Observation spectrale (a) du signal initial et (b) (c) du signal réduit après différence finie, focalisés sur les phénomènes cycliques d'intérêt. (réduction par 16)

3.3.2.2 Accélération angulaire

Dans un second mode de réalisation, l'accélération angulaire instantanée peut être rigoureusement obtenue depuis une double dérivation temporelle. En effet, la fonction Angle/Temps, notée $\varphi : t \rightarrow \theta$ et définie dans l'annexe B.1.1, délivre la position angulaire du mécanisme en fonction du temps. Cette fonction, obtenue par interpolation spline sur le signal Écart Temporel (voir partie 1.3.1.2), voit sa dérivée seconde correspondre à l'accélération angulaire du système. Intrinsèquement échantillonné en temps, ce signal doit ensuite être de nouveau traduit par la réciproque de la fonction Angle/Temps dans le domaine angulaire. Ce processus, plus complexe que le précédent, est schématisé par le diagramme 3.12.

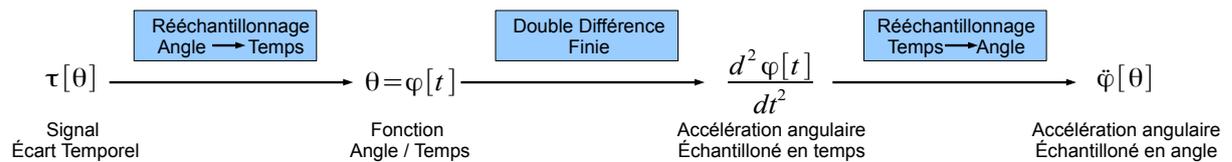


FIG. 3.12: Schématisation du processus d'obtention de l'accélération angulaire, échantillonnée en angle, à partir du signal Ecart Temporel.

Sur la figure 3.13, ce processus est appliqué au signal initial réduit. De nouveau, les résultats obtenus sur les graphes (a) et (b) en combinant les techniques de différentiation et de réduction de résolution révèlent les deux phénomènes cycliques liés à l'arbre lent sans introduire d'artefacts supplémentaires ni filtrer les fréquences basses. Chaque étape de rééchantillonnage introduit un bruit de calcul tout en alourdissant la méthode de surveillance. Néanmoins, l'étape où le signal est échantillonné en temps peut être mise à profit pour travailler sur les phénomènes temporels. Cette particularité sera détaillée dans la partie 3.4.2.

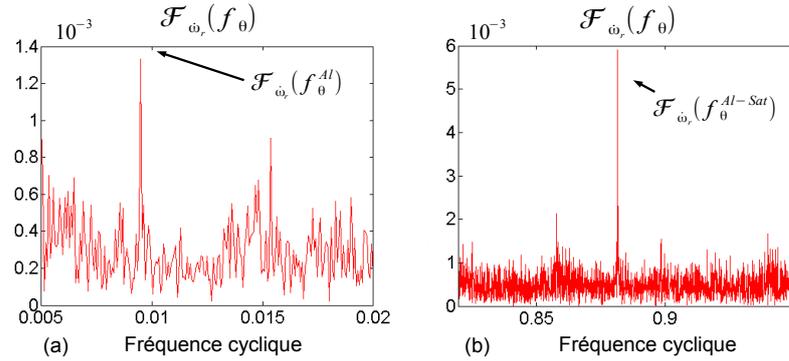


FIG. 3.13: Observation spectrale du signal réduit après double rééchantillonnage, focalisés sur les phénomènes cycliques d'intérêt. (réduction par 16)

3.3.3 Adaptation des techniques de fenêtrage

Ce dernier paragraphe présente un outil qui tire originalement parti des techniques de fenêtrage pour permettre de travailler directement sur le spectre du signal Écart Temporel sans défavoriser les composantes basses fréquences. Traditionnellement, le fenêtrage est employé dès que l'on s'intéresse à une portion finie d'une réalisation à priori infinie. Dès qu'un tel signal, qu'il soit discret ou non, est observé sur une durée ou une longueur finie, on considère que l'observation est le produit d'une réalisation de durée (ou de longueur) infinie intrinsèquement multipliée par une fenêtre d'apodisation rectangulaire. Dans le domaine discret, l'observation tronquée est définie telle que

$$\omega_w[j] = \omega[j] \cdot w[j] \quad \text{avec} \quad w[j] = \begin{cases} 1 & \forall j \in [1, N] \\ 0 & \forall j \in]N, \infty[\end{cases} \quad (3.9)$$

où N correspond à la longueur du signal et j à l'indice entier correspondant à chaque échantillon angulaire. La Transformée de Fourier du signal représentatif de la vitesse angulaire instantanée verra son $k^{\text{ème}}$ canal simplement défini tel que :

$$\mathcal{F}_{\omega_w}[k] = \sum_{j=0}^n \omega[j] \cdot w[j] \cdot e^{-2i\pi \frac{jk}{n}} \quad (3.10)$$

Cette fenêtre d'apodisation prend un tronçon du signal sans le modifier, provoquant ainsi différentes perturbations sur l'observation spectrale. Tout d'abord, le caractère discret de la TF introduit une détérioration des composantes fréquentielles dont la période ne coïncident pas avec la taille de la fenêtre. Ce phénomène, communément appelé « spectral leakage », motive l'utilisation de fenêtres évoluées dans le cas classique de signaux stationnaires mesurés sur une période finie. C'est cependant une autre caractéristique de la fenêtre, cette fois généralisable aux signaux continus, qui invite à faire évoluer le fenêtrage dans le cas particulier de la vitesse de rotation.

Dans l'équation 3.10, l'exponentielle complexe périodise l'échantillon ainsi extrait et génère une discontinuité dont le caractère périodique induit une perturbation sur les multiples de la résolution fréquentielle et touche ainsi l'ensemble des canaux fréquentiels. Cette perturbation pouvant être interprétée comme une composante large bande perturbant l'ensemble du spectre, le fenêtrage est ici étudié dans l'optique de traiter la variation macroscopique de vitesse sans faire apparaître d'artefacts fréquentiels ou de filtre passe haut. La fenêtre de Hanning, définie dans l'équation 3.11 est un exemple de fenêtre typique dont l'effet sur la perturbation large bande peut être montré théoriquement.

$$w[j] = \begin{cases} 0.5 - 0.5 \cos\left(2\pi\frac{j}{n}\right) & \forall j \in [1, n] \\ 0 & \forall j \in]n, \infty[\end{cases} \quad (3.11)$$

La transformée de Fourier d'un signal fenêtré devient :

$$\mathcal{F}_{\omega_w}[k] = \frac{1}{2}\mathcal{F}_{\omega}[k] - \frac{1}{4}\sum_{j=1}^n \omega[j] \cdot e^{-i2\pi\frac{j(k-1)}{n}} - \frac{1}{4}\sum_{j=1}^n \omega[j] \cdot e^{-i2\pi\frac{j(k+1)}{n}} \quad (3.12)$$

On utilise la propriété de translation de la transformée de Fourier :

$$\mathcal{F}_{\omega_w}[k] = \frac{1}{4}(2\mathcal{F}_{\omega}[k] - \mathcal{F}_{\omega}[k-1] - \mathcal{F}_{\omega}[k+1]) \quad (3.13)$$

L'équation 3.13 souligne la convolution en différences finies appliquée sur les composantes spectrales du signal. À l'appui de l'équation 3.4, on peut considérer l'évolution d'une perturbation large bande comme linéaire sur 3 canaux fréquentiels consécutifs. Par conséquent, la perturbation fréquentielle peut être efficacement retirée de l'observation spectrale par application d'une fenêtre de type Hanning. Inversement, un phénomène cyclique préserve son lien cinématique avec l'arbre porteur du capteur angulaire ; son énergie reste concentrée sur un seul canal fréquentiel et n'est donc pas altérée par un fenêtrage sinusoïdal.

Dans le cas particulier du signal représentatif de la vitesse angulaire instantanée du mécanisme, le fenêtrage doit être appliqué sur des réalisations dont la moyenne empirique $\mu_{\omega}^{(1)}$ est préalablement retirée. Le fenêtrage conventionnel, porté par l'équation 3.9 est adapté pour les signaux représentatifs de la vitesse angulaire instantanée dans l'équation suivante :

$$\omega_w(\theta) = (\omega(\theta) - \mu_{\omega}^{(1)}) \cdot w(\theta) + \mu_{\omega}^{(1)} \quad (3.14)$$

Sur la figure 3.14, un fenêtrage de type Hanning est appliqué au signal initial (graphe a) ainsi qu'au signal réduit (graphe b) respectivement présentés en introduction et dans la partie 3.2.3. L'observation spectrale des signaux ainsi prétraités est présentée sur la figure 3.15. Sur le graphe (a), le fenêtrage seul n'apparaît pas suffisant pour révéler le phénomène représentatif du comportement de l'arbre lent, bien que la perturbation large bande induite par la variation macroscopique de vitesse soit largement réduite. En revanche, les résultats obtenus sur les graphes (b) et (c) en combinant les techniques de

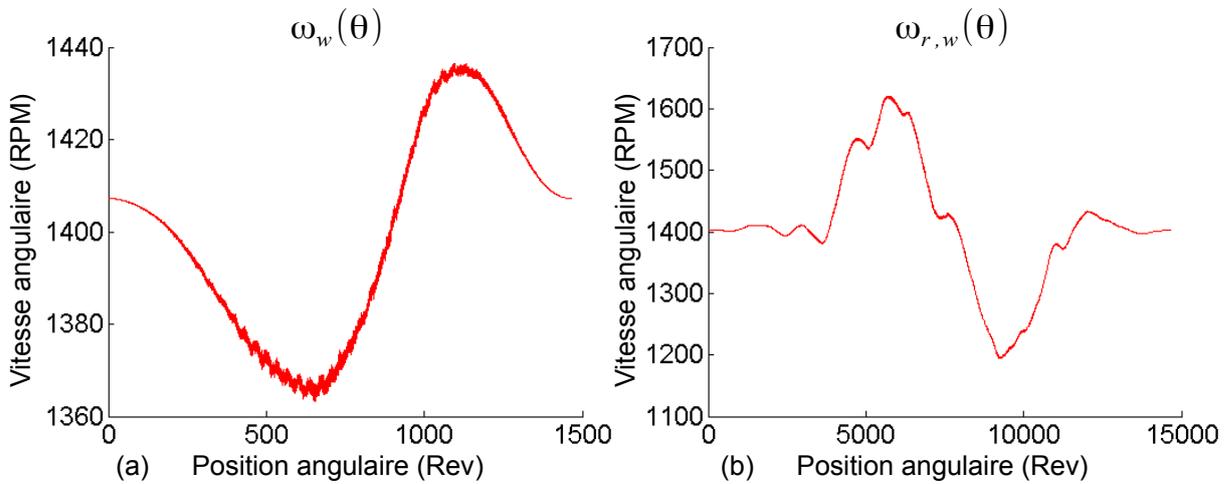


FIG. 3.14: Pondération par une fenêtre d'apodisation de Hanning (a) du signal initial et (b) du signal réduit.

fenêtrage et de réduction de résolution révèlent les deux phénomènes cycliques liés à l'arbre lent sans introduire d'artefacts supplémentaires ni filtrer les fréquences basses.

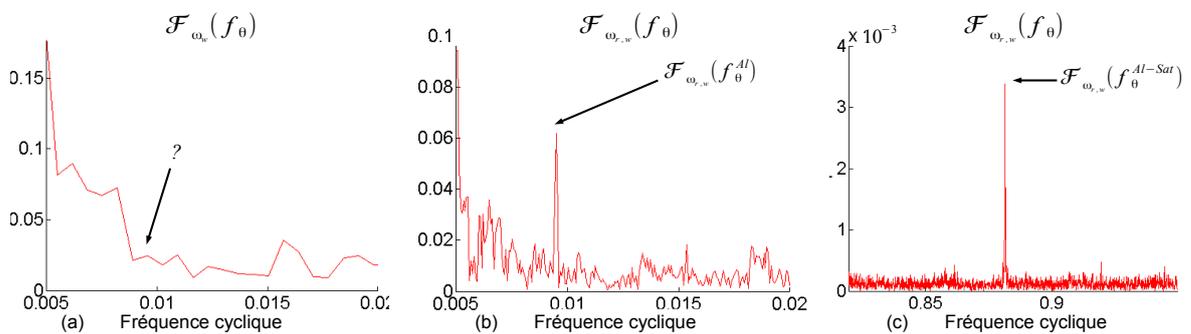


FIG. 3.15: Observation spectrale (a) du signal initial et (b) (c) du signal réduit après application du fenêtrage, focalisés sur les phénomènes cycliques d'intérêt. (réduction par 16)

3.3.4 Bilan

Finalement, trois méthodes proposées dans cette partie s'avèrent efficaces. L'analyse de la vitesse instantanée fenêtrée ainsi que celle de l'accélération obtenue par différence finie du signal Écart Temporel permettent l'analyse spectrale du signal émis par le capteur. La méthode de fenêtrage est favorisée par la suite car ne rajoute pas de filtre passe haut d'une part, et corrige intrinsèquement l'effet induit par le « picket fence

effect » d'autre part.

Néanmoins, l'analyse de l'accélération obtenue par double rééchantillonnage sera utilisée pour mener à bien l'analyse de l'enveloppe spectrale abordée dans la partie 3.4.2. L'analyse d'enveloppe nécessite que la tendance soit constante au cours du temps, caractéristique dont ne bénéficierait pas l'observation rééchantillonnée de vitesse instantanée, même fenêtrée.

3.4 Adaptation des outils de traitement vibratoire

La première barrière à l'analyse de vitesse angulaire instantanée est levée dans la section précédente. Il est désormais possible d'adapter de nombreux outils de traitement du signal développés pour les signaux vibratoires sur les signaux représentatifs de la vitesse instantanée. Néanmoins, l'objet de cette partie n'est pas de lister les outils qui peuvent être adaptés à la surveillance de vitesse de manière exhaustive. L'attention du lecteur est attirée sur les outils susceptibles de créer des indicateurs de surveillance. En ce sens, les techniques détaillées permettent de répondre à des caractéristiques essentielles qu'une observation spectrale simple ne peut atteindre, à savoir :

1. l'estimation précise du pied de spectre/des phénomènes cycliques dont la fréquence varie en fonction des caractéristiques non stationnaires du mécanisme (3.4.1),
2. l'estimation de l'amplitude d'un phénomène vibratoire exciteur en s'appuyant sur les fréquences naturelles du système mécanique sollicité (3.4.2),
3. le repérage et la maîtrise des conditions de fonctionnement inadaptées à l'évaluation d'indicateurs (3.5),
4. la distinction des phénomènes vibratoires temporels / cycliques (3.5).

Ces caractéristiques seront justifiées plus en détail dans le chapitre 4 lié aux études expérimentales des différents phénomènes mécaniques.

3.4.1 Vers un meilleur estimateur de la DSP

La caractérisation du pied de spectre passe par l'estimation de la densité spectrale de puissance du signal représentatif de vitesse. Le périodogramme est une méthode simple d'estimation de la densité spectrale de puissance d'un signal échantillonné. Cet estimateur présente des défauts (biais, variance) qui gênent particulièrement l'estimation du pied de spectre. Il est possible de réduire la variance en moyennant plusieurs périodogrammes de différents échantillons du même signal.

La méthode de Welch, introduite en 1967, est toujours reconnue pour être un très bon réducteur de biais. Le cœur de la méthode réside dans le moyennage de plusieurs périodogrammes respectivement obtenus par multiplication temporelle entre le signal et une succession de fenêtres glissantes [WEL 67]. La densité spectrale ainsi estimée voit son pied de spectre bien mieux caractérisé au détriment d'une perte de résolution spectrale. La méthode de Welch, initialement définie pour les signaux stationnaires dont la moyenne empirique est nulle, s'applique au signal représentatif de la vitesse angulaire instantanée de la manière suivante. À partir de la séquence $\omega(j)$, $j = 0, \dots, N - 1$, représentative de la vitesse angulaire instantanée dont la vitesse macroscopique est variable, les séquences $\omega_i(j)$ de longueur L , éventuellement chevauchées, voient leurs premiers points distants de D segments angulaires. Alors, si l'on suppose que la séquence globale est décomposable en K segments, on a

$$\forall k \in [1, K], \omega_k(j) = \omega(j + (k - 1) \cdot D), j = 0, \dots, L - 1 \quad (3.15)$$

Pour chaque segment, on applique le fenêtrage $w(j), j = 0, \dots, L - 1$ défini à partir de l'équation 3.14 en rééquilibrant les signaux par rapport à la moyenne empirique globale pour respecter le calcul de vitesse moyenne présentée dans la partie §.2.2.3.1,

$$\omega_{w,k}(j) = (\omega_k(j) - \mu_{\omega_k}^{(1)}) \cdot w(j) + \mu_{\omega}^{(1)} \quad (3.16)$$

Ces signaux fenêtrés ne présenteront plus les défauts induits par la non stationnarité de la vitesse macroscopique et permettent d'obtenir K périodogrammes tel que,

$$\mathcal{I}_{\omega_{w,k}}(f_{\theta}) = \frac{L}{\sum_{j=0}^{L-1} (w_j^2)} |\mathcal{F}_{\omega_{w,k}}(f_{\theta})|^2, \quad k = 1, \dots, K \quad (3.17)$$

Enfin, l'estimation de la Densité Spectrale du signal ω complet est obtenue :

$$\mathcal{D}_{\omega_{w,L}}(f_{\theta}) \sim \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathcal{I}_{\omega_{w,k}}(f_{\theta}) \quad (3.18)$$

Comme avec le périodogramme classique, il est possible de retrouver une estimation homogène au spectre d'amplitude préalablement obtenu sur le signal complet :

$$\frac{1}{\sum_{j=0}^{L-1} w_j} |\mathcal{F}_{\omega_{w,L}}(f_{\theta})| \sim \frac{1}{\sum_{j=0}^{L-1} (w_j)} \cdot \sqrt{\sum_{j=0}^{L-1} (w_j^2)} \cdot \hat{\mathcal{D}}_{\omega_{w,L}}(f_{\theta}) \quad (3.19)$$

La figure 3.16 superpose les spectres d'amplitude obtenus par la méthode initiale d'une part, et par la méthode de Welch adaptée à la vitesse instantannée d'autre part. Le pied de spectre est effectivement bien plus facile à estimer sur le périodogramme lissé. Néanmoins, la perte de résolution spectrale moyenne aussi les phénomènes cycliques localisés avec le bruit environnant et il devient plus délicat de les révéler.

Le périodogramme moyenné sera par la suite appliqué au signal de vitesse instantannée dans deux cas. Tout d'abord, étant bien meilleur estimateur de la densité spectrale de puissance que le module du spectre, la caractérisation d'un niveau de bruit de mesure ou de l'amortissement d'une résonance structurelle affectant le signal de vitesse sera particulièrement mis en exergue par cet outil. Ensuite, sous des conditions de fonctionnement particulières, le comportement non-linéaire du mécanisme peut faire varier la cinématique de manière à modifier les fréquences cycliques au long de la mesure. Alors, cette méthode peut se révéler utile pour estimer l'énergie contenue dans une bande fréquentielle où varie de manière imprévisible la fréquence cyclique.

3.4.2 Enveloppe Spectrale et approche cyclo-non stationnaire

Déjà abordé dans la partie 1.2.2, l'enveloppe spectrale est un outil de traitement très apprécié par la communauté scientifique qui permet d'analyser les modulations des

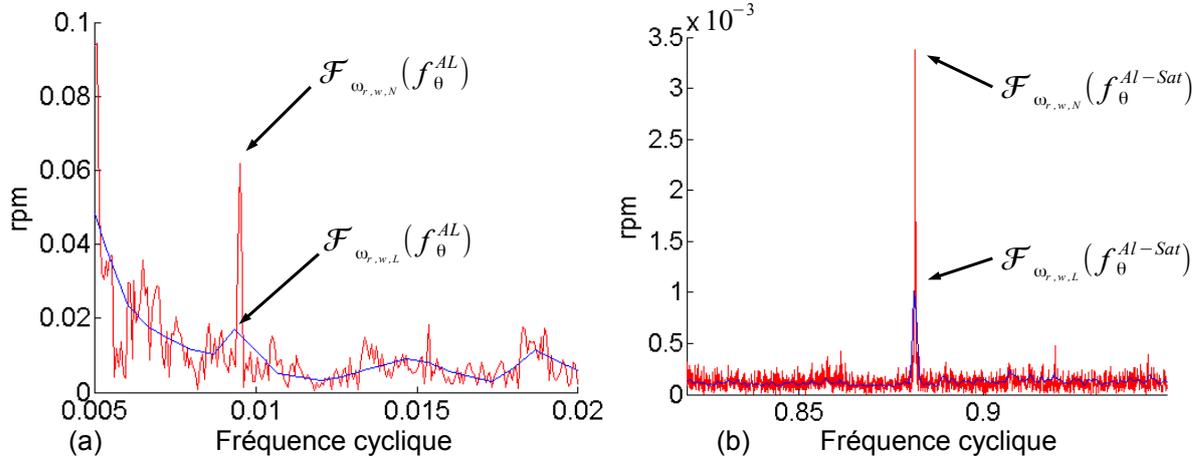


FIG. 3.16: Superposition du périodogramme classique (en rouge) et du périodogramme lissé (en bleu) de type welsh focalisés sur les phénomènes cycliques d'intérêt.

oscillations hautes fréquences sur les excitations basses fréquences liées aux défauts recherchés. Le spectre d'enveloppe est l'analyse fréquentielle de la fonction enveloppe qui, une fois élevée au carré, met en valeurs les phénomènes mécanique cyclostationnaires d'ordre 2 (voir l'annexe A.2.2). Le repérage empirique de la bande fréquentielle d'intérêt est facilitée par l'évaluation du Kurtosis de chaque fonction enveloppe. Ces définitions sont similaires à celles définies dans l'analyse du spectre de puissance cyclique, détaillée et illustrée par Antoni ([ANT 07b] [ANT 09b]).

On s'intéresse ici aux précautions à prendre pour appliquer cette méthodologie aux signaux de vitesse instantanée d'une part, sous conditions non stationnaires d'autres part.

3.4.2.1 Conditions sur l'échantillonnage temporel

La formulation du spectre de modulation cyclique, présenté en annexe A.2.2, montre que les fréquences cycliques sont considérées homogènes aux fréquences temporelles. En effet, sous des conditions de fonctionnement relativement stable, la fréquence de résonance qui filtre l'excitation cyclique peut être exprimée par une constante graduée en évènement par tour plutôt qu'en hertz. À ce titre, il est suggéré d'échantillonner les signaux dans le domaine angulaire (directement ou à posteriori) à l'aide d'une référence en phase pour améliorer le diagnostic de machines tournantes [ANT 09a]. Néanmoins, dans le cas où les variations macroscopiques de vitesse sont trop importantes, les fréquences naturelles des systèmes mécaniques doivent être démodulées dans le domaine temporel tandis que les fréquences d'apparitions des défaut doivent être révélées dans le domaine angulaire.

Récemment, D'Elia a proposé une adaptation directe du formalisme cyclo-stationnaire

aux signaux « cyclo-non stationnaires » [D'E 10] en tenant compte de ce phénomène. L'acquisition temporelle d'un signal vibratoire fut filtré dans le domaine temporel, puis rééchantillonnée en angle pour être projetée dans le domaine spectral cyclique. La mesure de vitesse instantanée par Écart Temporel, étant intrinsèquement séquencée dans le domaine angulaire, nécessite deux étapes de rééchantillonnage. La méthode proposée dans la partie 3.3.2.2 pour obtenir l'accélération angulaire du mécanisme étant constituée de ces deux étapes, retiendra notre attention.

3.4.2.2 Conditions sur la tendance

Le kurtogramme, tout comme le spectre de modulation cyclique, est originellement estimé à partir d'une Transformée de Fourier à Court Terme (voir annexe A.2.2). Il sera montré dans la partie 3.5 qu'une telle formulation associée à la technique de fenêtrage pourrait être appliquée directement sur le signal Écart Temporel. Néanmoins, sa très lourde complexité du calcul fait préférer la méthode de calcul du kurtogramme basée sur la convolution du signal par une batterie de filtre quasi analytique [ANT 07a]. Cette méthode, schématisée dans le diagramme a) de la figure 3.17, s'applique sur un signal dont l'espérance doit être raisonnablement constante de manière à ce que l'enveloppe élevée au carré ne valorise que les zones représentatives d'une forte variance. Le signal fenêtré, bien que potentiellement rééchantillonnable dans le domaine temporel, ne présente pas cette qualité. Par conséquent, le signal accélération obtenu par la méthode du double rééchantillonnage est utilisé pour extraire le spectre d'enveloppe. Ainsi, le signal échantillonné en temps $d^2\varphi[t]/dt^2$ issu de l'algorithme présenté dans la figure 3.12 est utilisé comme entrée de ce diagramme.

3.4.2.3 Validation Expérimentale

Le graphe c) de la figure 3.17 présente le Kurtogramme obtenu à partir de la mesure expérimentale issue de l'éolienne, améliorée par le processus de réduction. À chaque rectangle du Kurtogramme est donc associé le Kurtosis de la fonction d'enveloppe correspondant à l'un des filtres présentés dans le diagramme b) de la même figure. Ainsi, l'abscisse du Kurtogramme est graduée en Hertz, à l'image du domaine temporel dans lequel l'enveloppe est échantillonnée. Dans cet exemple, l'enveloppe issue du filtre F_3 est qualifiée du plus grand Kurtosis³. A ce titre, la figure 3.18 présente les étapes successives qui mènent à l'enveloppe spectrale obtenue à partir du filtre F_3 . De l'enveloppe échantillonnée en temps, présentée sur le graphe a), est déduite l'enveloppe carrée échantillonnée en angle, présentée sur le graphe b). L'enveloppe spectrale présentée sur le graphe c) est comparée au spectre d'amplitude obtenu à partir du signal réduit et fenêtré, présenté sur le graphe d). Il est intéressant de constater les différences entre ces deux représentations spectrales.

³Les Kurtosis étant ici normalisés, les valeurs positives sont représentatives d'un phénomène non gaussien.

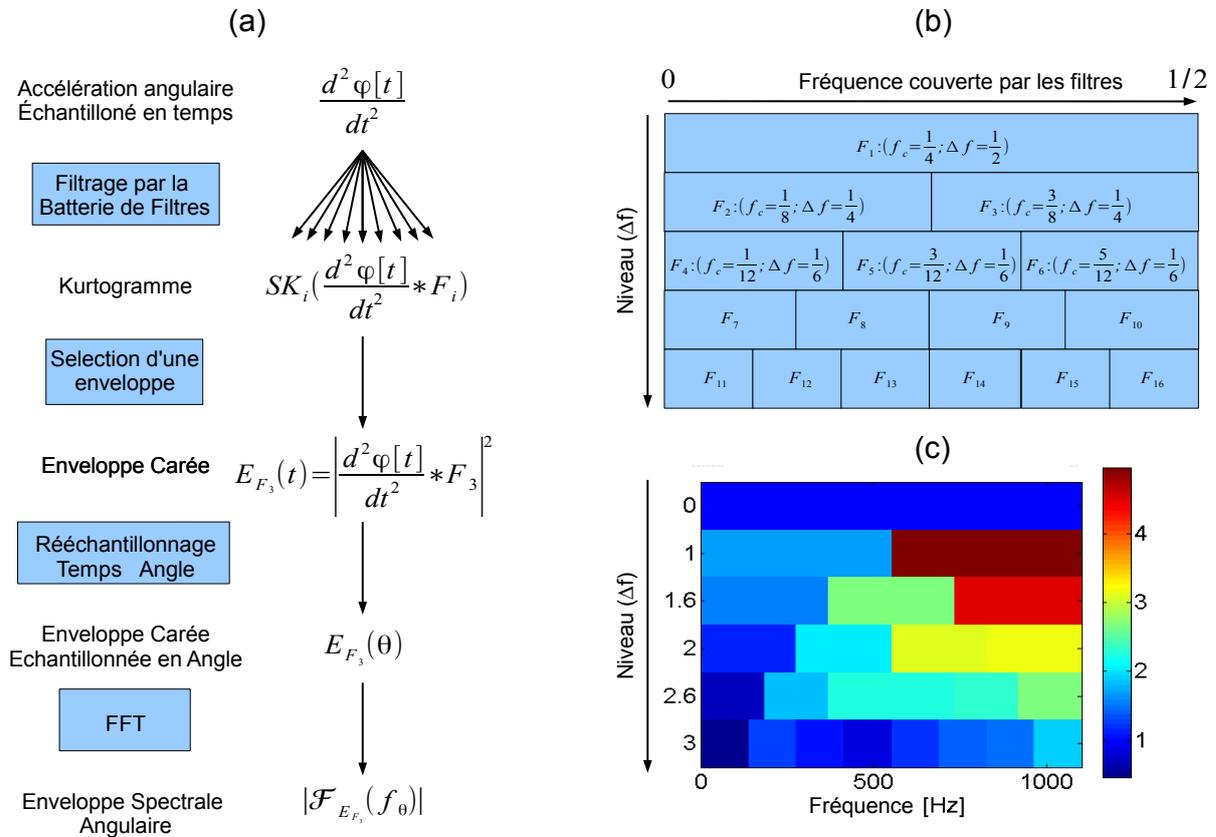


FIG. 3.17: a) Diagramme schématisant l'obtention de l'enveloppe spectrale angulaire optimisée par la méthode Kurtogramme. Le Kurtogramme est b) schématisé puis c) appliqué au signal réduit.

Bien que les phénomènes cyclostationnaires d'ordre 1 n'aient pas été retirés du signal⁴, les phénomènes d'engrènement et de balourd n'apparaissent pas sur l'enveloppe spectrale. Des phénomènes cycliques d'amplitude plus faible, masqués sur l'observation spectrale obtenue à partir du signal réduit fenêtré, peuvent être surveillés sur l'enveloppe spectrale obtenue depuis un filtre dont les caractéristiques sont déterminées par le Kurtogramme. L'origine des nombreuses harmoniques révélées sur le graphe c) sera discutée plus en détail dans le chapitre 4.4, consacré à l'étude expérimentale des roulements défectueux.

3.4.2.4 Précautions prises lors de la mise en pratique

La mise en pratique de l'analyse cyclostationnaire est d'ores et déjà détaillée avec le plus grand soin dans la littérature. Néanmoins, son adaptation au signal Écart Temporel obtenu sous des conditions non stationnaires est limitée par des paramètres

⁴Les outils de séparation, présenté en Annexe A.2.1, ne sont valables que sous des conditions cyclostationnaires.

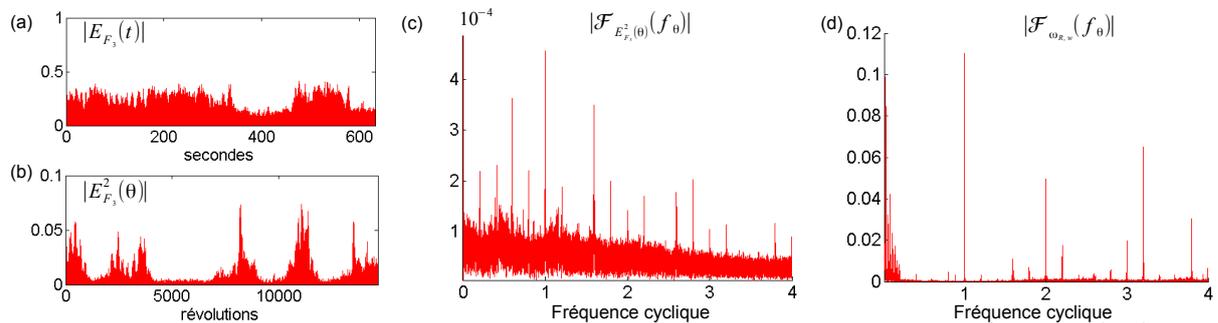


FIG. 3.18: Sont obtenues à partir du filtre F_3 : a) l'enveloppe temporelle. b) l'enveloppe carrée angulaire. c) l'enveloppe spectrale. à comparer avec d) : le spectre d'amplitude du signal réduit

supplémentaires.

Tout d'abord, bien que l'acquisition Écart Temporel ne soit pas protégée contre le rééchantillonnage, la fréquence temporelle utilisée pour rééchantillonner la fonction Angle/Temps ainsi que le signal vitesse instantanée est réglée en fonction de la cadence maximale qu'impose le capteur angulaire, une fois réduit. Pour assurer que les deux étapes de rééchantillonnage soient peu perturbées, la fréquence temporelle d'acquisition est dix fois supérieure à la cadence imposée par le capteur angulaire, elle même dépendante de la résolution ainsi que de la vitesse de rotation de l'arbre pendant la mesure. La fréquence temporelle est alors d'autant plus élevée que la résolution du capteur est grande. À fréquence de rééchantillonnage temporelle équivalente, le procédé de réduction permet d'améliorer la résolution fréquentielle de l'enveloppe spectrale.

Le point précédent invite donc à réduire la résolution du capteur de manière à faciliter le respect du critère de Shannon imposé par le rééchantillonnage. Néanmoins, dans le cas de phénomènes vibratoires évanescents, comme peuvent l'être les réponses structurelles à une excitation impulsive, il faut pouvoir mesurer le phénomène vibratoire avant qu'il ne soit étouffé par son amortissement. Ce phénomène invite au contraire à augmenter la résolution du capteur angulaire et la fréquence temporelle de rééchantillonnage par la même occasion. Ce paramétrage, aujourd'hui empirique, ne demande qu'à être amélioré par une meilleure connaissance mécanique des défauts.

3.5 Observation angle / fréquence cyclique

Si l'observation spectrale est idéale pour l'étude de signaux stationnaires, elle est limitée dans le cas où les propriétés statistiques des phénomènes vibratoires sous surveillance évoluent au cours de l'observation. Dans le cas où des signaux non stationnaires sont à l'étude, on peut préférer l'utilisation d'outil d'observation Temps / Fréquence. La Transformée de Fourier à Court Terme (TFCT) est l'un des outils qui permettent de dissocier l'information temporelle du contenu fréquentiel d'un signal vibratoire. En l'occurrence, si le « terme » de la TFCT est généralement discrétisé en temps, l'adaptation de cette transformée au signal angulaire, et particulièrement celui de vitesse instantanée, est proposée dans une première partie. Dans une seconde partie, la TFCT est présentée comme un outil capable de distinguer les phénomènes cycliques des phénomènes temporels ou aperiodiques. La troisième partie, plus technique, démontre la possibilité de re-localiser un phénomène temporel dont la fréquence est pourtant repliée. La quatrième partie présente un cas pratique issu de l'éolienne pour valider l'approche préalablement proposée ainsi que pour distinguer les résultats obtenus par une observation en vitesse angulaire instantanée de ceux obtenus par mesure vibratoire. Enfin, la dernière partie conclut ce chapitre en proposant un moyen d'utiliser la TFCT pour relocaliser les phénomènes cycliques repliés. Si la nature du signal vitesse angulaire instantanée rend l'acquisition de ces phénomènes repliés inévitables, la TFCT est alors envisagée comme capable de transformer cette limitation en atout majeur.

3.5.1 Adaptation de la TFCT aux signaux angulaires

Selon un premier mode de réalisation, la TCFT peut être appliquée à un signal vibratoire discrétisé en angle. Selon un second mode de réalisation, la TFCT est appliquée à un signal de vitesse angulaire instantanée.

3.5.1.1 Cas des mesures vibratoires angulaires

Si l'on considère le signal $x(n)$ échantillonné dans le domaine angulaire et obtenu en utilisant un capteur angulaire de résolution R , on définit la transformée discrète \mathcal{F} qui associe au signal angulaire x la transformée bivariée $\mathcal{F}_x(k, \theta_m)$ telle que :

$$\mathcal{F}_x(k, \theta_m) = \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^M x_{m,w}(n) e^{\frac{-j2\pi kn}{2M+1}} \quad (3.20)$$

avec k l'indice du canal fréquentiel lié à la fréquence cyclique $f_k = \frac{k}{2m+1} \cdot R$ graduée en événement par tour, m l'indice du segment caractérisant la position angulaire $\theta_m = \frac{mH}{R}$ graduée en nombre de tour, H l'avancement angulaire entre deux termes consécutifs et $x_{m,w}$ le $m^{\text{ème}}$ segment du signal x pondéré par la fenêtre d'apodisation w . Les paramètres de l'équation 3.20 ainsi que la TFCT sont explicitées plus en détail en Annexe A.2.4.

3.5.1.2 Cas des mesures de vitesse angulaire instantanée.

À l'appui du procédé de fenêtrage précédemment formulé dans l'équation 3.14, le signal angulaire $x_{m,w}$ prend la forme :

$$\forall n \in [-M : M] , x_{m,w}(n) = \left(x_m(n) - \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^M x_m(n) \right) \cdot w(n) \quad (3.21)$$

L'équation 3.20 est ainsi adaptée pour considérer la tendance moyenne de la vitesse angulaire. Outre l'avantage partagé avec la surveillance vibratoire conventionnelle, cette adaptation offre une opportunité de contourner le repliement qui pollue les mesures de vitesse angulaire instantanée.

3.5.2 Distinctions des phénomènes cycliques, temporels et « autres ».

Qu'elle soit appliquée au signal vibratoire ou au signal de vitesse angulaire instantanée, la TFCT appliquée sous des conditions largement non stationnaires permet de distinguer les phénomènes vibratoires temporels des phénomènes vibratoires cycliques. En outre, les phases de fonctionnement où l'observation est perturbée par un phénomène extérieur deviennent clairement identifiables. Dans le cas illustratif de l'instrumentation sur l'éolienne, la TFCT a permis d'identifier des manifestations provenant du moteur de « Yaw » comme éléments perturbateurs.

La figure 3.19 présente l'observation à court terme du signal vibratoire transmis par un accéléromètre situé sur le carter du multiplicateur (l'instrumentation de l'éolienne est détaillée dans la partie D.1.3). Le graphe de gauche présente l'observation Angle / Fréquence Cyclique obtenue quand l'échantillonnage est synchronisé par le capteur optique installé sur la génératrice tandis que le graphe de droite présente l'observation Temps / Fréquence appliquée au même signal échantillonné sur une base temporelle. La représentation en deux dimensions est permise par une graduation en niveau de gris. Les couleurs les plus sombres représentent les amplitudes les plus élevées de la TFCT, de manière à ce que l'évolution des composantes fréquentielles en fonction du temps soient caractérisées par de simples lignes sombres sur fond clair. Ainsi, sur l'observation Angle / Fréquence Cyclique, la localisation fréquentielle des phénomènes vibratoires cycliques ne dépend pas de la position angulaire, tandis que les phénomènes vibratoires temporels varient à l'opposée de la vitesse de rotation du mécanisme. Réciproquement, les phénomènes temporels sont stationnaires sur l'observation Temps/Fréquence tandis que les phénomènes cycliques varient avec la vitesse de rotation.

Il est intéressant de constater que ce signal n'est pas uniquement constitué d'une combinaison de phénomènes temporels et de phénomènes cycliques. En particulier, si l'on s'intéresse aux phénomènes vibratoires apparaissant sous la forme de bande verticale bruitée aux positions environnant les 4000 tours et 7000 tours sur l'observation

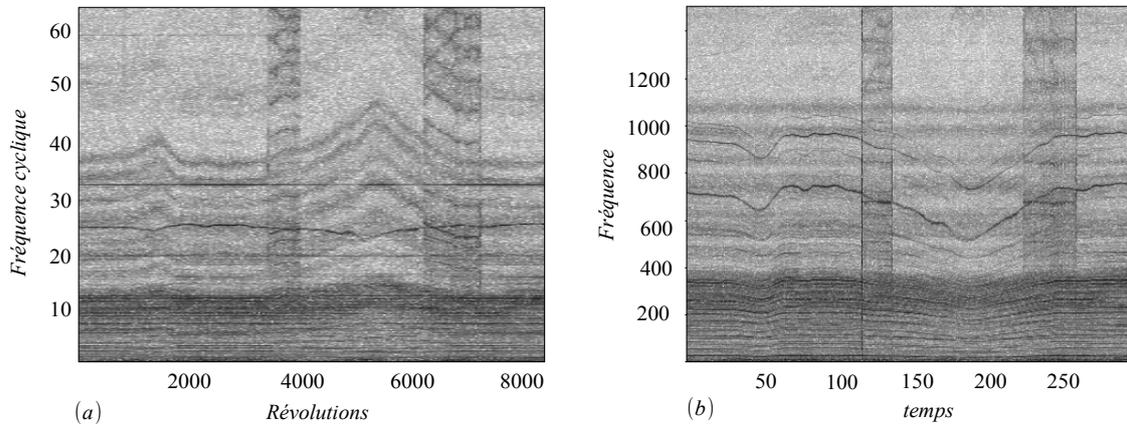


FIG. 3.19: Transformée à Court Terme appliquée au signal vibratoire : (a) observation Angle / Fréquence Cyclique, (b) observation Temps / Fréquence.

Angle/Fréquence Cyclique ⁵, les lignes sombres qui représentent les composantes fréquentielles des phénomènes vibratoires perturbateurs ne sont stationnaires sur aucune des deux observations. Une rapide enquête permet d'attribuer ces vibrations au mécanisme de rotation de la nacelle (« yaw ») dont la cinématique, sans être menée à vitesse constante, n'est pas non plus liée à la ligne d'arbre où le capteur angulaire est installé. De plus, les lignes sombres et verticales qui encadrent ces zones de perturbation reflètent des chocs extrêmement secs sur la structure, probablement induits par le desserrage/resserrage des freins qui maintiennent la nacelle en position quand le moteur de « Yaw » est inactif. Autant de raisons faisant du fonctionnement de ce moteur un élément à prendre en compte par le système de surveillance.

La Transformée de Fourier à Court Terme est ainsi présentée comme un outil capable de distinguer les phénomènes cycliques des phénomènes temporels ou apériodiques. En outre, cette observation permet à l'utilisateur de mieux connaître un mécanisme complexe ainsi que la sensibilité de ses capteurs vis à vis de son environnement.

3.5.3 Relocalisation d'un phénomène temporel replié

Le problème de résolution, déjà abordé dans la partie présentant l'algorithme de réduction artificielle de résolution du capteur angulaire (voir partie 3.2.3), découle de l'inexistence de filtre anti-repliement en matière d'acquisition du signal de vitesse angulaire instantanée. Ainsi, tous les phénomènes vibratoires qui dépassent le niveau de bruit apparaissent sur l'observation spectrale. L'utilisation d'un capteur angulaire basse résolution devient difficile car l'utilisateur ne peut distinguer les phénomènes physiques

⁵correspondant respectivement aux instants 130 secondes et 250 secondes sur l'observation Temps / Fréquence

repliés les uns sur les autres. Dans ce paragraphe, on démontre que les phénomènes vibratoires temporels repliés peuvent être relocalisés sur une mesure angulaire grâce à la TFCT.

3.5.3.1 Notations

Considérons le signal de vitesse angulaire instantanée $\omega(\theta)$, mesuré sous des conditions non stationnaires, et porteur d'un phénomène vibratoire temporel dont on cherche à identifier la fréquence f_t (en hertz). On note $f_\Theta(\theta)$ la fréquence cyclique à laquelle correspondrait ce phénomène temporel pour chaque position angulaire en l'absence de repliement. Comme le souligne l'équation ci-dessous, la variation de cette fréquence cyclique ne dépend que de la variation éventuellement subie par la vitesse de rotation.

$$f_\Theta(\theta) = \frac{f_t}{\omega(\theta)} \quad (3.22)$$

Ensuite, on note $\tilde{f}_\Theta(\theta)$ la fréquence cyclique correspondant au phénomène temporel de fréquence f_t , observée par un système de mesure limité par un capteur de résolution R . Cette notation souligne l'assujettissement de la fréquence cyclique au problème de repliement : $\tilde{f}_\Theta(\theta)$ est ainsi défini dans l'intervalle $[0, R/2]$ événements par tour.

3.5.3.2 Démonstration

D'après l'équation 3.22, on peut retrouver la fréquence temporelle f_t si les valeurs de $\omega(\theta)$ et $f_\Theta(\theta)$ sont connues pour une seule position angulaire. Cependant, le repliement ne permet pas d'estimer $f_\Theta(\theta)$ avec certitude. On montre alors que seule la variation prise par $f_\Theta(\theta)$ entre deux positions angulaires θ_1 et θ_2 où la vitesse de rotation est différente s'avère suffisante pour retrouver la fréquence temporelle du phénomène. D'après l'équation 3.22,

$$f_\Theta(\theta_2) - f_\Theta(\theta_1) = \frac{f_t}{\omega(\theta_2)} - \frac{f_t}{\omega(\theta_1)} \quad (3.23)$$

la fréquence temporelle peut effectivement être calculée à partir de $f_\Theta(\theta_2) - f_\Theta(\theta_1)$ si on prend $\theta_1, \theta_2 \in \mathbb{R}$ tels que $\omega(\theta_1) \neq \omega(\theta_2)$:

$$f_t = \frac{(f_\Theta(\theta_2) - f_\Theta(\theta_1)) \cdot \omega(\theta_1) \cdot \omega(\theta_2)}{\omega(\theta_1) - \omega(\theta_2)} \quad (3.24)$$

On montre ensuite qu'il est possible de retrouver la variation suivie par $f_\Theta(\theta)$ entre deux points où la vitesse angulaire est différente en ne considérant que $\tilde{f}_\Theta(\theta)$ et $\omega(\theta)$. Pour cela, on définit l'application φ , de classe \mathcal{C}^0 de \mathbb{R}^+ dans $[0, R/2]$ qui associe une fréquence cyclique repliée \tilde{f}_Θ à une fréquence cyclique f_Θ et vérifiant :

$$\begin{cases} \tilde{f}_\Theta = \frac{f_\Theta}{R/2} - \left\langle \frac{f_\Theta}{R/2} \right\rangle & \text{si } \left\langle \frac{f_\Theta}{R/2} \right\rangle \text{ est pair,} \\ \tilde{f}_\Theta = \frac{R}{2} - \left(\frac{f_\Theta}{R/2} - \left\langle \frac{f_\Theta}{R/2} \right\rangle \right) & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.25)$$

Cette application, en dent de scie, est illustrée sur la figure 3.20 avec l'exemple numérique suivant : si pour $\theta = \theta_0$, $f_{\Theta}(\theta_0) = \frac{7 \cdot R}{5}$, alors le phénomène est replié deux fois et la fréquence cyclique observée par TFCT donne $\tilde{f}_{\Theta}(\theta_0) = \frac{2 \cdot R}{5}$.

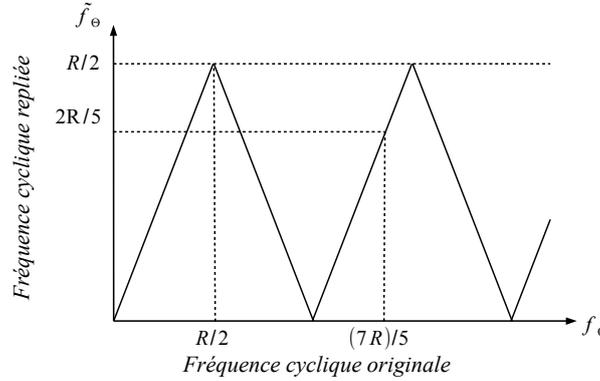


FIG. 3.20: Représentation de la fonction de repliement sur la fréquence cyclique d'un phénomène temporel.

Entre deux extrema consécutifs, c'est à dire en choisissant $f_{\Theta_1}, f_{\Theta_2} \in \mathbb{R}$ vérifiant :

$$\exists k \in \mathbb{N} \text{ tel que } k \cdot \frac{R}{2} \leq f_{\Theta_1} < f_{\Theta_2} \leq (k+1) \cdot \frac{R}{2}, \quad (3.26)$$

on remarque que la variation de $\tilde{f}_{\Theta} = \varphi(f_{\Theta})$ est, au signe près, équivalente à la variation de f_{Θ} .

$$\text{alors } f_{\Theta_2} - f_{\Theta_1} = \text{sgn}(\tilde{f}_{\Theta_2} - \tilde{f}_{\Theta_1}) \cdot (\tilde{f}_{\Theta_2} - \tilde{f}_{\Theta_1}), \quad (3.27)$$

où « sgn » est la fonction signe. De l'équation 3.22, on sait que

$$\forall \theta_1, \theta_2 \in \mathbb{R}^2, \quad \omega(\theta_1) < \omega(\theta_2) \iff f_{\Theta}(\theta_1) > f_{\Theta}(\theta_2) \quad (3.28)$$

D'une part, l'équation 3.27 présente le lien entre la variation de fréquence originale et la variation de fréquence repliée, sous réserve que le signe de la variation de fréquence originale soit connue (cf Eq. 3.26). D'autre part, l'équation 3.28 permet d'obtenir le signe de variation de la fréquence originale à partir du signe de la variation de la vitesse de rotation $\omega(\theta)$. On peut alors dresser une relation entre $f_{\Theta}(\theta_2) - f_{\Theta}(\theta_1)$ et $\tilde{f}_{\Theta}(\theta_2) - \tilde{f}_{\Theta}(\theta_1)$, dans le cas où $\tilde{f}_{\Theta}(\theta)$ est différent de 0 et $R/2$ sur $[\theta_1, \theta_2]$.

En choisissant $(\theta_1, \theta_2) \in \mathbb{R}^2$ tels que,

$$\forall \theta \in [\theta_1, \theta_2], \quad \tilde{f}_{\Theta}(\theta) \in]0, R/2[. \quad (3.29)$$

Les équations 3.27 et 3.28 donnent :

$$f_{\Theta}(\theta_2) - f_{\Theta}(\theta_1) = \text{sgn}(\omega(\theta_1) - \omega(\theta_2)) \cdot \text{sgn}(\tilde{f}_{\Theta}(\theta_2) - \tilde{f}_{\Theta}(\theta_1)) \cdot (\tilde{f}_{\Theta}(\theta_2) - \tilde{f}_{\Theta}(\theta_1)) \quad (3.30)$$

Enfin, dans le cas général où $\tilde{f}_\Theta(\theta)$ présente n points singuliers entre θ_1 et θ_2 , on applique le raisonnement précédent en procédant morceau par morceau. Soit \mathcal{A} l'ensemble des positions angulaires $\{a_i\}_{i \in [1, n]}$ entre θ_1 et θ_2 vérifiant $\tilde{f}_\Theta(a_i) \notin]0, R/2[$. Chaque élément de \mathcal{A} est un séparateur limitant les sous-intervalles de manière à ce que $[\theta_1, \theta_2]$ soit finalement découpé en $n + 1$ sous-intervalles complémentaires. Par souci de simplification, on note ξ_i la valeur prise par le produit des fonctions « signe » sur le $i^{\text{ème}}$ intervalle $]a_{i-1}, a_i[$, où $a_0 = \theta_1$ et $a_{n+1} = \theta_2$, avant d'étendre la relation 3.30 au cas général :

$$f_\Theta(\theta_2) - f_\Theta(\theta_1) = \sum_{i=1}^{n+1} \xi_i \cdot (\tilde{f}_\Theta(a_i) - \tilde{f}_\Theta(a_{i-1})) \quad (3.31)$$

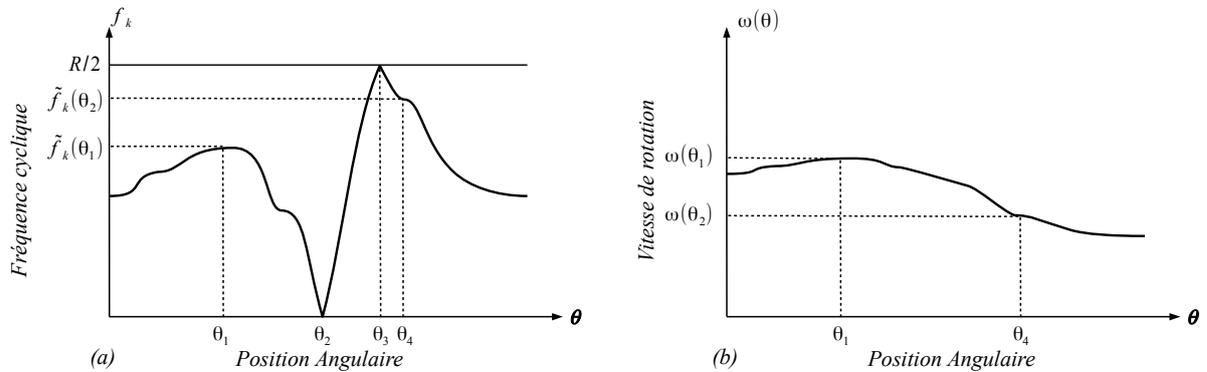


FIG. 3.21: Représentations issues d'une TFCT focalisée sur (a) un phénomène vibratoire temporel subissant du repliement et (b) l'évolution de vitesse de rotation.

3.5.3.3 Synthèse de l'approche proposée

Dans le cas illustré par la figure 3.21, un phénomène périodique temporel est suivi au moyen d'une TFCT sous des conditions largement non stationnaires. L'évolution de la fréquence cyclique du phénomène temporel en fonction de la position angulaire est représentée sur le graphe de gauche tandis que l'évolution de la vitesse de rotation est présentée sur le graphe de droite. Le procédé permettant de retrouver la fréquence du phénomène vibratoire temporel comporte les étapes consistant à :

- choisir un intervalle où l'estimation de la fréquence cyclique est facilitée. Sur la Figure 3.21, on s'intéresse aux valeurs prises pour les positions angulaires θ_1 et θ_4 .
- découper l'intervalle $[\theta_1, \theta_4]$ en segments limités par les points singuliers de la fonction $\tilde{f}_\Theta(\theta)$. Dans l'exemple, deux points de franchissement de la limite de repliement sont repérés en θ_2 et θ_3 .
- pour chaque sous intervalle i , évaluer ξ_i . Dans l'exemple, $\xi_1 = -1$, $\xi_2 = 1$ et $\xi_3 = -1$.
- Calculer f_i à l'aide des équations 3.24 et 3.31.

3.5.4 Validation sur l'éolienne

Une telle approche est mise en pratique sur l'analyse d'un signal de vitesse instantanée obtenu à partir du codeur L&L de l'éolienne⁶, réduit à 128 impulsions par tour⁷. L'observation de la vitesse angulaire instantanée est présentée conjointement à sa TFCT sur la figure 3.22. Un phénomène vibratoire, dont la fréquence cyclique est surlignée sur le graphe de gauche, n'apparaît pas à ces fréquences cycliques sur les acquisitions où la résolution du capteur n'est pas réduite. En outre, le repliement subi par ce phénomène est signalé par l'évolution de sa fréquence cyclique de même signe que celle de la vitesse de rotation.

3.5.4.1 Relocalisation d'un phénomène temporel

La méthode est appliquée entre les positions angulaires $\theta_1 = 2500$ et $\theta_2 = 5380$ révolutions, où $f_{\Theta}(\theta_1) = 57.2$, $f_{\Theta}(\theta_2) = 33.3$ événements par tour, $\omega(\theta_1) = 30.1$ et $\omega(\theta_2) = 22.8$ tours par seconde. En l'absence de points singuliers au sein de l'intervalle $[\theta_1, \theta_2]$, les équations 3.24 et 3.30 permettent d'associer à ce phénomène temporel la fréquence $2248Hz$. Cette fréquence correspond effectivement à celle observée par le système quand la résolution du capteur angulaire n'est pas réduite. Notons que le courant produit par l'éolienne, une fois rectifié, est converti en alternatif $50Hz$ par un transistor bipolaire à grille associée⁸ dont la fréquence de découpage est de $2250Hz$. Le phénomène temporel est effectivement replié une et une seule fois sur l'observation réduite et correspond à la fréquence de découpage imposée par le réseau électrique. La faible erreur d'estimation est principalement attribuée à la résolution limitée de l'observation TCFT, elle même liée au principe d'incertitude de Heisenberg, détaillé en annexe A.2.4. Il est probable qu'un moyennage sur plusieurs estimations glissées réduise le biais du résultat.

3.5.4.2 Comparaison entre les résultats obtenus en fonction de la nature du signal

Il est intéressant de comparer les graphes de gauche des figures 3.19 et 3.22 où les TFCT sont respectivement appliquées sur les signaux vibratoires et vitesse angulaire instantanée. Les acquisitions étant simultanées et utilisant le même capteur angulaire, les signaux restituent l'observation des mêmes phénomènes mécaniques, électriques et perturbateurs. La comparaison de ces observations reflète la différence que présente chaque méthodologie de mesure. On distingue en particulier :

1. la perturbation large bande, associée au système mécanique de « yaw » qui n'est pas visible sur l'observation de vitesse angulaire instantanée. En effet, il est compréhensible que le frottement d'un système complètement découplé de la ligne d'arbre ait moins d'influence sur le capteur angulaire que sur l'accéléromètre.

⁶L'instrumentation est détaillée dans l'Annexe D.1.3

⁷Résolution originale du codeur : 2048ipt - facteur de réduction : 16.

⁸rack IGBT

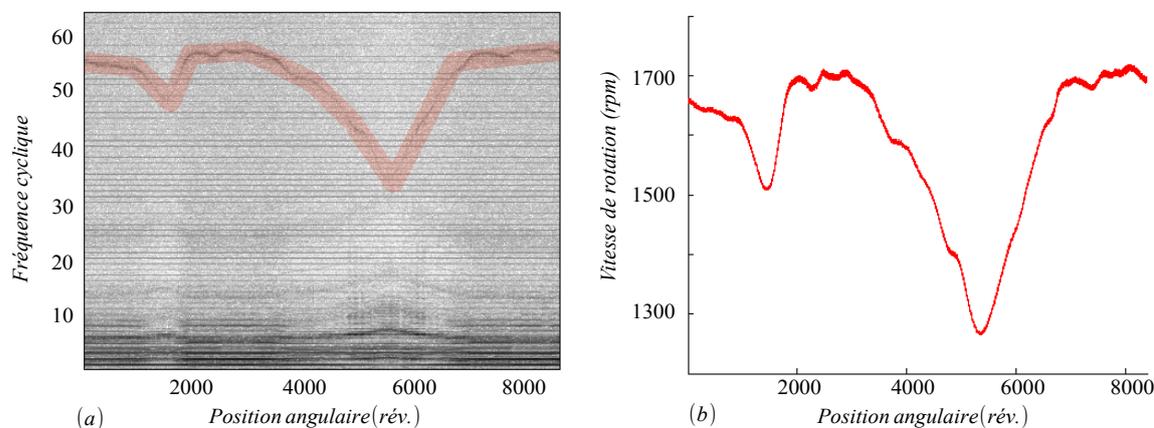


FIG. 3.22: Localisation d'un phénomène temporel replié à partir de a) la transformée de Fourier Court Terme du signal vitesse et b) du signal vitesse original.

2. les phénomènes temporels sont plus nombreux sur l'observation de vitesse angulaire instantanée. Il est à noter qu'une grande majorité des phénomènes temporels du signal vibratoire sont les harmoniques paires du 50Hz introduit par le conditionneur, élément absent de la chaîne de mesure de vitesse angulaire instantanée,
3. la fréquence du rack IGBT n'est pas détectée par le signal vibratoire car amoindrie par le filtre anti-repliement du conditionneur (2kHz),
4. l'erreur géométrique du capteur angulaire perturbe l'ensemble des harmoniques de l'arbre porteur du codeur. L'ensemble des fréquences cycliques entières sont perturbées sur l'observation de la vitesse angulaire instantanée tandis que la surveillance vibratoire y est insensible.

3.5.5 Proposition pour les phénomènes cycliques repliés

Il est pertinent de poursuivre le raisonnement menant à identifier les phénomènes dont les fréquences sont repliées dans le cas des phénomènes cycliques. En effet, les mesures angulaires étant principalement destinées à la surveillance de phénomènes cycliques, c'est avant tout le repliement subi par ces phénomènes qu'il est utile de contourner.

3.5.5.1 Démonstration

La méthode telle qu'elle est présentée dans la partie 3.5.3 permet d'imaginer la solution résolvant le problème pour les phénomènes cycliques. Il suffirait d'inverser les graduations « temporelles » et « angulaires », l'observation TFCT devant alors être effectuée sur un signal discrétisé classiquement en temps. À partir de cette observation, la comparaison entre les variations suivies par la fréquence temporelle repliée du phénomène cyclique avec celles de la vitesse de rotation permettront d'obtenir la fréquence cyclique originale.

On considère un phénomène cyclique de fréquence f_θ . On note $f_T(t)$ la fréquence temporelle originale de ce phénomène cyclique à l'instant t et $\tilde{f}_T(t)$ la fréquence temporelle repliée au même instant. Le repliement est alors caractérisé par une application notée ψ , de classe \mathcal{C}^0 de \mathbb{R}^+ dans $[0, F_S/2]$ qui associe une fréquence temporelle repliée \tilde{f}_T à une fréquence cyclique f_T , où F_S est la fréquence d'échantillonnage du signal temporel. Retraçant la démonstration précédente, on retrouve la fréquence temporelle originale d'après l'équation suivante :

$$f_\theta = \frac{(f_T(t_2) - f_T(t_1))}{\omega(t_2) - \omega(t_1)} \quad (3.32)$$

La variation des fréquences temporelles originales est donnée par la variation des fréquences temporelles repliées. Soit $(t_1, t_2) \in \mathbb{R}$, soit \mathcal{A}' l'ensemble des instants $\{a_i\}_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket}$ entre t_1 et t_2 vérifiant $\tilde{f}_T(a_i) \notin]0, F_S/2[$. Chaque élément de \mathcal{A}' est un séparateur limitant les sous-intervalles de manière à ce que $[t_1, t_2]$ soit finalement découpé en $n + 1$ sous-intervalles complémentaires. Par soucis de simplification, on note $a_0 = t_1$ et $a_{n+1} = t_2$.

$$f_T(t_2) - f_T(t_1) = \sum_{i=1}^{n+1} \zeta_i \cdot (\tilde{f}_T(a_i) - \tilde{f}_T(a_{i-1})) \quad (3.33)$$

où ζ_i est défini à partir de l'application ψ et de l'équation 3.32,

$$\zeta_i = \text{sgn}(\omega(a_i) - \omega(a_{i-1})) \cdot \text{sgn}(\tilde{f}_T(a_i) - \tilde{f}_T(a_{i-1})). \quad (3.34)$$

La formulation est donc très proche de celle présentée dans la partie précédente. Néanmoins, le signal de vitesse instantanée obtenu par la méthode angulaire du Temps Écoulé est discrétisé en angle, tandis que cette méthode est basée sur un signal discrétisé en temps.

3.5.5.2 Discussion sur la nature du signal et du capteur nécessaire

Si la méthode doit s'appuyer sur un signal représentatif de la vitesse instantanée échantillonné dans le domaine temporel, rééchantillonner le signal angulaire dans ce domaine n'est pas une solution⁹. Au même titre qu'un filtre passe bas ne protège du repliement que s'il est situé avant l'étape de discrétisation, le rééchantillonnage en post-traitement ne peut différencier deux phénomènes d'ores et déjà repliés sur la même fréquence cyclique. Une solution possible est donc d'imaginer un capteur angulaire dont l'échantillonnage puisse être à la fois soumis à une mesure angulaire et temporelle.

Parmi les méthodologies de mesures temporelles de la vitesse angulaire instantanée¹⁰, l'estimation de la fréquence instantanée par démodulation de l'enveloppe n'est pas retenue. En effet, cette méthode n'est d'une part, pas adaptée pour fonctionner sous des

⁹voir partie 1.3.1.2 pour plus de détails sur le rééchantillonnage

¹⁰voir partie 2.2.1.2 pour plus de détails

conditions largement non-stationnaires, mais introduit d'autre part un filtre passe bas qui nuit à l'objet de notre recherche. Par conséquent, l'auteur propose de surveiller le capteur par la méthode « chronométrique », méthode estimant l'espace parcouru pendant un pas de temps donné.

Une fois les méthodes d'acquisition retenue, il faut disposer d'un capteur angulaire capable de délivrer une représentation simultanément discrète et continue de la position angulaire. Dans la partie 2.2.1.1, la figure 2.3 présente les différentes étapes du conditionnement d'un capteur angulaire. Le comparateur est utilisé pour passer d'une représentation continue à une représentation discrète de la position angulaire. Le signal issu directement du filtre peut alors être utilisé pour la mesure temporelle, tandis que le signal issu du comparateur reste dédié à la mesure angulaire de la vitesse angulaire instantanée. Dans un mode de réalisation, l'interpolation arc-tangente¹¹ entre deux signaux sinusoïdaux déphasés de 90° peut être utilisée pour optimiser l'estimation de la position angulaire de l'arbre porteur du capteur à chaque instant.

Par manque de temps, l'approche n'a pu être validée expérimentalement dans le cas d'une fréquence cyclique repliée. Néanmoins, la validation expérimentale présentée dans la partie précédente associée à la symétrie entre représentations angulaires et temporelles achèvent de convaincre l'auteur quant à la validité de la localisation fréquentielle des phénomènes cycliques repliés. Cette méthode peut s'avérer particulièrement utile quand des capteurs très basse résolution sont employés. Si l'ensemble des phénomènes cycliques peuvent se distinguer les uns des autres tant que la résolution fréquentielle est suffisamment fine, il manquait encore un outil capable d'assurer la fréquence cyclique originale des phénomènes cycliques repliés.

¹¹voir partie 2.3.2.2

3.6 Conclusion

L'observation spectrale d'un signal angulaire n'est pas suffisante pour permettre la surveillance d'une ligne d'arbre d'éolienne. En premier lieu, deux méthodes ont été proposées pour travailler sur la largeur des canaux fréquentiels du spectre d'amplitude. La première, algorithmique, est une évolution du « zero padding » qui permet d'optimiser la localisation des canaux fréquentiels vis à vis du « picket fence effect ». La seconde, systémique, permet d'augmenter la résolution fréquentielle sans augmenter le nombre d'échantillons. Un capteur angulaire peut ainsi simultanément faire l'objet de plusieurs acquisitions dont le facteur de réduction respectif est adapté aux fréquences cycliques sous surveillance. Cette seconde méthode est d'autant plus nécessaire que les codeurs les plus précis, dont l'erreur géométrique est la plus faible, sont généralement ceux qui présentent une résolution élevée. Néanmoins, ces méthodes sont applicables pour tout signal échantillonné à partir d'un capteur angulaire.

La perturbation traitée par la suite ne concerne que les mesures de vitesse angulaire instantanée. Plusieurs méthodes sont ainsi proposées pour supporter les phénomènes cycliques dont l'amplitude n'est pas suffisamment élevée pour dépasser les perturbations introduites par les variations macroscopiques de vitesse de rotation. Bien que la méthode de régression linéaire soit utilisée avantageusement pour faciliter l'observation spatiale du signal, elle n'est pas adaptée pour faciliter l'observation spectrale. En revanche, les méthodes de traitement par fenêtrage, où celles basées sur l'analyse de l'accélération angulaire instantanée, permettent de corriger efficacement la perturbation large bande liée aux variations de vitesse qui marquent l'éolienne.

Corriger ces perturbations en travaillant sur un signal représentatif de l'accélération angulaire instantanée peut présenter une étape de calcul où le signal est échantillonné dans le domaine temporel. Plus calculatoire, cette étape peut être mise à profit par les méthodes d'enveloppe, s'appuyant sur les résonances temporelles qui convoluent les excitations cycliques sous surveillance. En revanche, la méthode de fenêtrage permet de travailler sur un signal représentatif de la vitesse de rotation, et conserve de fait cette information dans l'observation angle fréquence, qui est alors en mesure de relocaliser les phénomènes vibratoire temporels repliés.

L'observation angle fréquence d'un signal de vitesse instantanée permettrait en effet, à condition que la vitesse de rotation ne soit pas constante, d'identifier les phénomènes repliés. Ce point prend autant de valeur qu'il n'existe aujourd'hui pas de moyen de filtrer les phénomènes vibratoires qui dépassent la fréquence de Shannon, sur les mesures d'Écart Temporel. Néanmoins, la proposition faite sur un capteur de position angulaire dont l'acquisition pourrait être faite aussi bien temporellement que de manière angulaire est laissée en suspend, par manque évident de ressource technologique.

Chapitre 4

Étude Expérimentale

L'efficacité des outils de traitement présentés préalablement sera mise à l'épreuve aussi bien pour les mesures vibratoires que celles de vitesse instantanée.

Au delà des outils de traitement, les systèmes de mesure feront eux-même l'objet d'une comparaison appuyée par de nombreuses expériences.

Désalignement angulaire, engrènements défectueux et défauts localisés de roulement sont autant d'occasion de préparer la surveillance sous conditions non stationnaires qu'illustre la campagne de mesures effectuées sur l'éolienne.

Sommaire

4.1	Introduction	119
4.2	Défaut de désalignement	120
4.2.1	La modélisation du joint de cardan	121
4.2.2	Résultats expérimentaux	123
4.2.3	Bilan	124
4.3	Défaut d'engrènement	126
4.3.1	Étude de la forme des défauts d'engrènement	126
4.3.2	Application expérimentale	129
4.3.3	Bilan	132
4.4	Défaut de roulement	134
4.4.1	Analyse théorique et prospective des manifestations de défaut sur la vitesse instantanée	134
4.4.2	Protocole expérimental	140
4.4.3	Analyse des résultats	142
4.4.4	Bilan	150
4.5	Suivi long terme d'une machine tournante sous conditions non-stationnaires	152
4.5.1	Développement d'une méthode de surveillance sous conditions non-stationnaires	152
4.5.2	Surveillance d'un roulement de génératrice	159
4.5.3	Surveillance d'un engrènement défectueux	162
4.5.4	Bilan	170
4.6	Conclusion	172

4.1 Introduction

Bien que ce dernier chapitre ne se limite pas à la mise en pratique des procédés développés dans les chapitres précédents, il est l'occasion de mettre en valeur l'originalité de l'approche angulaire, et tout particulièrement celle de la mesure de vitesse angulaire instantanée. L'approche expérimentale est nécessaire pour observer la réaction de la vitesse angulaire instantanée vis à vis de défauts classiquement observés par un système de surveillance vibratoire.

Avant que ne soit considérée l'influence de la voie de transfert sur l'observation, seule l'excitation angulaire sera analysée dans les trois premières parties de ce chapitre. Cette excitation peut prendre plusieurs formes dont la plupart sont encore méconnues. Le défaut de désalignement angulaire, d'avantage considéré comme une source naturelle d'excitation angulaire plutôt qu'une défaillance, sera tout d'abord approché en termes théoriques et pratiques (4.2).

D'autre part, les défauts d'engrènement forment une famille extrêmement large de défauts dont le niveau de dangerosité dépend essentiellement de la nature de ce dernier. Globalement caractérisés par des excitations énergétiques, sèches et cyclosationnaires du premier ordre, une comparaison des observations angulaires de cinq défauts d'engrènement jugés caractéristiques sera présentée (4.3).

Les défauts de roulement, marquent quant à eux des excitations faiblement énergétiques et dont l'influence sur les variations de vitesse instantanée est encore mal connue. Plus que sur la nature du défaut de roulement, l'intérêt sera porté sur la capacité du système d'acquisition à évaluer l'avancement d'un défaut d'écaillage classique (4.4).

Enfin, l'évolution de la voie de transfert, rendue inéluctable par les conditions de fonctionnement non stationnaires, sera analysée en dernier lieu (4.5). Cette étude présentera deux objectifs : d'une part, l'obtention de résultats sous des conditions non stationnaires et d'autre part, la comparaison des résultats entre différentes conditions de fonctionnement. Cette partie sera notamment l'occasion de présenter quelques résultats obtenus sur l'éolienne.

4.2 Défaut de désalignement

Après les défauts de type balourd, les défauts d'alignement d'arbre apparaissent dans la littérature comme la principale source vibratoire d'une machines tournantes [JAL 09]. Qu'ils soient qualifiés d'angulaire, de parallèle ou d'une combinaison des deux (voir la figure 4.1), la société SKF attribue à ces défauts 50% des coûts liés aux pannes dans les machines tournantes¹. Parmi les défauts classiquement répertoriés comme provoqués par un problème d'alignement, on retrouve des défaillances prématurées de roulement, joint, arbre et accouplement ; des fuites excessives de lubrifiant au niveau des joints ainsi que l'augmentation globale des vibrations et du niveau sonore. C'est à juste titre que la détection des défauts d'alignement apparaît comme une observation pertinente de l'état d'usure globale de la ligne d'arbre.

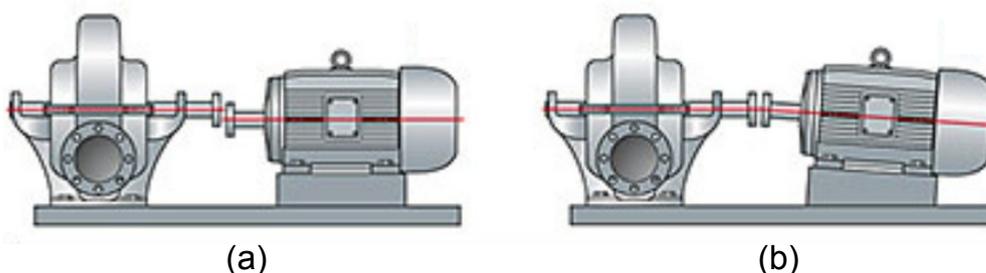


FIG. 4.1: Alignement caractéristique de type a) parallèle ou b) angulaire (image SKF).

Le désalignement est l'état résultant d'un arbre rendu excentrique par un assemblage imparfait. Dans la pratique, l'alignement « parfait » des arbres menant et entraîné est irréalisable. Même si la perfection était atteinte initialement, il ne serait pas possible de la maintenir sous des conditions de fonctionnement évolutives en raison de la déformation sous charge et thermique du carter, des paliers et des arbres eux-mêmes. En ce sens, l'éolienne est délibérément désalignée à l'arrêt afin que les arbres de la génératrice et du multiplicateur soient alignés sous des conditions de fonctionnement nominales. Les accouplements flexibles sont utilisés à dessein pour concilier le désalignement réel et transmettre le couple sans glissement.

De nombreux modèles mécaniques ont été développés pour décrire les forces de rappel induites par les défauts de désalignements. Le niveau vibratoire mesuré sur les paliers avoisinant dépend effectivement de ces forces et leur estimation permet non seulement de dresser un lien entre la vibration observée et l'amplitude du désalignement, mais aussi d'estimer l'usure dynamique subie par les autres éléments de la ligne d'arbre. Xu et Marangoni ont déduit ces forces de l'analyse cinématique d'un joint de Hooke [XU 94]. Ce modèle fut ensuite remis en cause de part l'orthogonalité entre le couple d'arbre menant et mené que l'accouplement doit respecter. Ce point étant légitimement

¹Site Internet 2010 : Produit de maintenance et lubrification SKF, http://www.mapro.skf.com/products_f/AL_intro.htm

discutable vis à vis des accouplements flexibles, tel que celui utilisé dans l'éolienne. Les modélisations qui s'en suivirent, plus complexes, s'avèrent nécessiter une connaissance élevée de l'accouplement flexible, menant la plupart des approches pratiques à caractériser le niveau de désalignement à partir de mesures expérimentales sur les forces de rappel générées.

Gu et Al. [GU 06] ont constaté l'influence du désalignement sur les variations de vitesse mesurées selon la méthode temporelle présentée dans la partie 2.2.1.2. Cette observation les conduit à considérer l'amplitude du désalignement comme principalement influente sur la fondamentale de l'arbre instrumenté ainsi que sur ses deux premières harmoniques. Ce point semble entrer en contradiction avec les observations faites en surveillance vibratoire classique, où seuls les multiples paires de la fondamentale apparaissent amplifiés par les problèmes d'alignement. Il est proposé dans cette section d'approfondir la connaissance de ce défaut en matière d'observation de vitesse instantanée, en limitant néanmoins l'étude à l'analyse des défauts d'alignement de type angulaire. Une approche théorique basée sur le modèle du joint de cardan détermine la localisation cyclique et l'amplitude des composantes fréquentielles induites par les variations de vitesse d'un système mécanique désaligné angulairement. Ces résultats seront confrontés aux résultats expérimentaux apportés par un banc d'essais muni d'un tel joint de cardan.

4.2.1 La modélisation du joint de cardan

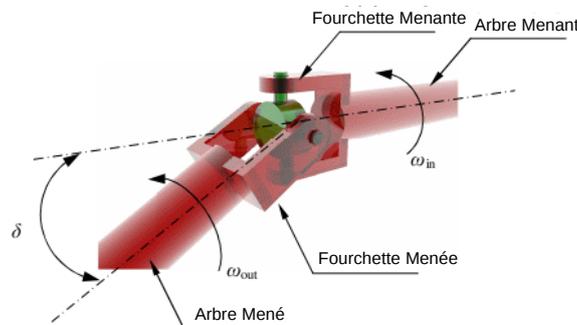


FIG. 4.2: Représentation d'un joint de cardan sous sa forme substantielle

Le joint de cardan, illustré sur la figure 4.2, est un dispositif mécanique qui permet la transmission d'une rotation angulaire entre deux arbres dont les axes géométriques concourent en un même point. L'angle formé par les fourchettes d'un joint de Cardan est reconnu pour provoquer une non-linéarité de la vitesse angulaire d'un arbre par rapport à l'autre. Le joint de cardan est un modèle mécanique simple qui représente néanmoins l'influence du désalignement angulaire sur les variations de vitesse d'un système. Le raisonnement menant à l'équation de mouvement d'une telle liaison s'appuie l'orthogonalité

que respecte l'angle des deux fourchettes à tout instant ² et permet de proposer une relation différentielle entre la vitesse de sortie et la vitesse d'entrée associée à la position angulaire de l'arbre d'entrée θ_{in} , rapportée dans l'équation 4.1 :

$$\omega_{out}(\omega_{in}, \theta_{in}) = \omega_{in} \cdot \frac{\cos \delta}{1 - \sin^2 \delta \cdot \cos^2(\theta_{in})} \quad (4.1)$$

où δ est l'angle de désalignement. Si l'on considère que δ et ω_{in} sont constants, la vitesse de l'arbre de sortie devient indubitablement périodique et se prête parfaitement à une analyse harmonique suivant une décomposition en série de Fourier. Les coefficients de Fourier complexes qui décrivent l'évolution de ω_{out} sont définis tels que :

$$c_n = \int_{-\pi}^{\pi} \omega_{in} \cdot \frac{\cos \delta}{1 - \sin^2 \delta \cdot \cos^2(\theta)} e^{-i \cdot n \cdot \theta} d\theta \quad (4.2)$$

La parité de la fonction intégrée prouve que les coefficients de Fourier impairs sont tous nuls. Les coefficients pairs sont ici obtenus par une méthode de résolution numérique classique³. L'évolution des ordres 2, 4 et 6 de la vitesse de rotation sont présentés par la Figure 4.3 selon une échelle logarithmique en fonction de l'angle de désalignement subi par le joint de cardan. Ces résultats sont obtenus sous l'hypothèse que la vitesse d'entrée est constante.

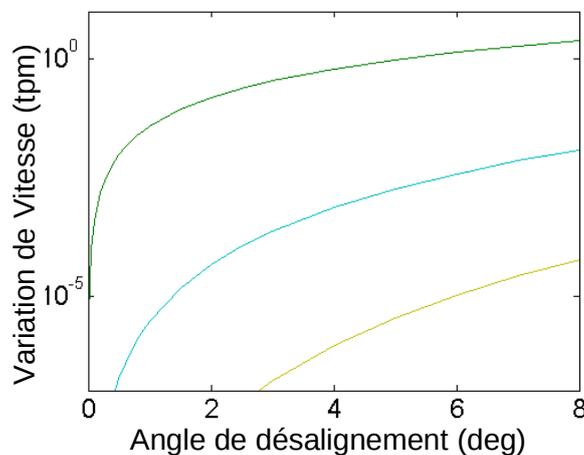


FIG. 4.3: Évolution de l'amplitude des coefficients de Fourier en fonction de l'angle de désalignement. Résultats obtenus pour $\omega_{in} = 500$ tpm. \circ c_2 , \circ c_4 , \circ c_6

Si l'on observe la vitesse angulaire instantanée d'un système rigide dont l'unique variation est celle induite par le joint de cardan, il n'est aujourd'hui pas difficile de

²l'équation du mouvement est correctement détaillée sur Wikipedia : http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_joint

³réalisée sous MAPPLE

déterminer l'angle caractérisant le désalignement angulaire avec précision.

Néanmoins, un très grand nombre d'incertitudes différencie ce modèle simpliste d'un accouplement réel. Les accouplements flexibles (en flexion) sont par exemple loin d'être rigide en torsion. Celui qui sert de fusible entre le multiplicateur et la génératrice de l'éolienne et dont les caractéristiques sont précisées dans l'annexe D.1.3.2 en particulier. La déformation torsionnelle de l'accouplement ne permet plus de considérer l'orthogonalité entre ce qui tenait lieu de fourchettes dans le joint de cardan, et prive par conséquent le système de son équation de mouvement. Même dans le cas du joint de cardan, les liaisons sont imparfaites et le rapport cinétique n'est que théorique.

Ensuite, Même sous des conditions stationnaires, la vitesse de l'arbre d'entrée peut être perturbée par des phénomènes vibratoires dont la fréquence cyclique coïncide avec celles concernées par le désalignement angulaire. Typiquement, les défauts de faux-rond ou ceux d'engrènement localisés introduiront des composantes vibratoires qui s'ajouteront aux composantes synchrones du désalignement angulaire. De la même manière, les défauts géométriques du capteur angulaire abordés dans la partie 4, même s'ils ne correspondent pas à un phénomène vibratoire réel, risquent de perturber les composantes fréquentielles en question si le codeur est installé directement sur l'arbre de sortie.

Enfin, il est intéressant de noter que l'équation de mouvement définie par l'équation 4.1 introduit un produit de convolution sur le spectre de la vitesse de l'arbre d'entrée. Ainsi, les spectres des phénomènes vibratoires initiés sur l'arbre d'entrée et observés par un capteur sur l'arbre de sortie (ou au delà) seront modulés par les fréquences caractéristiques du désalignement angulaire.

4.2.2 Résultats expérimentaux

Conscient des approximations imposées par l'approche proposée, l'espoir de pouvoir quantifier l'évolution d'un désalignement angulaire via l'évolution de la vitesse instantanée reste réaliste. Une campagne d'essais a été menée sur le banc d'essais boîte de vitesses, présenté dans l'annexe D.1.1, avec les angles de désalignement suivant : $\delta = 0^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ, 1.5^\circ, 2^\circ, 2.5^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ, 7^\circ, 8^\circ$. Le moteur électrique impose une vitesse de rotation « constante » à l'entrée du joint de cardan tandis que la génératrice applique un couple stationnaire à la ligne d'arbre⁴. Les résultats obtenus à partir des capteurs angulaires C1 et C3, respectivement installés sur l'arbre primaire et sur l'arbre de pont de la boîte de vitesses, sont présentés conjointement à ceux obtenus avec un accéléromètre placé sur le carter de la boîte de vitesses.

⁴500 t/min et 50 N.m

4. Étude Expérimentale

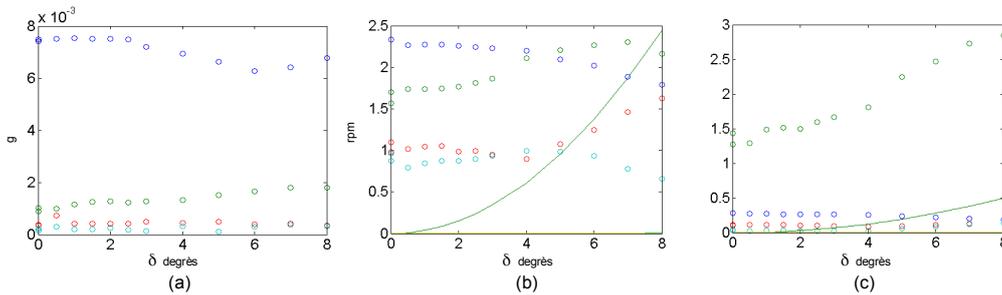


FIG. 4.4: Amplitude des coefficients spectraux correspondant aux 4 premiers ordres de l'arbre primaire, en fonction de l'angle de désalignement sur un observation a) vibratoire, b) de variation de vitesse avec le capteur C1 et c) de variation de vitesse avec le capteur C3. ○ H1, ○ H2, ○ H3, ○ H4

La figure 4.4 présente l'évolution de l'amplitude correspondant aux quatre premiers ordres de l'arbre primaire, en fonction de l'angle de désalignement. Le graphe de gauche présente les résultats obtenus à partir du capteur accélérométrique échantillonné angulairement, tandis que les graphes de droite présentent les résultats obtenus à partir des capteurs angulaires, par la méthode du périodometre. Sur ces deux derniers graphes, l'amplitude théorique des coefficient spectraux « d'ordre deux » est représentée par une courbe continue.

En terme de tendance, les résultats obtenus à partir du capteur angulaire sont en accord avec la théorie : les amplitudes représentant l'ordre 2 de l'arbre primaire augmentent avec l'angle de désalignement. L'évolution des autres harmoniques sont caractéristiques de l'influence de la fonction de transfert sur le signal vibratoire. Comme souligné par la communauté scientifique en introduction, le désalignement modifie le comportement vibratoire globale de la structure de sorte que l'évolution des composantes spectrales soit difficile à cerner tant que le système est considéré rigide. La figure 4.5 présente les spectres d'amplitude de chaque signal pour l'angle de désalignement nul. La sensibilité particulière du capteur le plus éloigné au désalignement s'explique alors par la coïncidence d'une zone de résonance avec l'ordre 2 de l'arbre primaire.

4.2.3 Bilan

Bien que les angles de désalignement expérimentés dans cette section soient largement supérieurs aux niveaux critiques de désalignement angulaire que peut admettre une ligne d'arbre d'aérogénérateur, cette étude propose une première approche de la surveillance par vitesse instantanée d'un tel défaut.

La variation de vitesse à la sortie du joint de cardan fut théoriquement déterminée sous réserve que le joint soit rigide en torsion et que la vitesse de l'arbre d'entrée soit

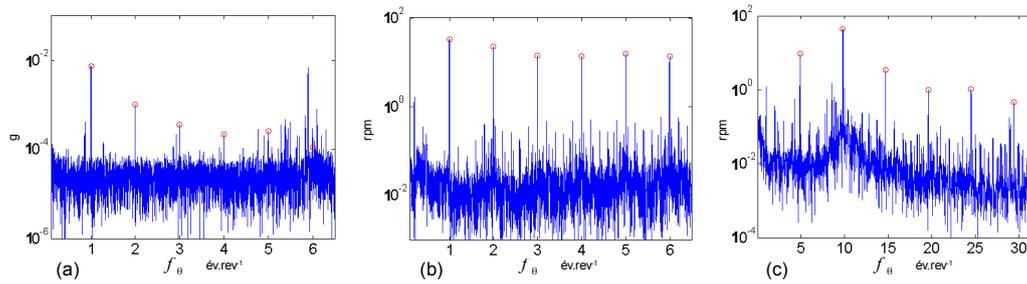


FIG. 4.5: Spectre d'amplitude d'une observation a) vibratoire, b) de variation de vitesse avec le capteur C1 et c) de variation de vitesse avec le capteur C3. l'angle de désalignement est nul.

constante. Dans la pratique, cette information ne s'avère pas suffisante pour assurer la détermination de l'angle de désalignement à partir d'une mesure arbitraire de la vitesse instantanée pour deux raisons. Non seulement les signaux sont perturbés par d'autres phénomènes dont les fréquences cycliques coïncident avec celles du désalignement, mais la voie de transfert complexe qui sépare le joint du capteur angulaire influence également aussi ces variations de vitesse.

Si les résultats expérimentaux montrent que la mesure de vitesse instantanée ne permet pas aujourd'hui de mesurer directement l'angle de désalignement, il reste envisageable d'utiliser cette mesure pour surveiller son évolution au cours du temps, par le suivi comparatif des premiers ordres de l'arbre concerné. Les résultats obtenus avec le capteur magnétique, pourtant de moins bonne facture que le codeur optique, montrent que la position du capteur angulaire est prépondérante. Il serait évidemment intéressant d'appuyer cette réflexion sur l'analyse d'un modèle mécanique de la ligne d'arbre instrumentée, détaillant la localisation fréquentielle des modes de résonance torsionnelle et la localisation spatiale des ventres de vibration associés.

4.3 Défaut d'engrènement

L'engrènement fait partie intégrante de l'industrie des machines tournantes et une grande partie des aérogénérateurs nécessite aujourd'hui encore une transmission par engrenages pour multiplier la vitesse de rotation entre l'arbre lent, porteur des pales, et l'arbre de la génératrice. Dans la partie 1.2.1, un historique des indicateurs développés pour la surveillance de défaut d'engrènement a souligné l'importance d'adapter la surveillance à la forme prise par le défaut. Dans ce chapitre expérimental, il est question de vérifier pragmatiquement la forme que prennent les variations de vitesse associées à des défauts d'engrènement jugés caractéristiques. Quatre indicateurs simples, s'appuyant sur les outils développés dans le chapitre 3, sont testés sur la surveillance de vitesse instantanée et comparés aux résultats obtenus en surveillance vibratoire.

4.3.1 Étude de la forme des défauts d'engrènement

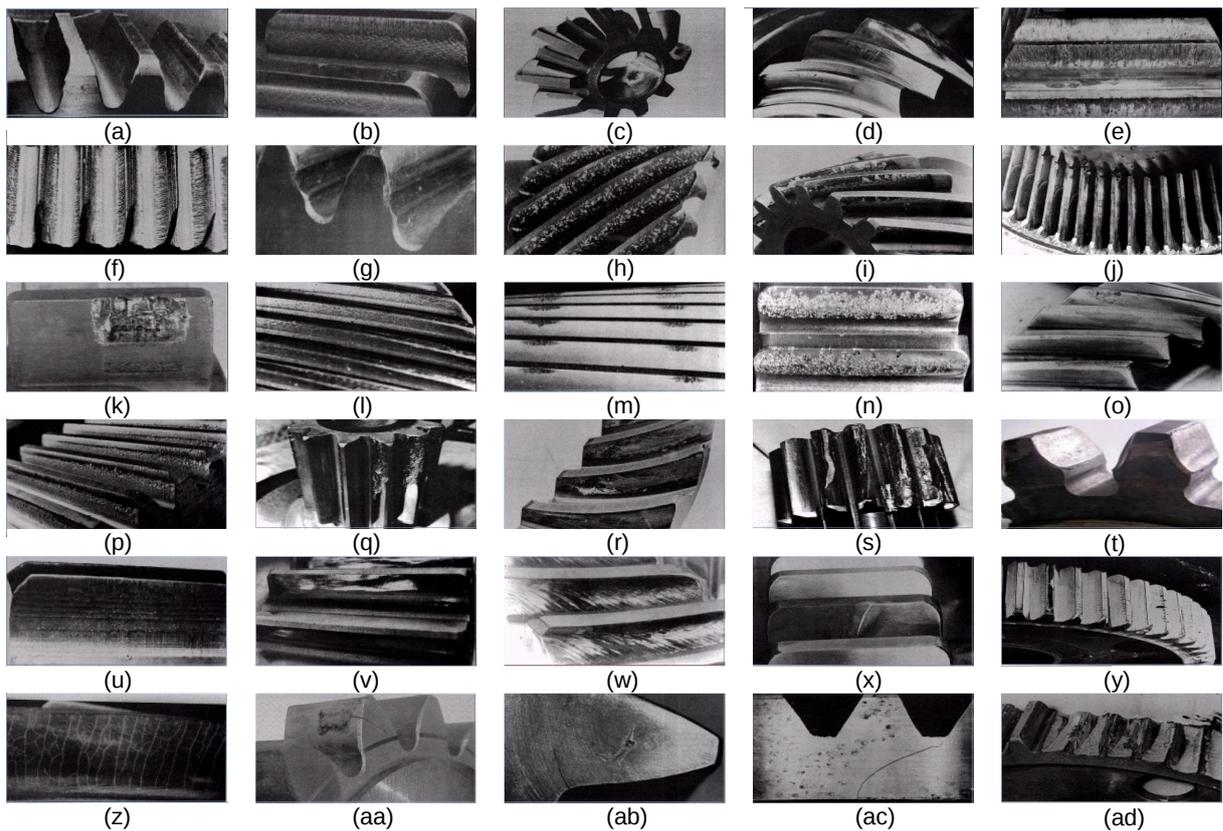


FIG. 4.6: Illustration des différents types de défaut d'engrènement. Les légendes sont explicitées dans la table 4.1

Groupe	Nom	Cause	Danger	Photo
usure	Usure courante	Vieillessement normal	-	a
	Stries ou rayures	Pression importante	-	b
	Poli miroir	Contact à faible vitesse	-	c
	Arrachement	Surcharge → Absence de lubrifiant	+	d
	Grippage	Rupture du film de lubrifiant	++	e
	Usure Abrasive	Lubrifiant souillé	+	f
	Usure par interférence	Problème de conception	+	g
Corrosion	Rouille	Attaque chimique	+	h
	Pelage	Oxidation pendant le trait ^t thermique	+	i
	Corrosion de contact	Vibration lors d'arrêt prolongé	+	j
Surchauffe		Survitesse, surcharge et mauvaise lubrification	+	k
Érosion	Cavitation	Gaz dans le lubrifiant		l
	Erosion par impact	Lubrifiant projeté trop fort	+	m
L'Étincelage		Arc électrique	+	n
Fatigue	Micro Pique	Alternance de fortes charges	+	o
	Piqures	Alternance de fortes charges	++	p
	Ecaillage	Initiation par des fissure internes	+++	q
	Dislocation	Contraintes de cisaillem ^t trop élevées	+++	r
Déformation permanente	Emprunte	Corp étranger	+++	s
	Déformation plastique	Pression trop élevée	++	t
		Surcharge et à-coups	++	u
	Broutage	Fortes contraintes en compression et cisaillement	+	v
	Sillon	Glissement trop élevé	+	w
Fissures	Fissure de forge	Repli de matière	+	x
	Tapure de trempe	Matériau non homogène	++	y
	Crique de rectification	Défaut d'usinage	++	z
	Crique de surface	Frottement mal lubrifié	+++	aa
	Fatigue en pied	Contraintes en pied de dent	+++	ab
	Fissure de jante	Jante trop fine	+++	ac
La rupture, fatale			+++	ad

TAB. 4.1: Défauts d'engrènement typiques.

Nombre de scientifiques et industriels se sont intéressés aux défaillances que rencontrent les couples d'engrènement [FAU 92]⁵. Entre les anomalies de fonderie, d'usinage ou de lubrifiant, les maladresses de dimensionnement, les sollicitations électriques,

⁵ associée à une source Internet : Gear Failure, Gear Failure Analysis, Why Gear Failure, Minimize Gear Failure, 2011, <http://www.gearshub.com/gear-failure.html>

4. Étude Expérimentale

mécaniques ou thermiques induites par d'autres éléments, les défauts d'engrènement prennent des formes aussi diverses que leurs causes, éventuellement combinées, sont variées. À titre informatif plus qu'exhaustif, la figure 4.6 associée à la Table 4.1 illustre les défauts les plus connus. La colonne « Danger » de la Table 4.1 estime qualitativement le risque que représente un type de défaut vis à vis de la pérennité de l'engrenage et donc de la structure mécanique associée.

Bien que l'objectif de cette partie soit de tester la capacité d'identifier la nature d'un défaut d'engrènement, l'étude se limite à la simulation de quelques défauts parmi les plus dangereux.

- Pignon 1 : sain, est utilisé comme étalon.
- Pignon 2 : avec dent arrachée (la dent est fraisée au niveau du pied)
- Pignon 3 : avec dent partiellement arrachée (une portion de la dent est fraisée au niveau du pied)
- Pignon 4 : avec Fissure en pied de dent (une entaille entame 20% de l'épaisseur du pied de dent, sur toute la largeur de la dent)
- Pignon 5 : usure répartie sur l'ensemble des dents (toutes les dents sont lourdement endommagées en surface)

Issue de la présentation détaillée en annexe D.1.2, le schéma cinématique du banc d'essais GDS est exposé sur la figure 4.7. Les pignons 1 à 5 sont installés sur l'arbre du moteur électrique et du codeur C1.

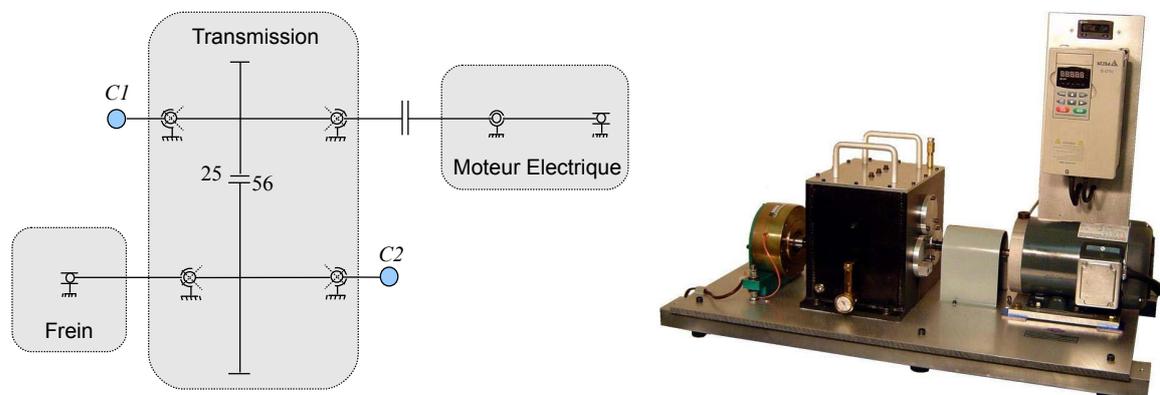


FIG. 4.7: Schéma cinématique du banc d'essais GDS

De l'expérience apportée par la surveillance vibratoire conventionnelle, on s'attend à surveiller les pignons 1 et 5, dont l'énergie vibratoire est répartie sur l'ensemble des dents, au niveau de sa fréquence d'engrènement ; tandis que les pignons 2,3 et 4 dont la physiologie d'une dent se démarque des autres, invite à observer l'évolution de la fréquence de l'arbre porteur du pignon défectueux. Une première observation de la vitesse de rotation, illustrée par la Figure 4.8, confirme ce raisonnement en présentant l'évolution angulaire de la vitesse de rotation de l'arbre entraîné par le pignon défectueux. Particulièrement visible

dans le cas du défaut localisé, illustré par le graphe d), le choc correspondant au défaut est suivi d'une résonance évanescence similaire aux résonances structurales vibratoires typiquement mises en évidence par la méthode d'enveloppe en surveillance classique.

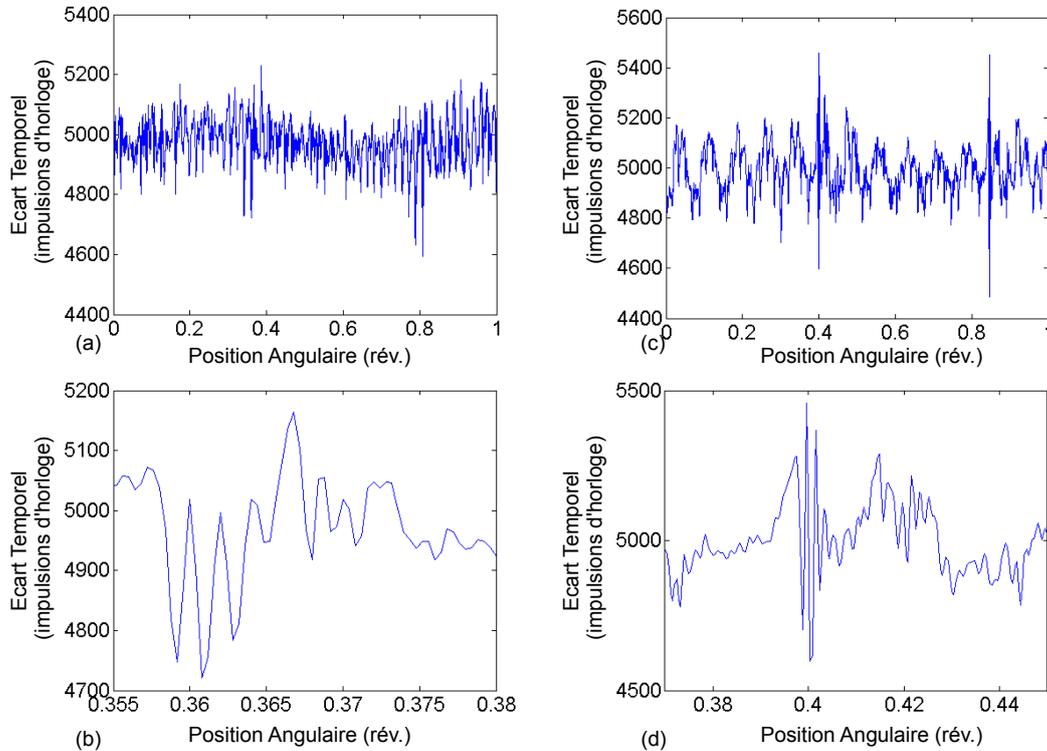


FIG. 4.8: Observation angulaire de la vitesse de rotation de l'arbre 2 4.1 pour différents défaut. a) et b) pignon 5 avec défaut réparti. c) et d) pignon 2 avec une dent arrachée.

4.3.2 Application expérimentale

4.3.2.1 Protocole expérimental

Bien que deux capteurs angulaires soient disponibles, seuls les résultats obtenus à partir de celui installé sur l'arbre de frein sont abordés⁶. Toutes les mesures sont effectuées sous des conditions de couple et de vitesse constantes, identiques⁷ et relativement faibles. L'amplitude de variation de vitesse ayant expérimentalement été observée plus haute sur cette zone de fonctionnement à vitesse faible, ce paramétrage permet de diminuer l'influence du phénomène de quantification, à fréquence de compteur constante.

Parallèlement à chacune des mesures de vitesse instantanée est effectuée une acquisition vibratoire, si bien que les résultats pourront être comparés conjointement.

⁶les résultats obtenus à partir de l'autre capteur angulaire ne présentent pas de différences suffisantes pour justifier leur introduction.

⁷900tpm sur l'arbre moteur, 6Nm de couple résistant sur l'arbre de frein

L'accéléromètre est échantillonné sur une base temporelle, ce qui ne pose pas de problème tant que les conditions de fonctionnement sont stationnaires.

Un signal vibratoire échantillonné à $10kHz$ de $2 \cdot 10^6$ échantillons représente la même durée qu'un signal ET constitué de $3 \cdot 10^6$ échantillons obtenus à partir du capteur angulaire de l'arbre de frein, sous cette condition de vitesse. Cette correspondance permet aux résolutions spectrales des mesures vibratoires de coïncider avec celles des mesures de vitesse instantanée.

Pour vérifier la répétabilité des observations, chaque pignon est testé six fois. Les résultats obtenus pour un même pignon sont assimilés à six réalisations d'une même loi normale. Les résultats sont donc présentés par la moyenne empirique associée à l'estimation d'un intervalle de confiance à 60%. Enfin, pour noyer l'influence de l'opérateur sur la structure mécanique rendue inéluctable à chaque changement de pignon, les pignons sont changés entre chaque test. Ainsi, les variances plus faibles qui peuvent marquer certains résultats ne peuvent être imputées à l'absence de manipulation entre certaines mesures.

4.3.2.2 Présentation des indicateurs

Quatre indicateurs sont mis à l'épreuve dans la partie suivante. Inspirés de ceux classiquement utilisés dans les outils de surveillance conventionnels, ces indicateurs ne présentent ni difficulté, ni nouveauté, en ce qu'ils consistent simplement à relever l'amplitude d'une ou plusieurs composantes spectrales.

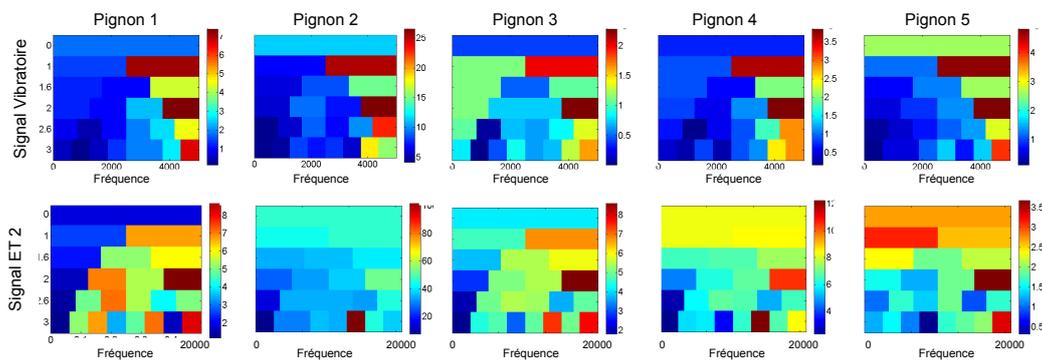
1. S_{H1} : amplitude de la composante fondamentale du spectre d'amplitude.
2. S_{H12} : somme des amplitudes des 12 premières harmoniques du spectre d'amplitude.
3. E_{H1} : amplitude de la composante fondamentale de l'enveloppe spectrale.
4. E_{H12} : somme des amplitudes des 12 premières harmoniques de l'enveloppe spectrale.

Ayant vérifié empiriquement que l'énergie vibratoire induite par l'engrènement, sous ces conditions de fonctionnement, est concentrée dans une bande fréquentielle plus fine que ne l'est la résolution spectrale optimale des observations, le périodogramme moyenné n'apporte pas d'avantage vis à vis du spectre d'amplitude.

L'enveloppe est obtenue à partir de la même bande fréquentielle d'un défaut à l'autre pour que les amplitudes respectivement obtenues soient comparables. La méthode du kurtogramme, présentée dans la partie 3.4.2 comme extensible aux signaux de variation de vitesse, est utilisée pour optimiser le choix de cette bande fréquentielle. La table 4.2 présente les kurtogrammes moyennés sur les 6 mesures de chaque pignon. En ne modifiant que la nature de l'excitation, il est cohérent que les zones marquées par de forts kurtosis ne se déplacent pas en fonction du pignon : sous des conditions de fonctionnement stationnaires, seule la voie de transfert séparant l'excitation du capteur

influe sur la position des zones de résonance.

Parmi l'ensemble des tests, les résultats obtenus par le pignon 2, dont une dent est arrachée, présente logiquement des niveaux plus élevés et est ainsi suspecté d'exhiber la zone de concentration d'énergie. Ainsi, les signaux vibratoires sont démodulés par le filtre de niveau 2 centré sur $4,5kHz$ tandis que les signaux de vitesse sont démodulés par le filtre de niveau 3 centré sur $14,5kHz$. Le choix de ces bandes fréquentielles peut être discuté, tout autant que le fait de baser l'indicateur sur l'enveloppe plutôt que directement sur le kurtogramme.



TAB. 4.2: Kurtogramme des signaux vibratoires et Écart Temporel pour chaque type de défaut.

4.3.2.3 Résultats

Les résultats sont regroupés dans les quatre graphes de la figure 4.9. Pour chaque type de capteur, les indicateurs sont appliqués à la fréquence de rotation de l'arbre moteur sur les graphes de gauche, puis à la fréquence de l'engrènement sur les graphes de droite. Sur chaque graphe, les résultats sont regroupés par les indicateurs dont la terminologie fut présentée dans la partie précédente. Pour faciliter la comparaison, la hauteur des barres est normalisée par la valeur moyenne maximale atteinte dans le groupe qui les contient. Les intervalles de confiance, matérialisés par une barre verticale entourant les valeurs moyennes, sont respectivement normalisés par le même ratio. L'analyse de cette figure conduit aux caractéristiques suivantes :

1. tous les indicateurs associés à la mesure vibratoire de la fondamentale de l'arbre moteur (graphe c) confirment la nature du défaut du pignon 2, le plus gravement atteint. Néanmoins, les autres défauts localisés apparaissent en retrait devant le pignon 5 (défaut réparti).
2. Les observations en vitesse instantanée de la fondamentale de l'arbre moteur (graphe a) ne valorisent pas autant le pignon 2. Il est néanmoins cohérent de suspecter les pignons 3 et 5 de cumuler un défaut de faux rond (ou d'excentricité),

La possibilité d'employer la méthode d'enveloppe est particulièrement bénéfique à cet usage, et permet une analyse similaire à celle bien connue de l'industrie en matière de surveillance vibratoire. Néanmoins, la technique de l'enveloppe se situe aux limites du système d'acquisition car nécessite un capteur de résolution élevée, et de ce fait une horloge compteur encore plus élevée, pour réduire le phénomène de quantification.

4.4 Défaut de roulement

Maia Eolis, à l'image du secteur de l'éolien industriel, est une société récente dont les parcs les plus anciens fonctionnent depuis moins de six ans : cette courte expérience s'avère suffisante pour constater que les premiers éléments mécaniques à présenter des signes de fatigue sont les paliers à roulement. En effet, le palier à roulement est indubitablement l'élément le plus sensible de la transmission mécanique, et la détection des défauts qui lui sont associés par la surveillance en vitesse instantanée est certainement l'argument idéal pour soutenir le développement de cette nouvelle technologie.

Avant de considérer les mesures non stationnaires de l'éolienne, cette section vise en premier lieu à analyser la sensibilité de ce nouveau procédé vis à vis de la gravité du défaut de roulement.

Comme précédemment, les résultats obtenus par variation de vitesse sont confrontés à ceux obtenus par surveillance vibratoire classique. En outre, l'expérimentation sous différentes conditions de fonctionnement (toutes stationnaires) permet d'introduire l'étude expérimentale, sous conditions non stationnaires, qui sera abordée par la suite. Enfin, cette étude est l'occasion de tester la sensibilité de différents indicateurs vis à vis des défauts localisés de roulement.

Les questions ci-dessous résument la ligne conductrice dirigeant cette étude préliminaire.

1. comment un défaut localisé de roulement peut-il influencer les variations de vitesse ?
2. l'analyse des variations de vitesse instantanée peut-elle suivre l'évolution d'un défaut de roulement ?
3. cette surveillance continue peut-elle être effectuée sous différentes conditions de fonctionnement ?

Cette section, organisée en trois parties, introduit tout d'abord le contexte ainsi que les axes de recherche ciblés par cette étude. Deux campagnes de mesures sont présentées dans la seconde partie avant que les principaux résultats ne soient discutés en fin de section.

4.4.1 Analyse théorique et prospective des manifestations de défaut sur la vitesse instantanée

4.4.1.1 Localisation fréquentielle du défaut de roulement

Fréquences cycliques caractéristiques

Dans la plupart des cas, la dégradation se traduit par un défaut localisé sur l'une des bagues ou sur l'élément roulant du roulement [McF 84]. Prenant la forme d'une légère indentation ou d'un arrachement prononcé de matière, ces défauts produisent un choc

dont la fréquence d'apparition les caractérisent. Les équations cinématiques reliant les constituants de l'élément roulant traduisent ces fréquences caractéristiques en fonction de la rotation de l'arbre porteur du roulement. La table 4.3 résume les différentes fréquences cycliques, en fonction de l'élément surveillé et de la nature du roulement, qui sont généralement sous surveillance. Les fréquences caractéristiques des roulements coniques sont explicitées dans l'Annexe D.1.1.4, car plus difficiles à trouver dans la littérature.

Sous élément	roulement à bille	Roulement à rouleau conique
Bague Intérieure	$\frac{N}{2} \left(1 + \frac{D_B}{D_C} \cos\alpha \right)$	$N \left(1 - \frac{\sin(\kappa-\epsilon)}{2 \cdot \sin(\kappa) \cdot \cos(\epsilon)} \right)$
Bague Extérieure	$\frac{N}{2} \left(1 - \frac{D_B}{D_C} \cos\alpha \right)$	$N \frac{\sin(\kappa-\epsilon)}{2 \cdot \sin(\kappa) \cdot \cos(\epsilon)}$
Élément Roulant	$\frac{D_C}{D_B} \left(1 - \left(\frac{D_B}{D_C} \cos\alpha \right)^2 \right)$	$\frac{\sin(\kappa-\epsilon)}{\cos(\epsilon) \sin(\epsilon)}$
Cage	$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{D_B}{D_C} \cos\alpha \right)$	$\frac{\sin(\kappa-\epsilon)}{2 \cdot \sin(\kappa) \cdot \cos(\epsilon)}$

TAB. 4.3: Fréquences cycliques caractéristiques d'un palier a) à bille, b) à rouleaux coniques.

Ces fréquences caractéristiques cycliques, dont les paramètres sont présentés dans la figure 4.10, sont le plus souvent renseignées par le roulementier qui préfère ne pas divulguer les dimensions internes du roulement, par soucis de confidentialité.

Les fréquences caractéristiques sont respectées tant que les éléments roulants se déplacent sans glissement relatif et que les dimensions géométriques qui paramètrent ces fréquences correspondent aux dimensions nominales. Bien qu'aucune de ces deux hypothèses ne soient réellement respectées, l'utilisation de système de surveillance basé sur un échantillonnage temporel ne permet pas d'atteindre une précision suffisante pour les remettre en cause.

Influence du glissement sur la localisation fréquentielle

Le glissement étant une caractéristique inhérente du contact elasto-hydrodynamique, il affecte tous les paliers à roulements sains⁸. Dans le cas d'un roulement à contact oblique dont l'angle dépend de la position angulaire de l'élément roulant vis à vis de la zone de charge maximale, Biboulet rappelle que le taux de glissement peut localement atteindre 5%⁹ [BIB 08]. Dans le cas particulier des éoliennes, plusieurs conditions sont susceptibles de prononcer le glissement des éléments roulants. Les efforts tangents induits par les engrènement peuvent s'opposer au poids de l'arbre, affaiblissant ainsi

⁸Une exception, d'ordre théorique, peut éventuellement se dresser en faveur des paliers cylindriques droits qui ne subissent aucune charge axiale et dont les bagues sont parfaitement alignées

⁹le taux est généralement défini comme la différence des vitesses tangentielle en contact divisée par la somme de ces mêmes vitesses.

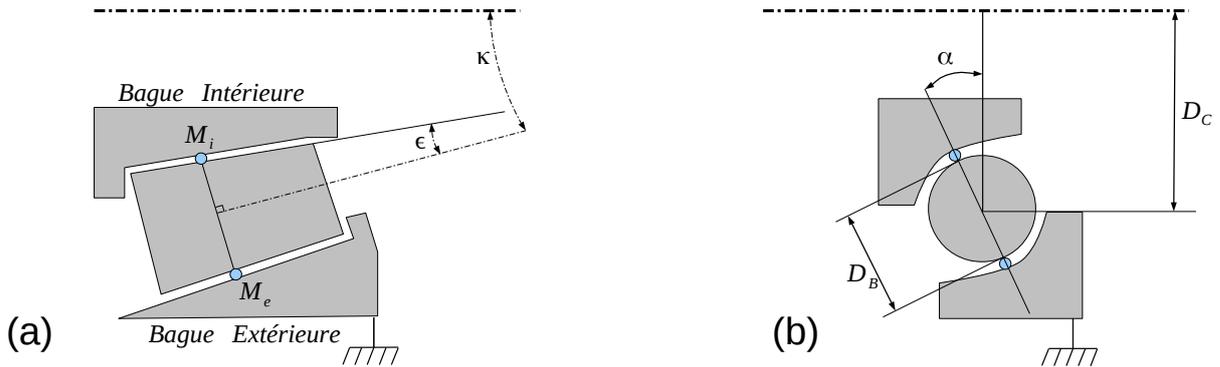


FIG. 4.10: Schéma du roulement a) à contact linéique puis b) à contact ponctuel.

la pré-charge du roulement et augmentant de fait le taux de glissement [DOL 08]. Les efforts transitoires associés au comportement erratique du vent peuvent aussi causer des déchargements momentanés du palier et générer des conditions où les éléments roulants admettent un taux de glissement élevé. Enfin, les roulements fonctionnant sous des charges radiales inférieures à celles utilisées pour leur dimensionnement sont de manière générale susceptibles d'admettre un taux de glissement plus élevé. Les conditions de fonctionnement peuvent donc être une source de variabilité fréquentielle.

En marge du taux de glissement, les déformées quasi statiques de l'arbre et du roulement induites par la charge appliquée à chacun d'eux influencent directement l'angle de contact α des roulements à bille à contact oblique. Ces chargements évoluant avec les conditions de fonctionnement, les fréquences caractéristiques définies dans la table 4.3 varient aussi avec les conditions de fonctionnement. Le même type de relation peut être mis en place pour les roulements coniques en tenant compte de la géométrie complexe de l'élément roulant et des cages. La figure 4.11 illustre l'influence d'un désalignement sur le positionnement des points de contact de l'élément roulant bombé. Les fréquences caractéristiques correspondant aux situations illustrées dans les graphes b) et c) sont estimées pour le roulement du banc « boîte de vitesses » en considérant l'élément roulant purement conique ¹⁰.

$$f_{BPF1} \in [7.252; 7.258] \text{ évènements par tour.} \quad (4.3)$$

Influence de la gravité du défaut sur la localisation fréquentielle

La littérature montre que le taux de glissement peut aussi augmenter en présence d'un défaut. Dans le cas du grippage, stade très avancé d'un défaut réparti de roulement susceptible d'entraîner une dégradation brutale de la ligne d'arbre, le frottement a

¹⁰par manque de données géométriques, les chanfreins de l'élément roulant ne sont pas pris en compte.

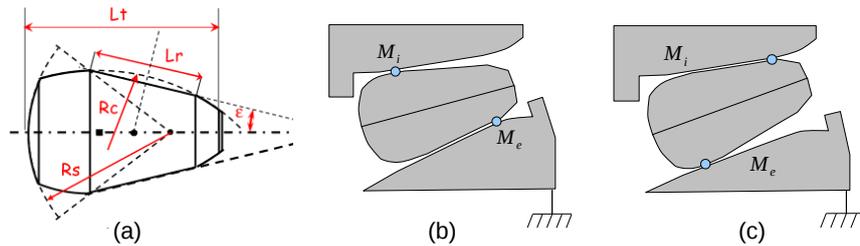


FIG. 4.11: a) Schématisation précise d'un élément roulant conique. b) c) illustration de l'influence d'un désalignement sur les positions de contact.

tendance à ralentir la partie dégradée [DOL 08]. Le défaut se manifeste donc à une fréquence inférieure à la fréquence caractéristique que le roulement admettrait s'il était sain. En matière de surveillance accélérométrique, bien que la littérature n'offre pas de démonstrations expérimentales présentant de tels résultats, Meyer et Al ont montré qu'un roulement à bille parfait¹¹ présente théoriquement un phénomène vibratoire dont la fréquence cyclique correspond à la fréquence fondamentale de passage de la piste statique [MEY 80]. Ce phénomène est alors, toujours en théorie, quasi-exclusivement concentré sur la fréquence fondamentale, de par le caractère clairement sinusoïdal induit par le déplacement de l'élément roulant dans la zone de charge maximale.

Ainsi, l'évolution de la fréquence caractéristique peut possiblement être utilisée afin d'établir la gravité d'un défaut via l'évolution du taux de glissement : la variation de localisation fréquentielle est alors représentative du défaut, et peut être incorporée dans un indicateur. Il est probable que cette analyse ne soit néanmoins valide que sous des conditions de fonctionnement identiques.

4.4.1.2 Diagnostique d'un élément sous différentes conditions de fonctionnement.

La détection d'un défaut avancé de roulement fut expérimentalement proposée sous des conditions largement non stationnaires à partir d'une observation spectrale de la vitesse instantanée [REN 10]. Plus précisément, ces premiers résultats mènent à croire qu'il est possible de différencier deux niveaux de gravité de roulement sous des conditions de fonctionnement non stationnaires, en comparant l'amplitude spectrale des fréquences caractéristiques surveillées.

Néanmoins, les conditions de fonctionnement sont susceptibles d'altérer la voie de transfert qui sépare l'élément défectueux du capteur angulaire. L'excitation de la structure par l'élément défectueux peut aussi dépendre des conditions de fonctionnement. Les comparaisons de Renaudin et al. sont effectuées sous les mêmes conditions non stationnaires, si bien qu'une éventuelle zone de résonance n'avantagera pas une mesure plutôt

¹¹les bagues internes et externes étant considérées circulaires, les éléments roulants sphériques et réguliers, l'arbre et l'alésage parfaitement alignés

que l'autre. Mais dans l'optique d'étendre ce résultat à tout type de mesures non stationnaires, il peut être prudent de vérifier l'influence des conditions de fonctionnement sur l'observation d'un élément défectueux. Une première campagne de mesure est réalisée en ce sens sur un roulement présentant un défaut naturel, sur le banc d'essais boîte de vitesses présenté dans l'annexe D.1.1

4.4.1.3 Génération d'un défaut de roulement naturel

Dans la littérature, l'auteur n'a trouvé que peu de publications évaluant la sensibilité d'un procédé de surveillance vis à vis de différents niveaux de gravité d'un défaut de roulement apparu naturellement. Et pour cause, les bancs de cyclage permettant de contrôler la génération de défauts naturel sur les éléments roulants sont extrêmement coûteux. En outre, l'aspect naturel de ce genre de défaut reste limité tant qu'il n'est pas accompagné d'un procédé de vieillissement tout aussi complexe à mettre en œuvre. Il est fort probable que si des résultats existent dans ce domaine, ils soient maintenus à la discrétion des industriels qui les ont financés.

Toutefois, plusieurs travaux expérimentaux proposent d'analyser la sensibilité d'un outil de mesure en basant l'expérience sur des roulements dont les défauts sont simulés. Récemment, Mba s'est par exemple intéressé à l'estimation de la taille d'un défaut par des moyens de surveillance par émission acoustiques [MBA 08] tandis que Kilundu et Al expérimentent l'analyse cyclostationnaire pour graduer quantitativement la gravité d'un défaut [KIL 11].

Influence de la caractéristique macroscopique

À l'image de la figure 4.12, le niveau de gravité du défaut est caractérisé dans les travaux précités par la géométrie macroscopique du défaut : il est ainsi montré que la longueur de la zone fraisée influence la durée de l'excitation tandis que la largeur de la zone fraisée influence son amplitude. En partant du principe que l'aggravation d'un défaut n'est associée qu'à l'accroissement de sa géométrie, il devient cohérent de tester les indicateurs et autres outils de traitement à partir de différents défauts uniquement caractérisés par leur dimension macroscopique.

Néanmoins, les dimensions macroscopiques de l'écaille caractérisent-elles à elles seules un défaut de ce type ? L'état de surface, en particulier, est fortement détérioré quand la matière est arrachée. Le polissage du défaut vieillissant peut *a contrario* diminuer la rugosité du défaut. Tester un système de surveillance à partir d'une simulation dont le seul paramètre évolutif est la taille macroscopique revient à supputer que la sensibilité de ce mode de surveillance à ce paramètre est prépondérante devant l'influence des autres paramètres.

Influence de la caractéristique microscopique

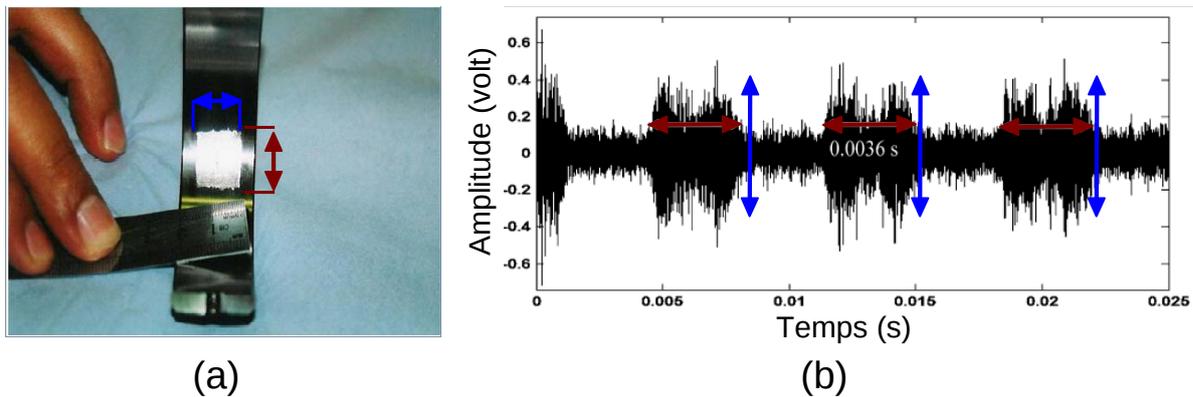


FIG. 4.12: Figure issue des travaux de Mba [MBA 08] où a) un exemple de défaut simulé est associé à b) son observation temporelle par mesure d'émissions acoustiques.

À ce titre, les travaux de thèse de Biboulet ont attiré l'attention de l'auteur sur l'influence que peut avoir la rugosité sur l'observabilité d'un défaut de roulement [BIB 08]. L'analyse rapide de cette étude, disponible dans l'Annexe D.2, souligne l'influence des perturbations microscopiques sur le comportement dynamique de l'ensemble et invite à ne pas négliger les irrégularités de petites tailles lors de la simulation d'éléments défectueux. Dans l'attente d'un modèle mécanique complet liant phénomènes élastohydrodynamique et dynamique structurel, il apparaît nécessaire de surveiller l'influence de deux paramètres sur l'observation du défaut : l'étendue de la surface macroscopique, classiquement considérée comme caractérisant l'avancée d'un défaut de roulement, ainsi que la rugosité, représentative des défauts microscopiques et suspectée d'altérer la qualification de l'avancement d'un défaut par analyse de variations de vitesse.

Présentation des roulements endommagés

Parmi l'ensemble des roulements expérimentés par la suite, six présentent des défauts artificiels. Les roulements dont le défaut est artificiel ont été façonnés sur la bague externe au moyen d'un procédé original d'usinage par électro-érosion. Cette méthode permet non seulement de réguler géométrie et rugosité, mais aussi de générer des empreintes dont la forme se rapproche d'un défaut d'écaillage naturel.

Sur la figure 4.13, la forme globale du défaut naturel d'écaillage présenté par la photographie 4.13 a) apparaît effectivement semblable à ceux simulés des photographies 4.13 b) et c). Bien que les micro cratères induits par les arcs électriques de l'électro-érosion produisent un état de surface d'aspect différent de celui obtenu après un arrachement brutal de matière, les mesures de rugosité sont du même ordre de grandeur. Le fonctionnement, le paramétrage ainsi que la description quantitative des défauts sont amplement détaillés dans l'annexe D.1.1.3. Les caractéristiques de chaque défaut ne sont présentées dans la table 4.4 que de manière qualitative, pour faciliter la lecture de ce chapitre.

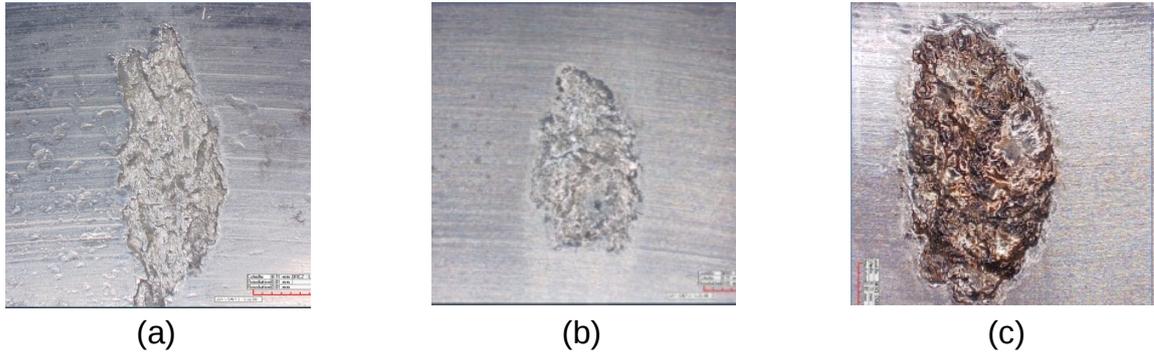


FIG. 4.13: Photographie électronique focalisée sur a) le défaut naturel de la bague 7, b) c) les défauts artificiels des bagues 1 puis 6.

Indice du roulement	Nature	qualificatif macroscopique	qualificatif microscopique
1	Artificiel	très faible	moyen
2	Artificiel	moyen	moyen
3	Artificiel	très fort	moyen
4	Artificiel	fort	très faible
5	Artificiel	fort	fort
6	Artificiel	fort	très fort
7	Naturel	nul	nul
8	Naturel	faible	faible

TAB. 4.4: Description des éléments.

4.4.2 Protocole expérimental

Deux campagnes de mesures ont été réalisées sur le banc d’essais « boîte de vitesses » et sont présentées ci-dessous. Les caractéristiques techniques du banc d’essais ainsi que la localisation des capteurs angulaires sont présentées dans l’Annexe D.1.1.

4.4.2.1 Campagne sur les conditions de fonctionnement

Cette campagne de mesure fut la première réalisée pendant cette thèse, et permet de valider le fonctionnement du système d’acquisition complet avant qu’il ne soit déployé sur l’éolienne. De nombreux progrès ont été réalisés par la suite, mais à ce niveau d’avancement, les mesures étaient limitées à 10^6 points du fait d’un taux de sauvegarde trop important. De ce fait, cette campagne ne présente pas d’étude de répétabilité à l’aide de plusieurs mesures.

L’ensemble des capteurs angulaires ont été mis à l’épreuve à cette occasion, et les

résultats obtenus à partir du capteur de l'arbre primaire (1), ainsi que du capteur de l'arbre de pont (3), seront présentés par la suite. Les accéléromètres 1 et 2 sont tout deux installés à proximité du roulement défectueux, directement sur le carter de la boîte de vitesses. L'échantillonnage angulaire de ces capteurs vibratoires sont simultanément rythmés par les codeurs 1 et 3. Le roulement présentant un défaut naturel de faible amplitude (8) est équipé dans la boîte de vitesses. Les conditions de fonctionnement des 16 mesures réalisées sont respectivement listées dans la table 4.5. Malheureusement, les mesures réalisées à 735 t/min sont ininterprétables par le codeur de l'arbre de pont, qui s'avère ne pas pouvoir délivrer un signal TTL à cette fréquence.

Conditions de vitesse	t/min	300	450	600	735
Conditions de couple	Nm	10	25	31	41

TAB. 4.5: Conditions de fonctionnement de la première campagne de mesure sur les défauts de roulement.

4.4.2.2 Campagne sur les degrés de gravité du défaut

Cette seconde campagne fut réalisée sur le même banc d'essais, un an après la précédente. Ce détail chronologique a d'autant plus d'importance que la boîte de vitesses installée sur ce banc est en fin vie. Ayant subi un grand nombre de séquences de démontage ; les accouplements sont usés, les codeurs rayés, certains pas de vis presque lisses et les arbres de la boîte extrêmement mal alignés. Les conditions de fonctionnement stationnaires¹² ont été testées lors de la première campagne et l'évolution du comportement dynamique de la boîte sous ces conditions est significative. En revanche, le système d'acquisition permet désormais d'effectuer des mesures plus longues et assure une écriture des données rapide. Répétés six fois, les tests sont désormais constitués de $3 \cdot 10^6$ points et ne seront présentés que pour le capteur angulaire, localisé à proximité du défaut. Les mesures accélérométriques angulaires des capteurs vibratoires 1 et 2 sont synchronisées par ce seul codeur optique.

Entre deux tests consécutifs, le banc d'essais est brièvement mis à l'arrêt puis repositionné aux conditions stationnaires prédéfinies. Ainsi, les conditions de vitesse et de couple sont statistiquement équivalentes pour chaque groupe de test. Néanmoins la boîte de vitesses n'est démontée que lorsque le changement de roulement est imposé, si bien que la variabilité des résultats induites par les conditions de montage (serrage des vis, alignement des arbres, ajustement des bagues) est similaire pour les mesures d'un même défaut, mais *a priori* différente d'un défaut à l'autre¹³. La figure 4.14 présente les estimations statistiques normalisées des coefficients spectraux correspondant à l'ordre de

¹²Vitesse de l'arbre rapide : 735 t/min, couple appliqué sur l'arbre rapide : 41Nm

¹³Le préchargement du roulement surveillé est conditionné par le couple de serrage des vis de fixation du carter

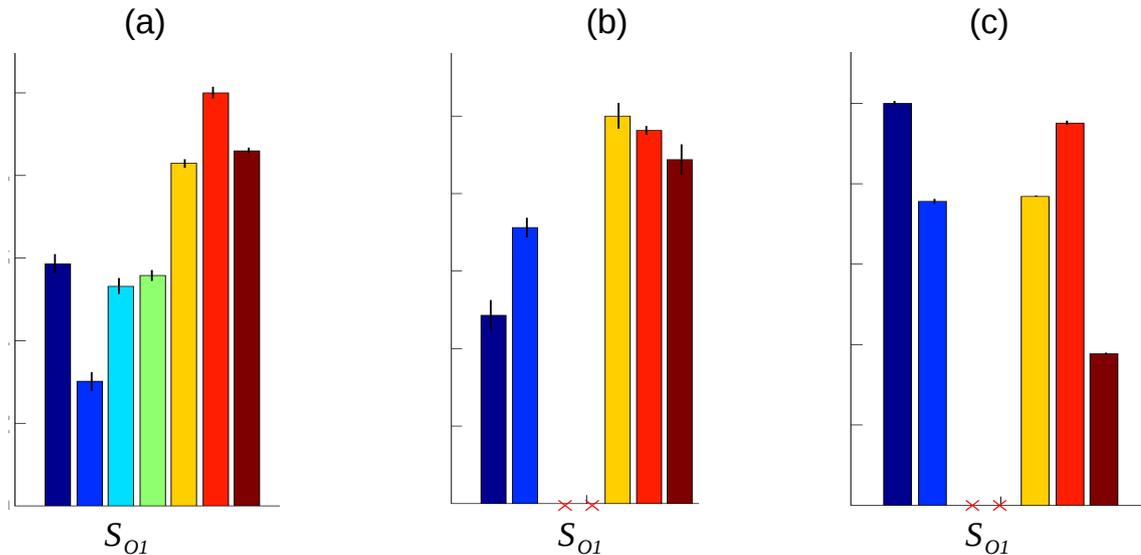


FIG. 4.14: Valeur moyenne et intervalle de confiance des coefficients spectraux de l'ordre 1 de l'arbre primaire. Résultats obtenus à partir a) du capteur angulaire, b) du capteur vibratoire 1, c) du capteur vibratoire 2. code couleur : ■ Bague 1, ■ Bague 2, ■ Bague 3, ■ Bague 4, ■ Bague 5, ■ Bague 6, ■ Bague 7.

l'arbre primaire. L'influence du défaut de roulement pouvant être considérée négligeable sur cette composante spectrale, cette comparaison permet d'apprécier l'influence du démontage/remontage sur la signature spectrale de la boîte de vitesses. De plus, les aléas de l'expérimental n'aidant pas, les mesures vibratoires correspondant aux roulements 3 et 4 ne s'avèrent pas exploitables, tandis que la campagne associée au roulement 1 n'est finalement constituée que de trois essais exploitables, plutôt que six...

4.4.3 Analyse des résultats

4.4.3.1 Usure collatérale du banc d'essais

Avant que ne soient présentés les résultats moyennés pour l'ensemble des roulements dont les défauts sont simulés, la figure 4.15 compare les observations spectrales récentes du roulement 8 avec celles effectuées lors de la première campagne, sous les mêmes conditions de fonctionnement. Le nombre de points utilisé pour effectuer la mesure la plus récente et spécialement réduit pour que les résolutions spectrales des observations soient équivalentes. Si les pieds de spectre des observations en vitesse instantanée, illustrés sur figure 4.15 a, sont relativement similaires, les différences de ceux correspondant aux mesures vibratoires sont mises en exergue sur la figure 4.15 c. La modification du pied de spectre est caractéristique d'un changement structurel de la boîte de vitesses et influence *a fortiori* l'observation de la composante spectrale correspondant à la fréquence

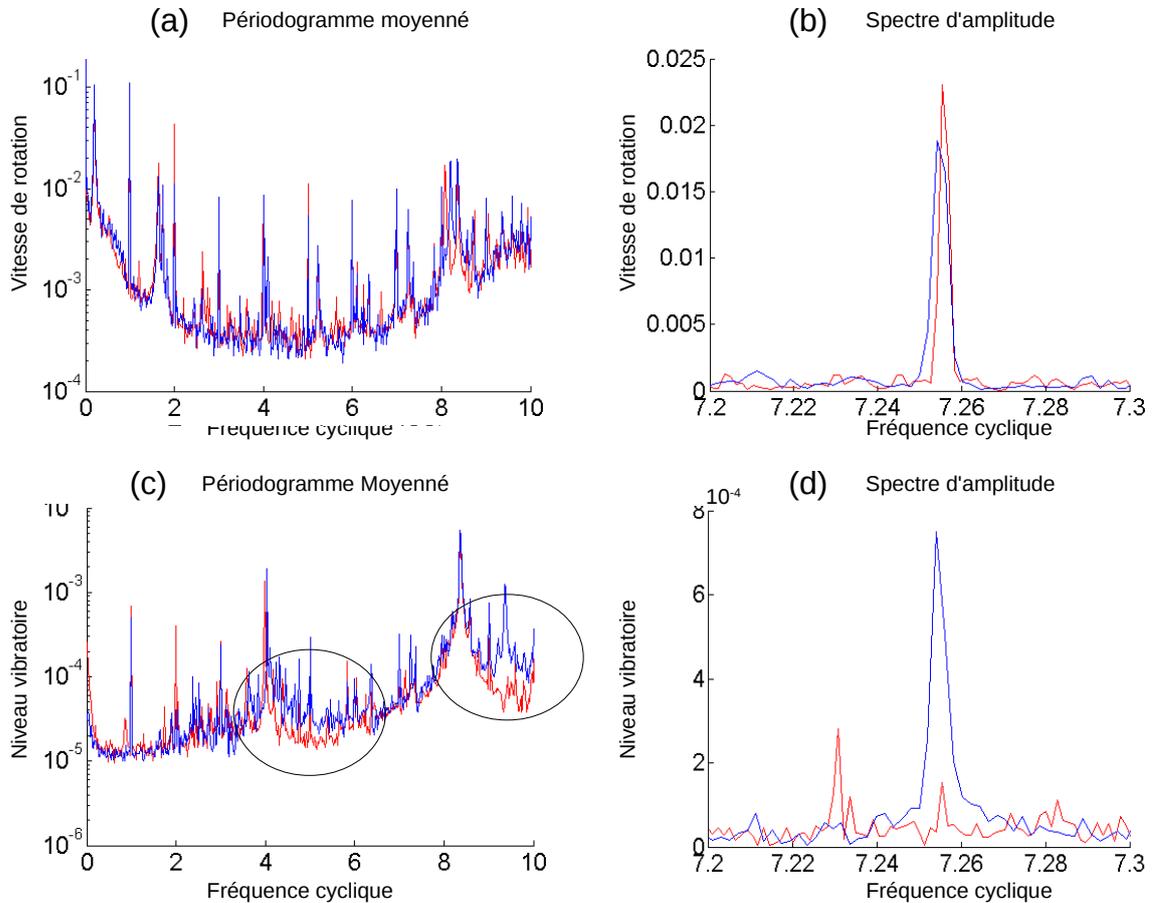


FIG. 4.15: Résultats obtenus avec le roulement 8 par a-b) observation de vitesse instantanée, c-d) surveillance vibratoire angulaire obtenue à partir de l'accéléromètre 1. Observation a-c) globale d'un spectrogramme moyenné, b-d) spectrale fenêtrée, focalisée autour de la fréquence caractéristique. (code couleur : -ancienne mesure, - mesure récente.).

caractéristique du palier.

Sans conclure que les variations de vitesse soient insensibles aux changements comportementaux de la structure, il est compréhensible que les problèmes de fixation du carter, agissant de manière directe sur la voie de transfert qui sépare l'accéléromètre du roulement, soit plus influents sur les mesures vibratoires que sur les mesures de vitesse instantanée.

La figure 4.16 présente l'un des spectres d'amplitude de la bague 6, lourdement atteinte, et de la bague 7, saine, focalisé autour de la fréquence caractéristique de la bague défectueuse. La figure 4.16 a) présente les résultats obtenus par mesure de vitesse instantanée, tandis que les figures 4.16 b) c) présentent les résultats respectivement obtenus à

4. Étude Expérimentale

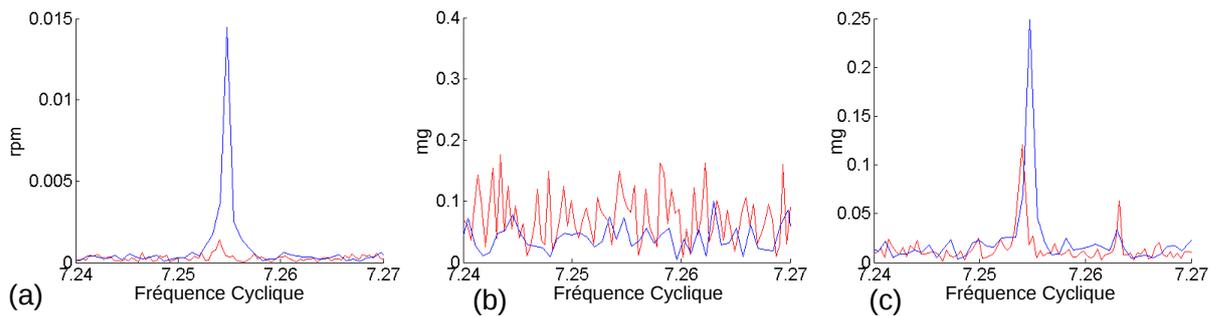


FIG. 4.16: Spectres d'amplitude focalisés sur la BPF du roulement 6 et du roulement 7. Spectre obtenue à partir de a) la mesures de vitesse instantanée, b) la mesure accélérométrique obtenue à partir du capteur 1, c) la mesure accélérométrique obtenue à partir du capteur 2.

partir des capteurs vibratoire 1 et 2. À l'image de l'ensemble des mesures effectuées par la suite, le capteur vibratoire 1 ne fut plus en mesure de détecter le phénomène vibratoire induit par les défaut de roulement. Les démontages successifs influençant particulièrement le capteur vibratoire 1, les résultats le concernant ne seront pas présentés.

4.4.3.2 Le cas particulier de la bague fixe

Les graphes a) et c) de la figure 4.16 montrent que les deux autres capteurs détectent un phénomène vibratoire cyclique dont la fréquence est proche de la fréquence caractéristique en question ($\pm 0.01\%$). Le fait que le roulement sain soit aussi lieu d'un phénomène vibratoire correspondant à la fréquence caractéristique est un phénomène ouvert à discussion, notamment en ce qui concerne la variation de vitesse. La bague extérieure étant fixe, les démonstrations de Meyer et al peuvent expliquer, en partie, le phénomène vibratoire qui souligne la fréquence caractéristique de cette bague.

Le comportement vibratoire du roulement sain peut être anormalement amplifié, sur le banc d'essais, par l'importance du jeu interne entre les éléments roulants et la bague externe : la charge se répartissant sur un plus faible nombre d'éléments roulants, la variation de répartition des charges augmente et entraîne de fait un accroissement de la composante spectrale correspondant à la fréquence cyclique fondamentale. En annexe D.1.1.3, il est expliqué que les bagues extérieures sont dissociées de l'ensemble bague intérieure-cage-élément roulant fourni par le constructeur, en raison du protocole expérimental. Les constructeurs ayant pour habitude d'apparier les sous éléments d'un roulement en fonction de leur caractéristiques métrologiques, la ré-association des sous éléments à l'aveugle est susceptible d'impacter fortement le jeu interne d'une combinaison aléatoire.

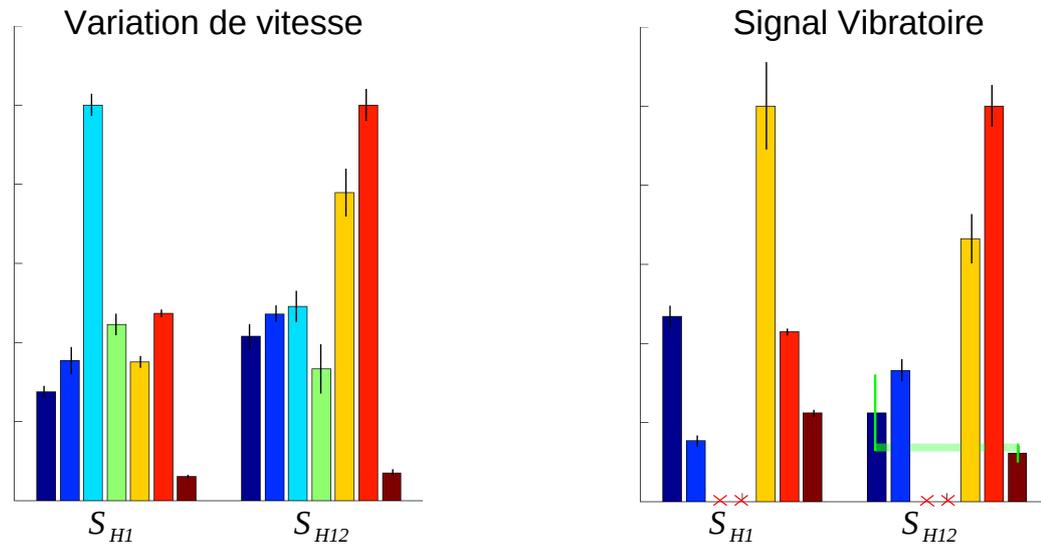


FIG. 4.17: Valeur moyenne et intervalle de confiance obtenus à partir du a) capteur angulaire puis du b) capteur vibratoire. code couleur : ■ Bague 1, ■ Bague 2, ■ Bague 3, ■ Bague 4, ■ Bague 5, ■ Bague 6, ■ Bague 7.

4.4.3.3 Influence de la forme du défaut sur la surveillance

On s'intéresse désormais aux résultats obtenus à partir de la seconde campagne, basée sur les roulements dont le défaut est simulé par électroérosion.

Sur le spectre d'amplitude

L'évolution des deux indicateurs suivants sont présentés sur la figure 4.17, par l'intermédiaire de la moyenne empirique et de l'intervalle de confiance à 60% estimé à partir des six réalisations constituant chaque échantillon :

1. S_{H1} : Amplitude de la composante spectrale correspondant à la fréquence caractéristique fondamentale sur le spectre d'amplitude,
2. S_{H12} : Somme des amplitudes des 12 premières harmoniques sur le spectre d'amplitude.

Les résultats obtenus avec l'indicateur S_{H12} sur la vitesse instantanée sont globalement en accord avec la description qualitative des défauts énoncés dans la table 4.4 : plus les défauts sont macroscopiquement/microscopiquement importants, plus les indicateurs sont élevés. L'influence de la rugosité apparaît de plus prépondérante vis à vis de la taille du défaut. S_{H1} est ici suffisant pour détecter la présence d'un défaut, mais l'indicateur S_{H12} semble être particulièrement sensible à la gravité de la composante microscopique du défaut. On peut imaginer que les perturbations microscopiques se traduisent par des

variations de vitesse assez courtes pour être assimilables à des trains d'impulsions, communément traduites dans le domaine spectral par un peigne de raies. Cet indicateur met ainsi en valeur la perturbation extrêmement localisée vis à vis du phénomène quasi mono-composante qui altère inexorablement la fréquence caractéristique de la bague fixe. Bien sur, cette observation extrêmement encourageante doit être pondérée par le faible nombre de bagues testées et l'influence importante des étapes de montage/démontage, rappelée par la figure 4.14 qui peut être consultée à titre comparatif.

Sur l'enveloppe

En supposant que les variations de vitesse induites par le défaut soient caractérisées par des impulsions localisées de vitesse de rotation, la méthode d'enveloppe associée à celle du kurtogramme peut s'appuyer sur la fréquence de modulation excitée par l'impulsion pour mettre en valeur le défaut. L'absence complète de résultat en la matière peut s'expliquer par le fait que les fréquences cycliques de modulation soient trop élevées, et que l'amortissement structurel ne permette pas à la résonance évanescence d'être repliée sur les fréquences plus faibles. De plus, la méthode du Kurtogramme ne se révéla d'aucune aide car suggère l'utilisation de filtres soulignant des phénomènes autrement plus énergétiques (engrènement, moteur défectueux...). L'auteur encourage néanmoins à poursuivre dans cette direction, d'autant qu'une augmentation de la résolution du capteur angulaire associée à une amélioration de l'algorithme de calcul ¹⁴ s'avère envisageable sans trop de difficulté. Associée enfin à une fréquence de compteur plus élevée, l'enveloppe du signal filtré pourrait mener à la signature spatiale du défaut de roulement.

Sur le périodogramme moyenné

Contrairement à l'étude sur les engrènements, les phénomènes vibratoires représentatifs du défaut n'apparaissent pas exactement sur la fréquence caractéristique. L'indicateur spectral sélectionne donc la composante spectrale qui majore l'intervalle fréquentiel de largeur ± 0.01 événements par tour autour de l'harmonique recherchée. Chaque intervalle recouvre ainsi trente canaux fréquentiels. Les résultats obtenus pour le même type d'indicateur sur un périodogramme moyenné, où l'intervalle fréquentiel est réduit à un seul canal ¹⁵, sont similaires à ceux obtenus sur les signaux originaux, présenté sur la figure 4.17. La fréquence cyclique étant suffisamment stable pour que les harmoniques du phénomène sous surveillance soient respectivement concentrées dans un seul canal fréquentiel, moyenniser le spectre d'amplitude au prix d'une perte de résolution spectrale n'apporte rien. *A contrario*, la résolution spectrale diminuant, le risque d'assimiler des phénomènes vibratoires perturbateurs avec la fréquence caractéristique augmente et réduit d'autant l'influence qu'a l'amplitude spectrale du phénomène sous surveillance sur l'indicateur obtenu à partir du périodogramme moyenné.

¹⁴permettant d'augmenter la taille du signal et ainsi de conserver la résolution spectrale de l'observation

¹⁵sur des morceaux de $1 \cdot 10^5$ points avec un recouvrement de 50%

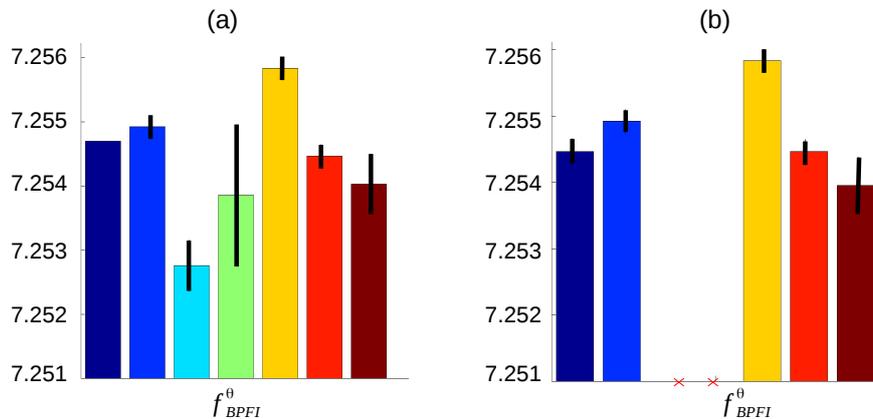


FIG. 4.18: Fréquence caractéristique mesurée sur l'observation spectrale du capteur angulaire (a) puis du capteur vibratoire 2 (b). code couleur : ■ Bague 1, ■ Bague 2, ■ Bague 3, ■ Bague 4, ■ Bague 5, ■ Bague 6, ■ Bague 7.

Comparaison des procédés de mesure

Les résultats obtenus avec le capteur vibratoire sont similaires à ceux obtenus avec le signal de vitesse instantanée, dans le sens où l'indicateur S_{H12} semble capable de classer les défauts par niveaux de gravité microscopique, puis macroscopique croissants. Néanmoins, le niveau atteint par le roulement sans défaut reste si important que les intervalles de confiance correspondant aux bagues 1 et 7 se chevauchent. L'influence mal maîtrisée des démontages qui interviennent entre chaque changement de roulement mitige lourdement les résultats obtenus par l'observation vibratoire.

A partir de la fréquence caractéristique

La figure 4.18 présente les fréquences fondamentales des défauts de roulements, sous des conditions de fonctionnement identiques. La résolution fréquentielle des observations est de $6 \cdot 10^{-4} \text{ ev.rev}^{-1}$, si bien que la différence apparente entre le roulement sain (bague 7) et les défauts simulés ne dépasse pas 4 canaux fréquentiels. Le roulement sain ne présentant pas la fréquence moyenne la plus élevée, il est fort probable que la localisation fréquentielle des défauts simulés soit principalement influencée par l'étape de démontage.

De nouveau, l'auteur encourage à poursuivre des travaux dans cette direction, en particulier sur l'observation des défauts de roulement répartis, dont le taux de glissement peut être altéré sur une portion de cycle suffisamment longue pour être influente sur la fréquence caractéristique.

4.4.3.4 Influence des conditions de fonctionnement

Sur le spectre d'amplitude

L'ensemble des signaux échantillonnés à partir du codeur 1 sont rassemblés sur la figure 4.19 en fonction de la vitesse de rotation. Les résultats obtenus pour des conditions

4. Étude Expérimentale

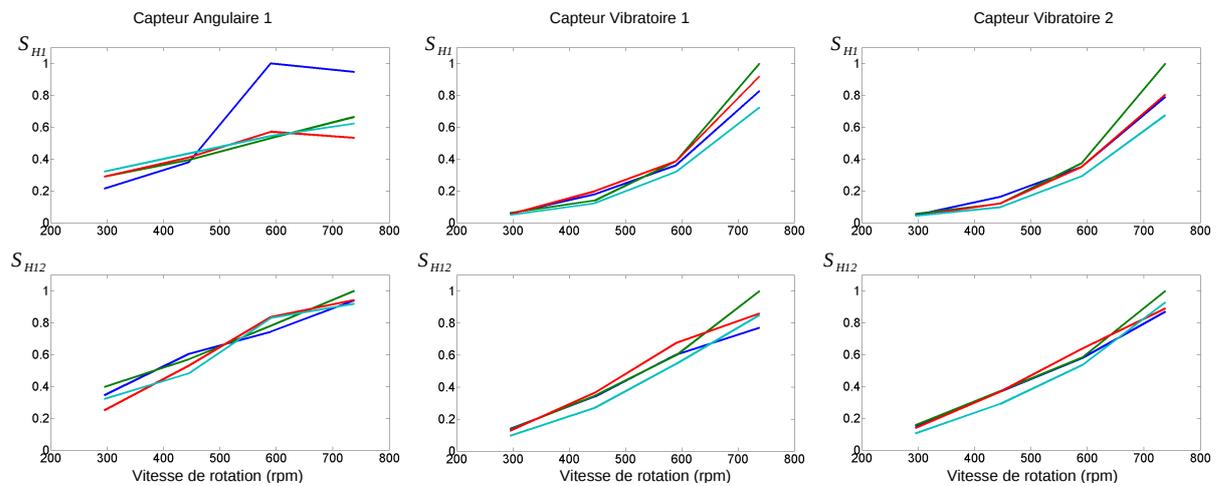


FIG. 4.19: Évolution des indicateurs S_{H1} et S_{H12} sur les mesures du roulement 8 obtenues à partir du capteur angulaire installé sur l'arbre primaire. — 10 Nm, — 24 Nm, — 31 Nm, — 41 Nm

de couple équivalentes sont reliés par des courbes linéaires par morceaux dont la couleur identifie l'amplitude du couple. Les graphes de gauche présentent les résultats obtenus par variation de vitesse, tandis que les graphes de droite présentent les résultats obtenus par échantillonnage angulaire des deux accéléromètres.

Si le défaut fut observable sous toutes les conditions testées à partir du codeur, il est clair que l'influence des conditions de fonctionnement est aussi importante que le degré de gravité du défaut, troublant de fait un diagnostic sous conditions non stationnaires similaire à celui fait par Renaudin et Al [REN 10].

Sur le capteur angulaire 3

L'ensemble des signaux échantillonnés à partir du codeur 3 sont rassemblés dans la figure 4.20 de la même manière que pour l'étude précédente.

L'observation par vitesse instantanée du capteur 3 ne parvient pas à détecter le défaut quand la vitesse vaut 600 t/min. Cette faiblesse peut être liée à la déperdition de la signature du défaut à travers les trains d'engrenages, ou à l'accroissement du phénomène de quantification avec l'augmentation de la vitesse, couplé avec les limites électroniques du capteur magnétique qui, à 120 t/min, est sollicité à 80% de sa vitesse limite.

La figure 4.21 compare les pieds de spectre estimés par la technique du périodogramme moyenné pour différentes conditions de vitesse. Bien que l'évolution du phénomène de quantification possiblement amplifié par le bruit électrique soit visible

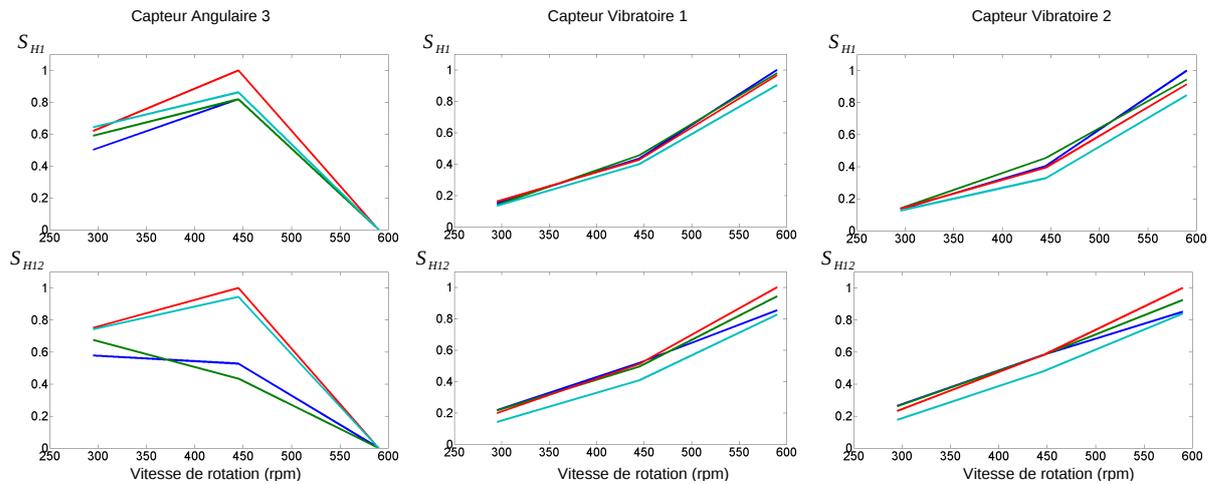


FIG. 4.20: Évolution des indicateurs S_{H1} et S_{H12} sur les mesures du roulement 8 obtenues à partir du capteur angulaire installé sur l'arbre de pont. - 10 Nm, - 24 Nm, - 31 Nm, - 41 Nm

sur le graphe de droite, c'est clairement le déplacement des zones de résonance qui marque le pied de spectre sur le graphe de gauche, dont l'abscisse est focalisée sur les fréquences cycliques qui entourent la fréquence caractéristique du roulement. Il serait intéressant de comparer la localisation de ces zones de résonance avec les fréquences naturelles de la ligne d'arbre, pour vérifier que ces zones mettent en valeur l'observation des fréquences cycliques d'intérêt. Si certaines conditions de fonctionnement s'avèrent permettre l'utilisation de ce codeur pour assurer la détection de ce défaut naturel de roulement, elles correspondent potentiellement à la proximité d'une zone de résonance structurelle.

La représentation des périodogrammes sous différentes conditions de couple résistant ne présente pas autant d'intérêt, les conditions de couple choisies arbitrairement n'ayant finalement que peu d'influence sur le pied de spectre de l'observation en vitesse instantanée.

Les signaux accélérométriques échantillonnés à partir du codeur 3 apportent les mêmes résultats que ceux obtenus à partir du codeur 1. Ce résultat vient confirmer l'hypothèse qu'utiliser un seul codeur pour synchroniser la lecture de l'ensemble des accéléromètres d'une ligne d'arbre est suffisant.

Sur la localisation fréquentielle

La Figure 4.22 présente les fréquences fondamentales de la bague 8 soumis aux différentes conditions de fonctionnement. Il est regrettable que les mesures aient été effectuées avec une résolution spectrale de $2 \cdot 10^{-3} \text{ ev.rev}^{-1}$, car les variations sont ef-

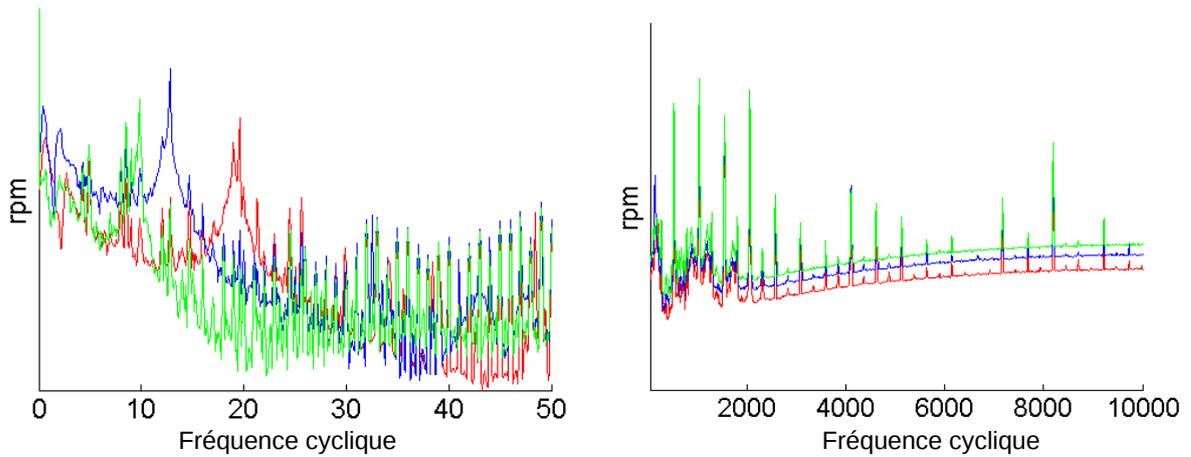


FIG. 4.21: Périodogrammes moyennés fenêtrés des observations en vitesse instantanée du capteur 3, pour des conditions de couple de 41 Nm et les conditions de vitesse - 120 t/min, - 90 t/min, - 60 t/min

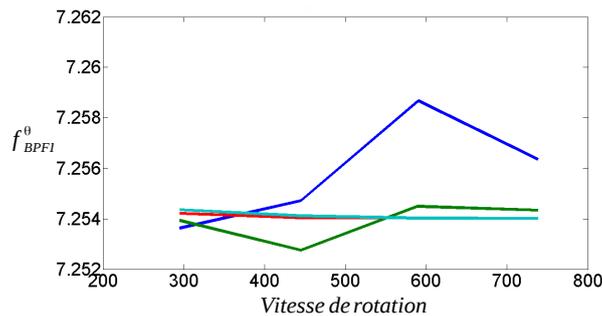


FIG. 4.22: Variation de la fréquence caractéristique observée de la bague 8 en fonction des conditions de fonctionnement. — 10 Nm, — 24 Nm, — 31 Nm, — 41 Nm

fectivement très faibles. Les variations apparentes des courbes correspondant aux puissances élevées ne font que refléter la différence entre les nombres de points constituant chaque mesure. En revanche, la courbe correspondant au couple le plus faible présente une variabilité non négligeable dont les extrema sont proches des limites prédéfinies théoriquement.

4.4.4 Bilan

L'observation de vitesse instantanée, tout comme la surveillance vibratoire angulaire, s'appuie sur une discrétisation angulaire du signal et peut ainsi être associée à une résolution spectrale extrêmement fine. Ainsi, les phénomènes dont l'énergie était trop faible pour apparaître sur une observation dont la résolution spectrale n'atteignait typiquement que 1% d'une fréquence caractéristique de roulement, ont désormais une chance

d'être révélés par la finesse des canaux fréquentiels obtenus à partir d'une observation angulaire.

Dans la pratique, cette précision fréquentielle apporte quelques avantages et informations à capitaliser pour la conclusion de cette étude :

1. la fréquence cyclique caractéristique ne dépend pas spécialement de la gravité d'un défaut localisé.
2. elle est cependant influencée par les conditions de fonctionnement. Pour une surveillance de roulement optimale, les conditions de fonctionnement doivent être suffisamment stabilisées pour que la fréquence caractéristique soit exprimée par un seul canal fréquentiel.
3. la fréquence caractéristique de la bague fixe du palier est localisable, même si le roulement est sain. Cette caractéristique facilitera le paramétrage de l'indicateur, qui pourra dépendre des conditions de fonctionnement.

Cette étude apporte aussi quelques résultats originaux concernant la surveillance par analyse des variations de vitesse instantané :

1. le niveau de rugosité du défaut altère l'amplitude des harmoniques de la fréquence caractéristique du défaut, alors que cela est difficilement perceptible sur des mesures accélérométriques.
2. la signature de variation de vitesse émise par un défaut de roulement peut traverser jusqu'à deux trains d'engrenages avant d'être efficacement mesurée par un codeur magnétique.
3. la mesure de vitesse angulaire instantanée est influencée par les conditions de fonctionnement (notamment en vitesse) mais reste relativement indépendante des perturbations vibratoires qui affectent le carter de la boîte de vitesses.

Les fréquences caractéristiques d'un roulement dépendent de plusieurs critères. De nouveau, l'auteur encourage à poursuivre des travaux dans cette direction, en particulier sur l'observation des défauts de roulement répartis, dont le taux de glissement peut être altéré sur une portion de cycle suffisamment longue pour être influente sur la fréquence caractéristique. Ces travaux doivent être néanmoins menés sur un banc d'essais dont les manipulations sont moins influentes sur la variabilité de la fréquence caractéristique. Un banc d'essais plus simple, où les efforts subis par le roulement sont mesurés avec suffisamment de précision pour être contrôlés, serait idéal pour ce genre d'expériences¹⁶.

¹⁶ce point sera abordé sous plus de détails en conclusion générale

4.5 Suivi long terme d'une machine tournante sous conditions non-stationnaires

La surveillance des machines tournantes sous des conditions de fonctionnement non stationnaires attire l'attention de la communauté scientifique. Et pour cause, les parties précédentes ont montré que les conditions de fonctionnement, en particulier celles de vitesse, ont une influence importante sur l'amplitude d'un phénomène vibratoire, à niveau de gravité équivalent.

Une première partie s'appuie sur des travaux scientifiques récents pour justifier le développement d'un outil de normalisation permettant de comparer les indicateurs obtenus sous différentes conditions de fonctionnement.

Les deux parties suivantes présentent un extrait des campagnes expérimentales menées sur deux machines, dont une fut instrumentée pendant plus d'une année. La liste d'éléments pertinents que contiennent ces campagnes de mesure est déroutante, et par soucis de ne pas noyer le lecteur sous les indicateurs, ce chapitre ne se focalisera que sur deux cas pratiques. Le premier s'intéresse aux roulements de la génératrice, situés à proximité d'un capteur angulaire et dont les fréquences caractéristiques sont particulièrement visibles sur le signal de vitesse instantanée. La seconde étude est basée sur des mesures effectuées sur une autre éolienne, dont le comportement fut jugé suspect par les techniciens de maintenance.

4.5.1 Développement d'une méthode de surveillance sous conditions non-stationnaires

4.5.1.1 De l'analyse mécanique à l'approche statistique

Deux travaux récents présentent des moyens d'analyse basés sur la comparaison de résultats vibratoires sous des conditions de fonctionnement variables. Une présentation des méthodes respectivement proposées dans chacun d'eux permet d'introduire celle mise en place pour la surveillance angulaire de l'aérogénérateur. Le premier est mis en pratique avec succès sur une application industrielle dont les conditions de fonctionnement sont particulièrement sévères [BAR 09b], tandis que le second invite, dans une approche plus théorique, à considérer l'indicateur vibratoire comme le résultat d'un loi aléatoire multivariée conditionnelle [MCB 09].

Bartelmus et al. cherchent à surveiller le réducteur d'un excavateur à roue pelle, un engin de terrassement à haut rendement dont le nombre de pelle est trop faible pour que le couple résistant puisse être considéré constant. Les variations de couple résistant peuvent classiquement atteindre 50% de la valeur nominale, en fonction de la forme du sol, de la nature de la roche et du tact de l'opérateur. Contrairement au fonctionnement d'une éolienne, les graphes de gauche de la figure 4.23, directement issus de ces travaux,

montrent que la variation du couple est linéairement représentative des variations de vitesse de rotation et que ces dernières restent relativement faibles.

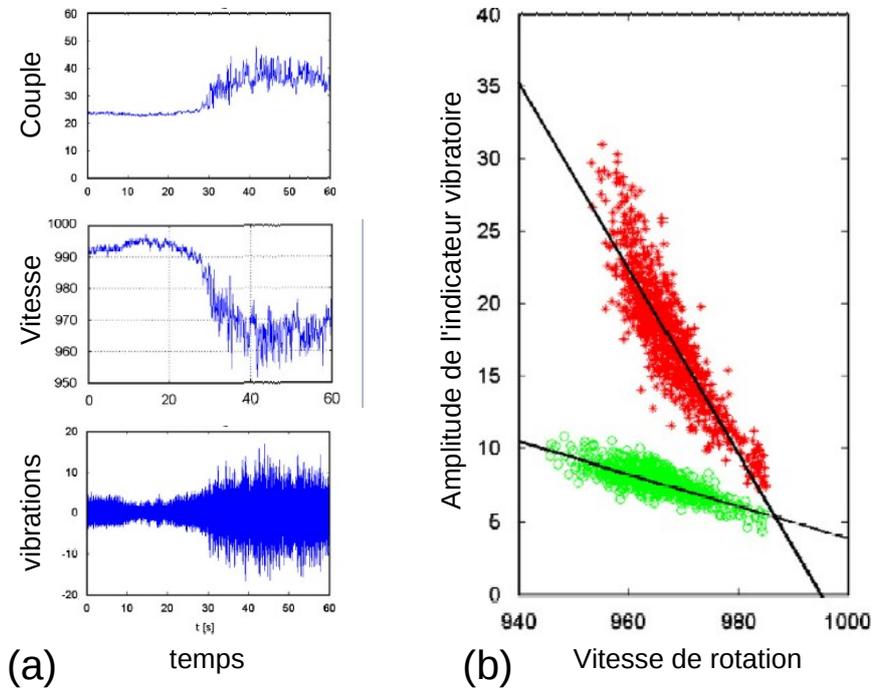


FIG. 4.23: Illustrations des mesures simultanées du couple, de la vitesse de rotation et des vibrations sous surveillance (a). Comparaison entre les régressions linéaires respectivement obtenues à partir d'un groupe de mesures effectuées avec un réducteur sain, en vert, puis défectueux, en rouge (b).

Sous l'hypothèse que les indicateurs vibratoires aient une dépendance linéaire avec le couple, Bartelmus montre que le coefficient directeur de cette dépendance peut être efficacement utilisé comme un indicateur avancé d'évaluation de l'état du réducteur. Cette étude prouve d'une part l'intérêt que peut représenter une comparaison d'indicateurs obtenus sous différentes conditions de fonctionnement, et d'autre part, l'influence qu'une variation de couple de 50% peut avoir sur les vibrations représentatives des engrènements.

Si les travaux de Bartelmus sont limités à un système dont les variations de vitesse restent relativement faibles, Mac Bain et al. proposent une méthodologie de surveillance vibratoire d'un système mécanique simple à partir de mesures uniquement effectuées pendant des montées/descentes en régime [MCB 09]. Basées sur un échantillonnage vibratoire temporel, les mesures sont découpées en morceaux suffisamment courts pour que les conditions soient considérées stationnaires et suffisamment longues pour extraire des indicateurs associés aux fréquences caractéristiques des éléments sous surveillance. Les indicateurs obtenus à partir de chaque « morceaux stationnaires » issus des mesures non stationnaires sont regroupés par plage de vitesse moyenne de rotation. Les moyennes

et variances empiriques des « tirages » sont respectivement attribuées à la vitesse de fonctionnement moyenne de chaque plage. Sous l'hypothèse que les indicateurs suivent une loi gaussienne paramétrique, les estimations classiques de probabilité permettent d'évaluer le seuil discriminant un changement d'état, ou tout du moins un changement des paramètres statistiques de la loi suivie par l'indicateur.

Néanmoins, les travaux de Bartelmus montrent que la seule prise en compte de la vitesse de rotation ne suffira pas à caractériser une plage de fonctionnement. En outre, les mesures vibratoires de l'aérogénérateur se sont avérées sensibles à des perturbations externes conditionnelles ¹⁷ dans le chapitre 3.5. Dans le cas où le fonctionnement d'un système est caractérisé par plus d'un paramètre, la loi aléatoire dont on cherche à détecter l'évolution devient multivariée. Le nombre d'échantillons nécessaires pour estimer cette loi augmente de manière exponentielle avec le nombre de paramètres dont elle dépend.

4.5.1.2 Caractérisation des conditions de fonctionnement de l'éolienne

Maia Eolis est principalement équipée d'aérogénérateurs de type REpower 2MW, dont la transmission accouplant le moyeu principal à la génératrice est assurée par un multiplicateur à engrenages. Sur l'un d'entre eux, un système d'acquisition angulaire similaire à ceux mis en avant dans les chapitres précédents fut installé en juin 2010, et effectuée depuis lors des mesures vibratoires et de vitesse angulaire instantanée (déjà plus de 3500 mesures). L'éolienne est présentée dans l'Annexe D.1.3 et le système d'acquisition est particulièrement détaillé dans l'Annexe D.1.3.3.

Chaque mesure est constituée d'une batterie de quinze signaux vibratoires, de trois signaux de vitesse instantanée, d'un signal représentatif du couple ¹⁸, d'un signal représentatif de la vitesse du vent, et représente environ 70 mega octet d'espace disque. Pour limiter l'écrasant volume d'information, les mesures sont effectuées toutes les trois heures plutôt qu'en continu.

Deux fichiers de configuration regroupant les paramètres caractéristiques des conditions de fonctionnement sont associés à chaque mesure pour faciliter les étapes de l'analyse globale mise en place par la suite. En particulier, les conditions de fonctionnement d'une mesure sont caractérisées par les paramètres suivants :

1. la vitesse de rotation moyenne pendant la mesure,
2. les extrema atteints par la vitesse angulaire instantanée pendant la mesure,
3. la puissance active moyenne générée pendant la mesure,
4. les extrema de puissance active instantanée pendant la mesure.

¹⁷niveaux de bruit dépendant du fonctionnement du moteur de yaw

¹⁸ou plus exactement de la puissance active produite par la génératrice

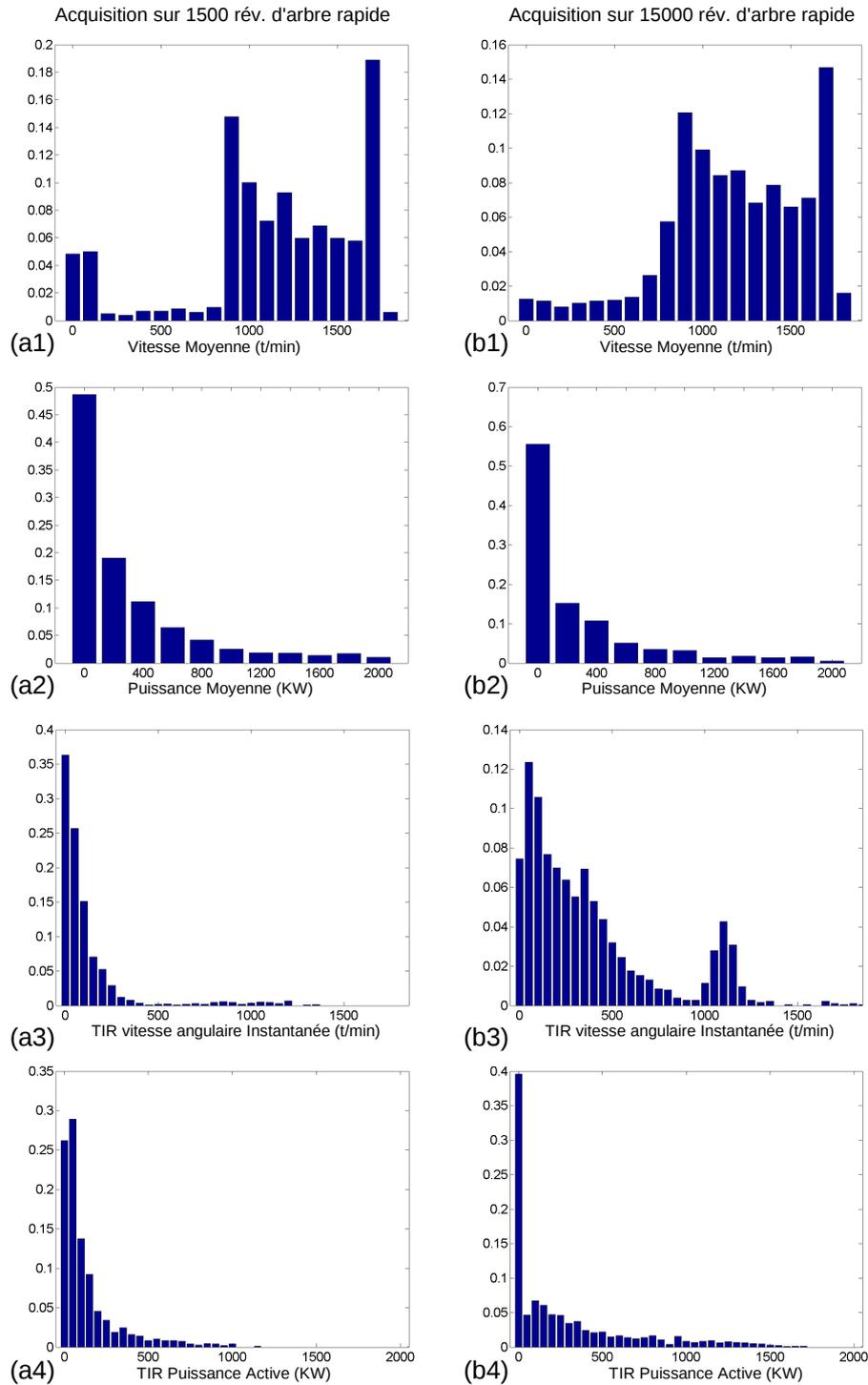


FIG. 4.24: densité de mesure en fonction de (a1-b1) la vitesse moyenne de rotation, (a2-b2) la puissance active moyenne, (a3-b3) la plage parcourue par la vitesse instantanée et (a4-b4) la plage parcourue par la puissance active.

Deux configurations sont nécessaires car les signaux destinés à la surveillance des éléments mécaniques de la partie lente de la ligne d'arbre sont dix fois plus longs que ceux destinés à surveiller les éléments mécaniques de la partie rapide. La figure 4.24 représente les distributions discrètes des mesures en fonction de différents paramètres caractéristiques des conditions de fonctionnement. Les informations qui émanent de cette représentation sont ci-dessous comparées aux estimations statistiques de production sur une année, elles-mêmes calculables à partir de la table D.4 associée à la figure D.13 ¹⁹ :

1. conformément aux prévisions, les graphes (a1) et (b1) montrent respectivement que 85% et 84% des mesures ont une vitesse moyenne de rotation supérieure à 900 t/min.
2. si les courbes de puissance prouvent que la machine produit plus de 430kW 56% de l'année, les mesures de puissance active estiment que la production de la machine ne dépasse 400kW que 32% (graphe a2) et 29% (graphe b2) de l'année. Ces mesures de la puissance active s'avèrent lourdement biaisées, et ne seront désormais considérées qu'en second lieu.
3. le graphe (a3) montre que 77% des mesures courtes ont une stabilité inférieure à 150 t/min, 92% des mesures courtes ont une stabilité inférieure à 300 t/min. Le graphe (b3) montre que seuls 50% des mesures longues ont une stabilité inférieure à 300 t/min.

4.5.1.3 Calcul des indicateurs de surveillance

L'éolienne présentant constamment un fonctionnement de type montée/descente en régime, le modèle expérimental proposé par Mac Bain et al est préférable à celui de Bartelmus, où l'évolution de l'indicateur vibratoire est considéré linéaire car la plage de vitesse de rotation étudiée reste faible. Néanmoins, si les indicateurs proposés par Mac Bain se satisfont d'une résolution spectrale très faible, les mesures angulaires doivent être assez longues pour permettre la surveillance de l'ensemble des éléments mécaniques constitutifs de la ligne d'arbre. Les mesures ne sont donc pas coupées en morceaux stationnaires, mais traitées à partir de l'un des outils présentés dans le chapitre 3.3.

Tous les signaux sont traités par un fenêtrage de type Hanning pour corriger l'effet des variations de vitesse, puis étudiés dans le domaine spectral sous leurs formes brutes (résolution maximale) et moyennées. Trois indicateurs similaires à ceux présentés dans les parties précédentes sont appliqués sur les fréquences caractéristiques des différents roulements, arbres et engrènements constitutifs de la ligne d'arbre. Le diagramme 4.25 schématise la structure de la base de données de la campagne menée sur cette éolienne. Si 5400 indicateurs sont à calculer pour chacune des 3500 mesures de cette vaste campagne, les indicateurs mesurant l'amplitude relative des pics ou ceux basés sur l'évolution du

¹⁹Bien que ces illustrations soient disponibles dans l'annexe D.1.3, les calculs ne sont pas détaillés car ne présentent ni difficulté, ni intérêt particulier.

Kurtogramme et de l'enveloppe n'ont pu être incorporés à l'étude par manque de temps de calcul²⁰.

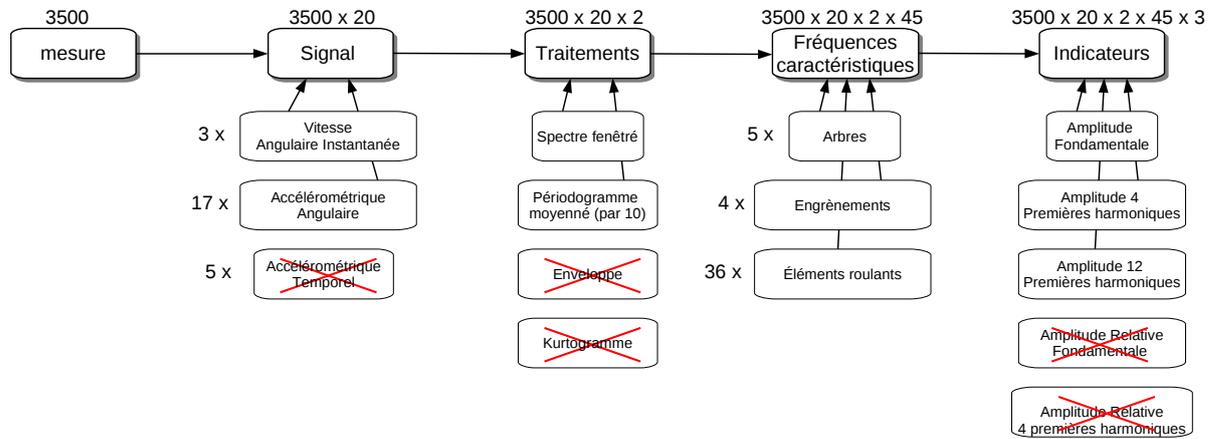


FIG. 4.25: Diagramme de la structure accueillant les indicateurs de la campagne de mesure.

4.5.1.4 Mise en place de la normalisation des indicateurs

Le graphe de gauche de la figure 4.26 illustre l'évolution théorique de la puissance moyenne générée en fonction de la vitesse moyenne de rotation. Les mesures dont la puissance moyenne est inférieure à 900kW sont trop rares pour être considérées dans cette première étude. D'autre part, si les moyens expérimentaux permettaient une meilleure estimation du couple, il serait envisageable de n'utiliser que ce dernier paramètre pour décrire les conditions de fonctionnement des mesures. Ceci n'étant pas le cas, les deux paramètres restent nécessaires. Néanmoins, il ne s'avère pas utile de discrétiser les conditions de fonctionnement dans deux dimensions. Les indicateurs sont normalisés par la vitesse de rotation quand la vitesse moyenne est inférieure à 1800 t/min, et par la puissance active quand la vitesse moyenne atteint la valeur nominale. Le graphe (b) schématise la discrétisation des plages de fonctionnement en douze morceaux, dont huit ne sont décrits que par la vitesse de rotation, et quatre sont décrits par la puissance générée par la machine.

En supposant que l'amplitude de chaque indicateur suive une loi normale paramétrique, moyennes et variances sont estimées segment par segment. Les estimations sont ensuite interpolées linéairement pour définir les fonctions linéaires par morceaux qui décrivent l'évolution de la loi en fonction des paramètres de fonctionnement. Le graphe (c) de la figure 4.26 représente de telles estimations pour les mesures dont les conditions

²⁰Le calcul des 19 millions d'indicateurs prend, à l'heure actuelle, plus d'une semaine.

4. Étude Expérimentale

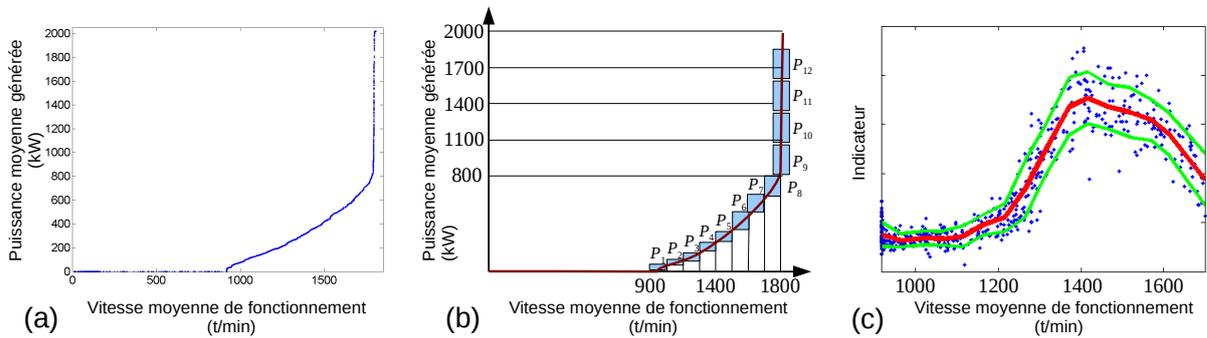


FIG. 4.26: (a) Schématisation de la segmentation en plages de fonctionnement. (b) Estimation des paramètres statistiques pour les plages caractérisées par la vitesse moyenne de rotation.

de fonctionnement sont caractérisées en vitesse. L'estimation de la loi paramétrique suivie par l'indicateur est la première étape de la normalisation, résumée par les points suivants :

1. segmenter la plage de fonctionnement en K morceaux suffisamment larges pour permettre une estimation pertinente de la loi normale (au moins 30 échantillons), et suffisamment fins pour éviter que la loi paramétrique n'évolue trop.
2. pour chaque morceau k , on calcule la valeur moyenne \hat{v}_k des paramètres de fonctionnement associés aux indicateurs, ainsi que la valeur moyenne $\hat{\mu}_k$ et l'écart type $\hat{\sigma}_k$ de l'amplitude des indicateurs.
3. Les couples $(\hat{v}_k, \hat{\mu}_k)$ et $(\hat{v}_k, \hat{\sigma}_k)$ sont interpolés linéairement pour définir les fonctions linéaires par morceaux $\mu(v)$ et $\sigma(v)$ (illustrées en rouge puis en vert sur la figure 4.26-c)).

Idéalement, cette première étape est effectuée à partir de signaux mesurés sous quelques semaines, juste après la première mise en marche de l'aérogénérateur, et qualifie « l'état initial » des indicateurs, et donc des éléments surveillés.

Les indicateurs obtenus à partir des mesures ultérieures peuvent enfin être normalisés. En fonction du paramètre moyen v représentatif des conditions de fonctionnement pour lesquels ils ont été obtenus, les indicateurs sont centrés et réduits à partir de la moyenne $\mu(v)$ et de l'écart type $\sigma(v)$ de la loi qui définissait l'état initial de l'indicateur sous ces conditions de fonctionnement. Les indicateurs normalisés peuvent alors être rassemblés dans un même histogramme de surveillance, quelque soient les conditions de fonctionnement qui ont marqué leur acquisition. Les résultats obtenus avec cette méthode seront utilisés avantageusement dans les sections suivantes, pour mettre en valeur des observations expérimentales originales.

4.5.2 Surveillance d'un roulement de génératrice

4.5.2.1 Présentation du roulement

La génératrice, détaillée dans l'annexe D.1.3, assure la liaison pivot entre le rotor et la nacelle par l'intermédiaire de deux roulements identiques, à gorge profonde, disposés de part et d'autre des barres rotoriques. Les fréquences caractéristiques de ces roulements, *a priori* produits par SKF²¹, sont calculées pour différents angles de contact dans la table 4.6. Si ces roulements sont identiques sur le papier, ils peuvent admettre des différences

Fréquences caractéristiques	angle de contact		
	0°	11°	12.5°
BPFI	4.816	4.8005	4.796
BPFO	3.184	3.1995	3.204
FTF	0.398	0.398	0.4005

TAB. 4.6: Fréquences caractéristiques du roulements installés dans la génératrice, en évènement par tour d'arbre rapide.

d'usinage ou de fonctionnement. Les choix de conception, et en particulier ceux de serrage des bagues, singularisent le rôle de chaque palier. D'après la documentation technique qui accompagne la génératrice, c'est le roulement situé à proximité de l'accouplement qui assure une fonction de palier fixe : ce roulement porte le chargement axial induit par le poids du rotor (incliné de 5°) et amplifié par la tension magnétique axiale. Le chargement axial repris par le roulement à gorge profonde impose un angle de contact non nul. Le roulement situé à proximité du codeur est laissé flottant, son chargement est donc *a priori* exclusivement radial, et l'angle de contact associé reste théoriquement nul. Sans forcément croire que le chargement radial se concentre exclusivement sur l'un des deux paliers, on peut raisonnablement supposer que les angles de contact de ces deux roulements soient différents, que l'angle associé au palier fixe soit strictement supérieur à celui associé au palier flottant et que la surveillance angulaire soit théoriquement capable de dissocier ces deux éléments dans le domaine spectral. En effet, d'après les formules présentées dans la table 4.3, deux angles de contact α_1 et α_2 pour un même roulement indiquent :

$$\alpha_1 > \alpha_2 \Rightarrow \begin{cases} BPFI(\alpha_1) < BPFI(\alpha_2) \\ BPFO(\alpha_1) > BPFO(\alpha_2) \\ FTF(\alpha_1) > FTF(\alpha_2) \end{cases} \quad (4.4)$$

4.5.2.2 Résultats vibratoires

²¹Ces génératrices « peuvent » être équipées de roulements FAG, dont le nombre de corps roulant est différent.

4. Étude Expérimentale

La figure 4.27 superpose deux spectres obtenus pour les mêmes conditions de fonctionnement à partir de deux capteurs vibratoires situés respectivement à proximité de chaque roulement. Les spectres du graphe a) mettent en exergue les fréquences caractéristiques associées à la bague interne, quand les spectres du graphe b) celles de la bague externe. Sur ces deux observations, les fréquences caractéristiques définies dans la table 4.6 sont exactement atteintes, associant de fait au palier fixe un angle de contact de $12,5^\circ$ et au palier flottant un angle de contact de 11° ²².

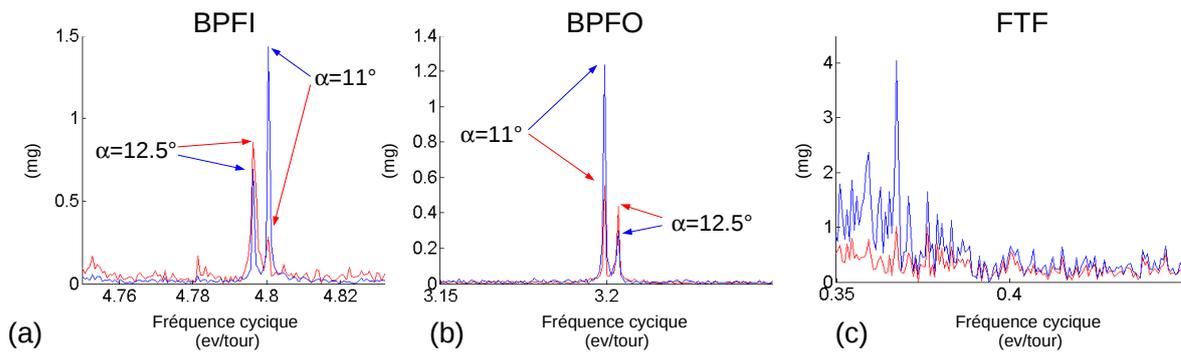


FIG. 4.27: Observation des fréquences caractéristiques des roulements de génératrice par mesure vibratoire angulaire. — Capteur vibratoire situé à proximité du palier serré. — Capteur vibratoire situé à proximité du palier flottant.

4.5.2.3 Résultats en vitesse angulaire instantanée

La figure 4.28 présente le spectre d'une mesure de vitesse angulaire instantanée focalisée sur les mêmes fréquences cycliques. À l'image des autres observations effectuées depuis ce capteur sur cette machine, seules les fréquences caractéristiques associées au palier flottant sont clairement observables. À l'inverse des observations vibratoires adjuvant des amplitudes équivalentes aux deux roulements, la mesure de vitesse instantanée voit son attention focalisée sur ce palier. L'absence des fréquences caractéristiques du palier fixe sur ces mesures peut être justifiée de deux manières :

- le capteur optique est trop loin du palier fixe, dont les fréquences caractéristiques sont trop amorties pour dépasser le bruit de fond.
- le palier flottant présente un comportement anormal et sa signature masque celle du palier fixe pour toutes les fréquences caractéristiques.

²²sous les hypothèses que les dimensions internes du roulement correspondent exactement à la théorie, que les bagues soient parfaitement circulaires, que les arbres demeurent parfaitement centrés et en l'absence de glissement.

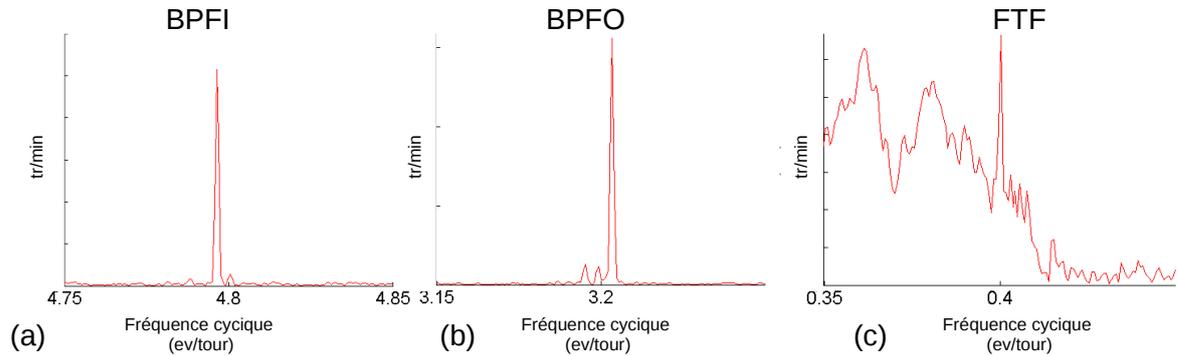


FIG. 4.28: Observation des fréquences caractéristiques des roulements de génératrice par mesure de vitesse instantanée.

4.5.2.4 Résultats sur une autre éolienne

En effet, ces couples de fréquences caractéristiques étant exceptionnellement proches, les fuites spectrales pourtant amoindries par le fenêtrage peuvent noyer le phénomène dont l'amplitude est trop faible / trop proche. Pour vérifier ce point, la figure 4.29 présente le même type d'observation spectrale, obtenue à partir du même type de capteur bien qu'effectuée sur une autre éolienne. Cette fois, toutes les fréquences caractéristiques identifiées à partir du signal vibratoire sont visibles. De nouveau, en considérant que les dimensions des paliers correspondent aux valeurs théoriques, l'un des paliers admet un angle de contact de 12.5° tandis que l'autre présente un angle de contact de 11° . La résolution spectrale n'est cependant pas assez fine pour dissocier les deux fréquences de cages, qui apparaissent clairement sur les deux éoliennes une fois étudiée à partir de la variation de vitesse plutôt qu'en vibratoire.

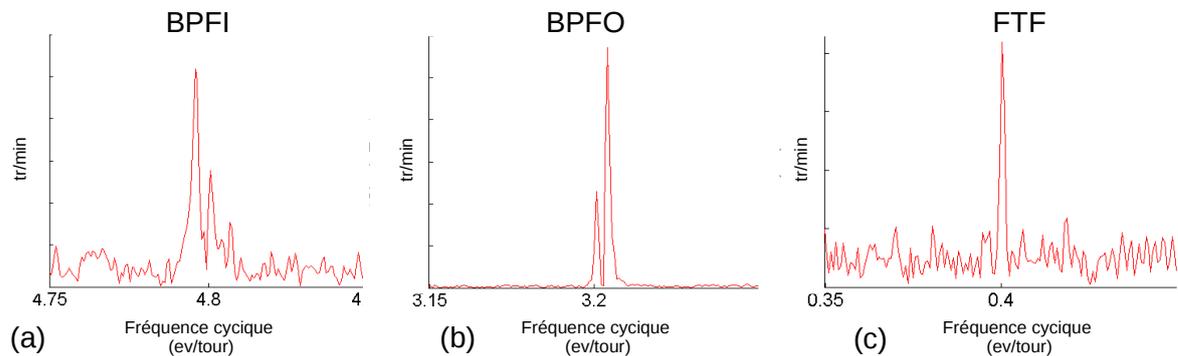


FIG. 4.29: Observation des fréquences caractéristiques des roulements de génératrice par mesure de vitesse instantanée sur une autre machine.

4.5.2.5 Utilisation de la loi normale paramétrique

Enfin, la figure 4.30 compare l'indicateur obtenu à partir de cette mesure à la loi paramétrique estimée sur la première éolienne. Bien que le nombre de mesures disponibles ne soit pas suffisant pour que le processus de normalisation soit réalisé sur la seconde éolienne, la normalisation effectuée sur la première machine peut être analysée. Les courbes vertes localisent l'écart-type de la loi paramétrique autour de sa moyenne empirique, en rouge. En supposant que les indicateurs suivent une loi gaussienne, la probabilité que les valeurs normalisées en vitesse suivent la même loi paramétrique est inférieure à 1%. Ce résultat appuie l'hypothèse selon laquelle la mesure de vitesse instantanée ne détecte pas la fréquence cyclique attribuée au palier fixe car elle est masquée par l'amplitude importante de la composante associée au palier flottant.

4.5.2.6 Discussion

Parmi l'ensemble des capteurs qui équipent la première machine, seuls ceux présentés dans cette partie révèlent un phénomène cyclique à ces fréquences. Fortuitement, ces deux machines sont aussi surveillées par un système de surveillance conventionnel appuyant son analyse sur les spectres d'enveloppe temporelle. Les indicateurs tirés de ce système vibratoire temporel et attachés à ces fréquences caractéristiques font l'objet d'un suivi régulier par Maia Eolis, et ne mesurent pour l'instant que le bruit de fond. Cette partie souligne donc l'immense fossé qui sépare l'approche temporelle de l'approche angulaire : quand le premier système de mesure ne peut dire si le roulement est d'origine SKF ou FAG, le second permet aujourd'hui de différencier les fréquences caractéristiques de deux roulements identiques, et considérés comme étant sains.

On note aussi la différence de sensibilité entre le système de mesure vibratoire et le système de mesure de vitesse angulaire instantanée. Quand les amplitudes spectrales correspondant à chaque palier sont similaires sur les spectres accélérométriques, la variation de vitesse détecte un phénomène physique particulièrement fort sur le palier flottant de la première machine.

4.5.3 Surveillance d'un engrènement défectueux

4.5.3.1 Présentation du cas d'étude

Comme la plupart des machines tournantes, les éoliennes font l'objet d'une maintenance systématique pendant laquelle les techniciens sont invités à rapporter toutes observations sensibles suggérant la présence d'un dysfonctionnement. L'ouïe, le toucher ou la vue d'un homme d'expérience s'avère parfois plus perçante que celle d'un outil moderne de surveillance préventive. Une observation de ce type est remontée au sujet d'une autre machine que celle instrumentée en juin 2010. Pour faciliter la compréhension

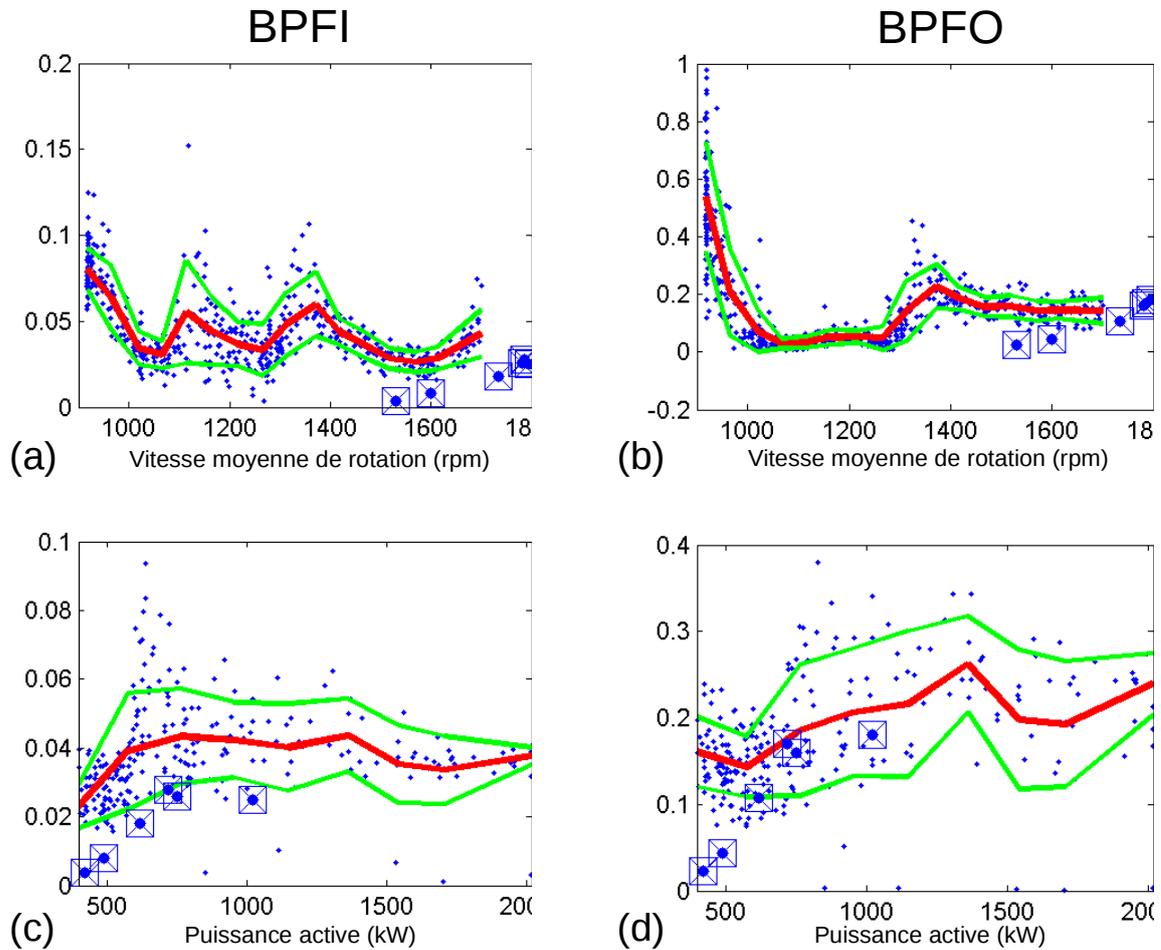


FIG. 4.30: Estimation de la loi paramétrique suivie par l'indicateur basé sur l'amplitude fondamentale de la fréquence caractéristique a) de bague interne du palier flottant, b) de bague externe du palier flottant. Les points marqués correspondent indicateurs mesurés sur la seconde éolienne.

du lecteur, ces machines sont respectivement qualifiées de « machine saine » et « machine défectueuse ». Les techniciens ont rapporté l'apparition de claquements réguliers et *a priori* cycliques, émanant du multiplicateur quand la machine défectueuse est mise à l'arrêt.

Suite à cette observation, un système d'acquisition angulaire est installé le temps d'une journée de tests pour comprendre l'origine du claquement²³. Ce système est une version très simplifiée de celui présenté dans l'Annexe D.1.3. Le capteur angulaire C_1 installé en bout de génératrice est utilisé pour obtenir une mesure de vitesse instantanée

²³4 consignes d'arrêt ont été mesurées sur la machine défectueuse.

ainsi que pour synchroniser l'échantillonnage angulaire des capteurs vibratoires A_7 et A_8 et de la mesure de puissance active. Les positions des capteurs sont précisées sur la figure 4.31. Les résultats obtenus sur la machine défectueuse sont mis en comparaison avec des résultats obtenus dans des conditions de fonctionnement similaires sur la machine saine.

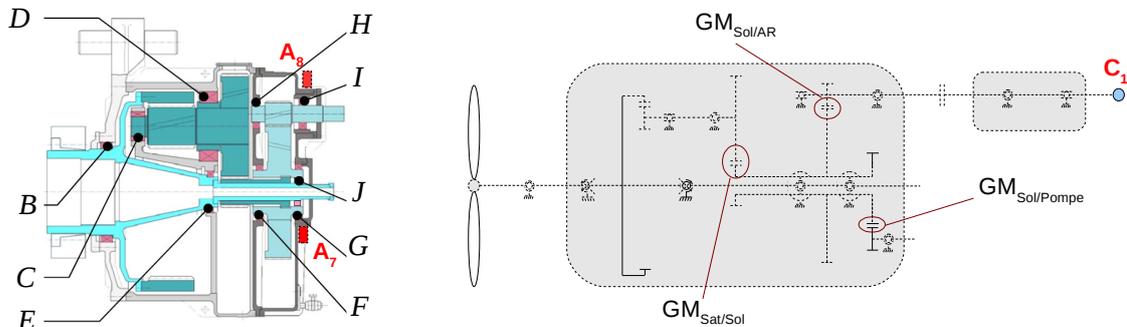


FIG. 4.31: Localisation des capteurs vibratoires (A_7 et A_8) sur le multiplicateur et du capteur angulaire C_1 .

4.5.3.2 Diagnostique de la surveillance angulaire

La figure 4.32 présente les réponses mesurées par chaque capteur suite à la consigne d'arrêt sur la machine défectueuse. La régression linéaire appliquée sur la vitesse angulaire instantanée met en avant l'apparition d'un phénomène de torsion, dont le contenu fréquentiel peut être étudié une fois le signal de vitesse angulaire rééchantillonné à pas de temps constant : il s'avère constitué de deux composantes harmoniques dont les fréquences correspondent respectivement au premier mode de flexion dans la direction du battement (1.0Hz) et au premier mode de flexion dans la direction de la corde (1.6Hz)²⁴. La position de la ligne d'arbre à l'apparition de ces modes de vibration, notée θ_1 sur le graphe (b) et localisé par un trait pointillé sur le graphe (c), précède de peu l'apparition d'un premier claquement observé sur les deux mesures vibratoires. Ce fort claquement précède à son tour une série d'impulsions cycliques, de nouveau visible sur les deux capteurs. L'angle qui sépare le premier claquement du second est distinctement plus court que la période du train cyclique qui s'en suit. L'amplitude des impulsions de ce train est si importante que l'analyse spectrale devient superflue : le cycle du train correspond exactement à la révolution de l'arbre solaire. Le graphe (d) montre que la puissance active tombe à zéro peu après l'apparition du phénomène cyclique perçu par les techniciens.

À l'inverse d'une consigne d'arrêt d'urgence qui bloque la rotation par une activation du frein à disque positionné sur l'arbre rapide, la consigne d'arrêt classique se traduit principalement par une mise en drapeau des pales. Les efforts aérodynamiques modifient progressivement le sens des couples appliqués à la ligne d'arbre depuis l'arbre lent. De

²⁴Ce sont deux modes de flexion des pales.

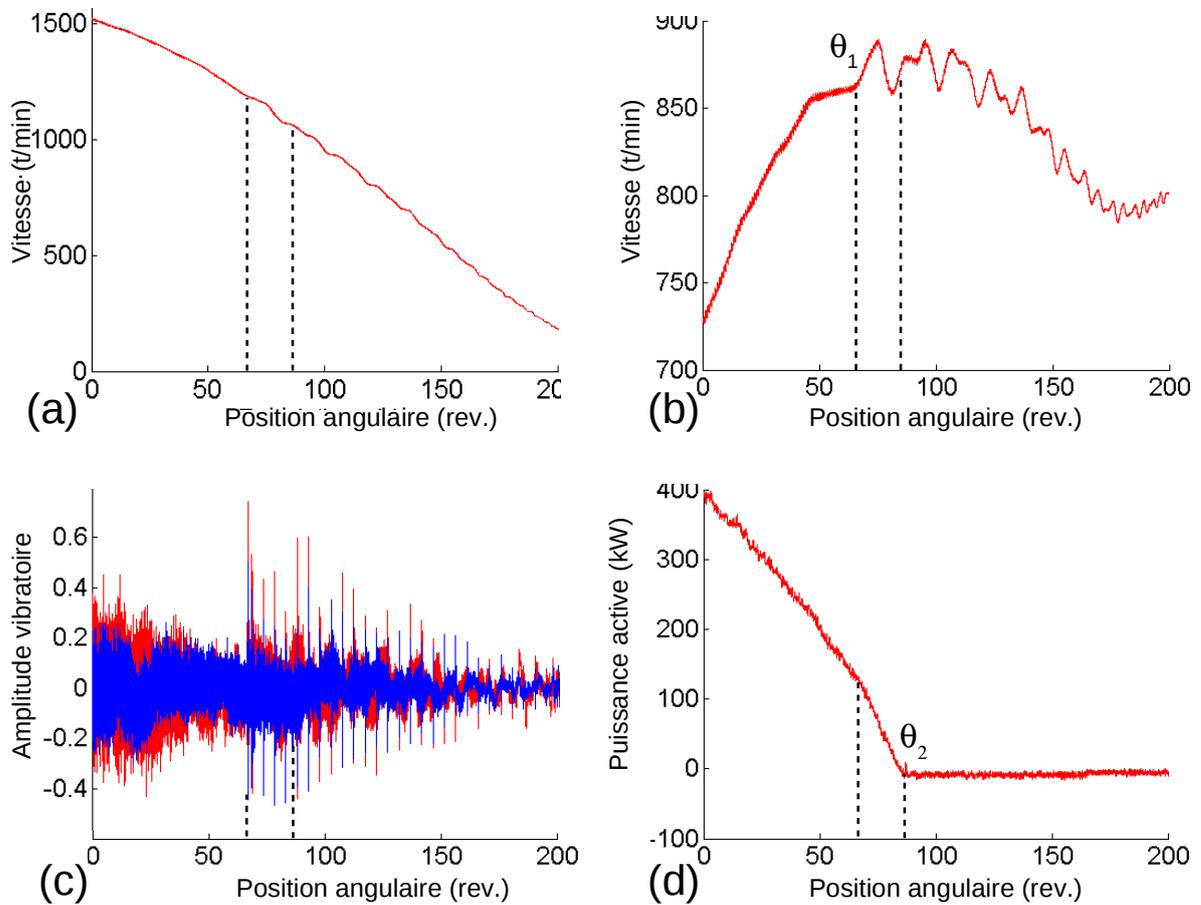


FIG. 4.32: Observations angulaires simultanées de la ligne d'arbre en réponse à une consigne d'arrêt. a) mesure de vitesse angulaire instantanée, b) vitesse angulaire instantanée redressée linéairement, c) mesures vibratoires et d) mesure de puissance.

la fonction motrice que présente l'arbre lent en fonctionnement routinier, le changement d'orientation des pales réduit l'apport d'énergie jusqu'à les faire dissiper l'énergie inertielle et accélérer, de fait, l'arrêt de la ligne d'arbre.

Dans l'idéal, cette transition est faite avec suffisamment de douceur pour éviter que le rattrapage des jeux entre les trains d'engrenages successifs ne produise un choc violent²⁵. Dans la pratique, la génératrice accompagne l'arrêt de la ligne d'arbre en maintenant un couple résistant le plus longtemps possible ; des résistances chauffantes sont à ce titre utilisées pour dissiper les surplus d'énergie. Néanmoins, ce système peut s'avérer insuffisant. Le premier choc vibratoire observé sur la figure 4.32 peut ainsi être associé à ce phénomène.

²⁵l'anglicisme communément employé pour ce phénomène est le « backlash »

4. Étude Expérimentale

Une étude vibratoire réalisée par Maia Eolis montre que l'impact produit à l'instant où le mouvement d'orientation des pales arrive en fin de course excite sensiblement les modes vibratoires de ces dernières, aux fréquences temporelles repérées sur la mesure de vitesse instantanée. Par couplage, le mouvement de flexion des pales se traduit directement en une vibration de torsion de la ligne d'arbre, dont la déflexion s'avère suffisamment importante pour être observée depuis le capteur angulaire installé sur l'arbre rapide. Cette vibration torsionnelle coïncidant avec la position où le couple aérodynamique des pales est le plus fort peut suffisamment modifier l'équilibre des forces pour qu'un phénomène de « backlash » soit visible sur une observation temporelle du signal vibratoire. Bien que cette impulsion ne soit identifiable que sur deux des quatre essais, sa localisation facilite la compréhension du phénomène mécanique menant aux chocs cycliques. Cette signature localise angulairement l'instant où l'arbre lent devient un frein, l'instant où les faces de fuite des dents des engrenages successifs deviennent des faces d'attaque, l'instant où le sens des efforts axiaux transmis par les engrenages hélicoïdaux est inversé.

La figure 4.33, qui présente les mesures de vitesse instantanée redressée et vibratoire angulaire obtenues sur la machine saine sous des conditions de fonctionnement similaires est par exemple dépourvue d'une telle signature. Si la mise en drapeau des pales est de nouveau associée à une augmentation sensible du niveau vibratoire, le rattrapage de jeu n'est pas marqué par un claquement sec.

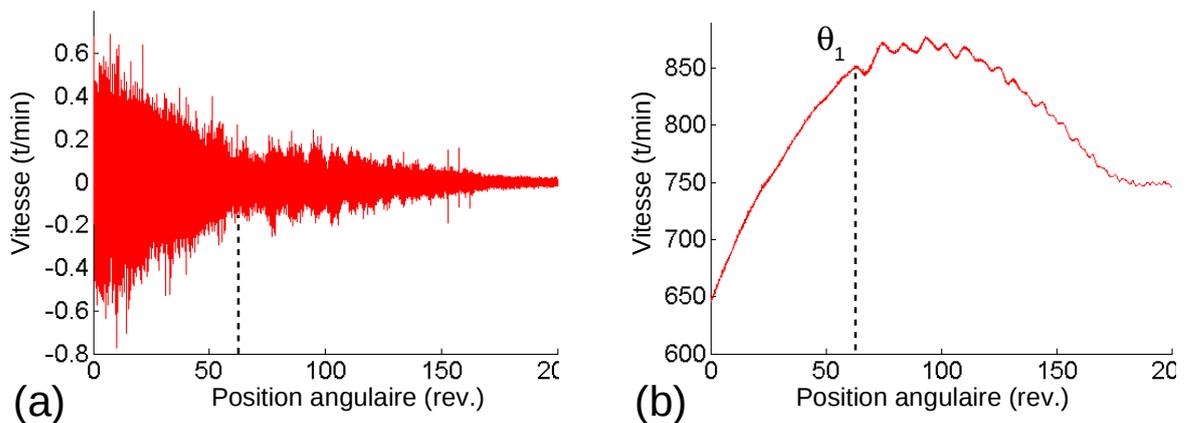


FIG. 4.33: a) Vitesse angulaire instantanée redressée linéairement et c) mesures vibratoires d'un ligne d'arbre « saine » en réponse à une consigne d'arrêt

Sur le graphe de gauche de la figure 4.33, le signal vibratoire de la machine saine présente aussi trois impulsions séparées par un tour d'arbre solaire. Ce phénomène n'est donc pas exceptionnel, mais particulièrement sévère sur la machine identifiée par les techniciens. Deux hypothèses peuvent expliquer ce train d'impulsions :

- les multiplicateurs d'éolienne sont fabriqués avec un sens de rotation privilégié, menant les dents des engrènements à avoir une face privilégiée de contact. À ce titre, il est probable que les faces de fuite des engrènements ne soient pas rectifiées en sortie d'usine. Les défauts de surface peuvent alors générer des coincements dont le relâchement est bruyant.
- le changement de face en contact se traduit par un changement de sens des efforts axiaux transmis par les engrènements hélicoïdaux. L'arbre solaire, présentant un jeu axial, se place dans un nouveau positionnement quasi-statique, dont le bout de course peut aussi être la source du premier choc vibratoire. Ce positionnement peut modifier l'alignement des arbres et accentuer le coincement d'un des couples d'engrenages.

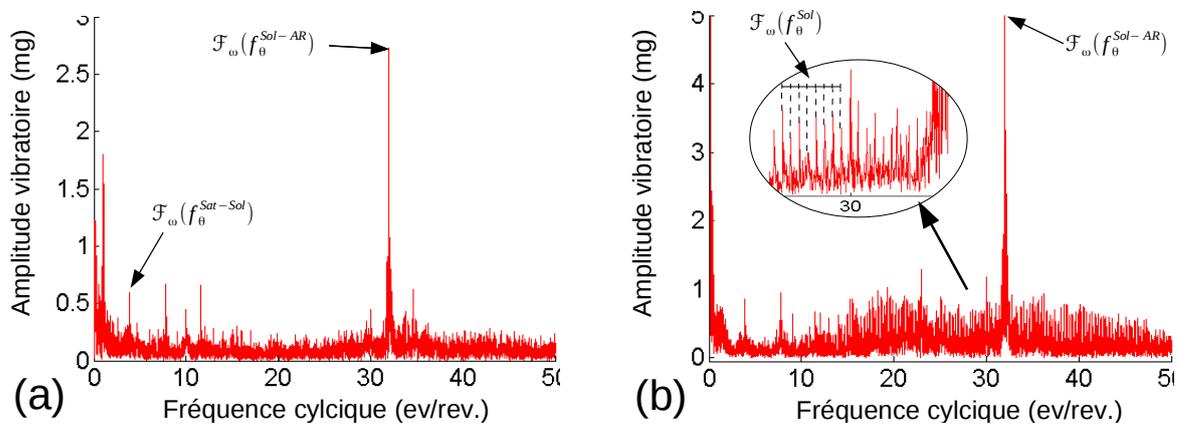


FIG. 4.34: a) Spectre du signal angulaire vibratoire « sain », b) Spectre du signal vibratoire « défectueux » (accéléromètre A8).

Quelque soit l'origine exacte des impulsions qu'il sera difficile de prédire sans ausculter le multiplicateur par vidéo-endoscopie, l'approche angulaire permet d'assurer qu'elles ne se produiront que lorsque l'arbre rapide agira en moteur, et l'arbre lent en frein²⁶. Un tel phénomène vibratoire ne peut donc être suivi par un système de surveillance conventionnel, basé sur un échantillonnage temporel, car ne sera jamais visible pendant les phases de fonctionnement stabilisées. Les observations spectrales des signaux vibratoires, respectivement présentées sur les graphes a) et b) de la figure 4.34 pour les machines saine et défectueuse, rappellent qu'il est possible de surveiller l'apparition du phénomène à partir du peigne de raies multiples de la fréquence cyclique de l'arbre solaire. Ainsi, le spectre de l'observation angulaire vibratoire peut être utilisé avantageusement pour surveiller l'évolution de ce phénomène qui n'apparaît que sous des conditions de fonctionnement non stationnaires et trop courtes pour être perçues par la mesure de vitesse instantanée.

²⁶jamais, en dehors des consignes d'arrêt par mise en drapeau des pales.

4.5.3.3 Comparaison aux résultats du suivi long-terme

La mesure angulaire s'étant avérée capable d'identifier l'origine de l'excitation, l'observation spectrale capable d'estimer l'amplitude du claquement, le procédé de normalisation est enfin utilisé pour tenter de comparer les niveaux vibratoires des engrènements portés par l'arbre solaire à ceux de la machine saine. Cette comparaison s'appuie sur six mesures effectuées sous les conditions de fonctionnement imposées par le vent le jour de l'instrumentation.

Application aux mesures vibratoires

La figure 4.35 présente les résultats obtenus en surveillance vibratoire angulaire à partir de l'accéléromètre *A7* échantillonné depuis le capteur *C1*. De nouveau, l'indicateur ne fait que rapporter l'amplitude de la composante fondamentale des fréquences d'engrènement sur le spectre fenêtré. Les graphes a-b-c) représentent l'évolution de la loi paramétrique en fonction de la vitesse moyenne de mesure. Parmi les six mesures effectuées sur la machine défectueuse, quatre présentent des vitesses moyennes trop élevées pour être comparées à l'estimation paramétrée en vitesse. Les graphes d-e-f), présentant la loi paramétrique en fonction de la puissance active, ne sont pas affectés par ce problème.

Si les engrènements $GM_{Sol-Pompe}$ et GM_{Sol-AR} présentent des résultats comparables à ceux obtenus sur la première éolienne, l'engrènement qui lie les satellites à l'arbre de pompe sur la machine défectueuse présente des niveaux inquiétants : l'observation doit être pondérée par l'incertitude sur la localisation des deux capteurs vibratoires, par la distance qui sépare l'accéléromètre des satellites et par l'amplitude vibratoire encore relativement faible que présente l'engrènement incriminé sur sa fondamentale. Ces arguments seront remis en cause par les mesures de vitesse instantanée.

Application aux mesures de vitesse angulaire instantanée

Similairement, la figure 4.36 présente les résultats obtenus à partir des mesures de vitesse instantanée. La différence remarquable concernant l'indicateur de l'engrènement qui accouple l'arbre solaire à l'arbre rapide est principalement lié au fait que les capteurs utilisés sur chaque machine ne présentent pas le même défaut géométrique²⁷. Ce phénomène vibratoire étant synchrone de l'arbre porteur du capteur, l'erreur géométrique perturbe le canal fréquentiel lu par l'indicateur. La forme affine que présente la moyenne de la loi paramétrique en fonction de la vitesse illustre d'ailleurs l'influence de la vitesse de rotation sur l'erreur géométrique, étudiée dans la partie 2.3.2.2.

L'engrènement qui accouple l'arbre solaire à la pompe ne présente pas de différence entre les deux machines, confirmant de fait l'analyse vibratoire.

²⁷il aurait fallut utiliser le même capteur

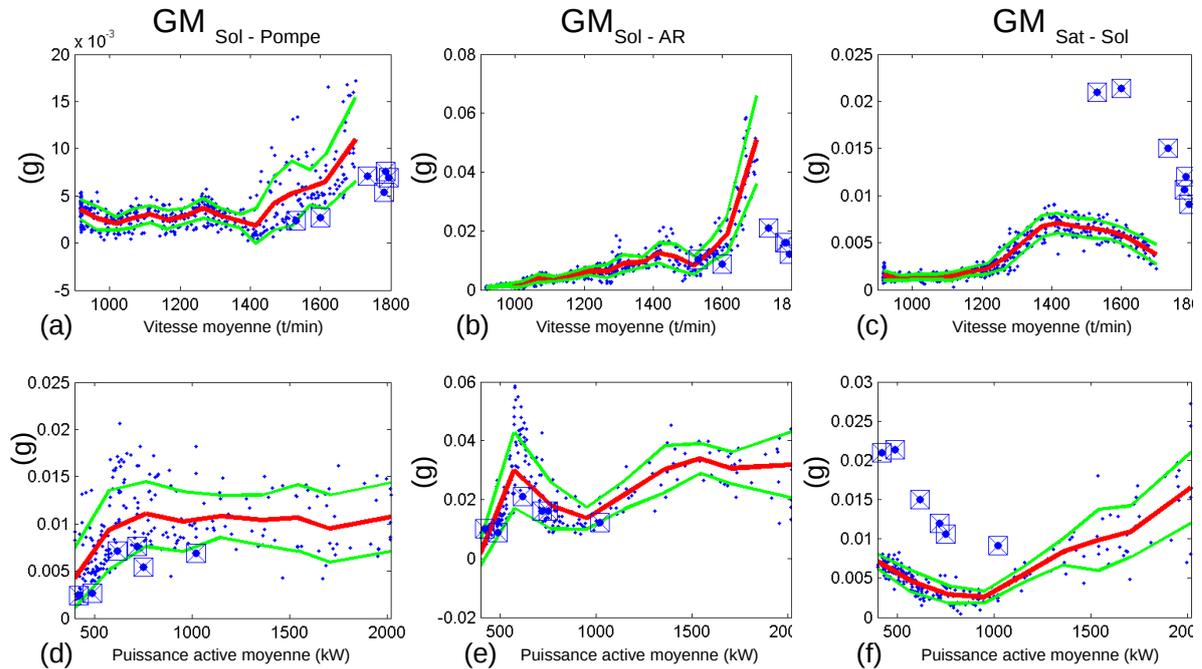


FIG. 4.35: Estimation de la loi paramétrique suivie par l'indicateur **vibratoire** basé sur l'amplitude des raies respectivement associées aux trains a-d) $GM_{Sol-Pompe}$, b-e) GM_{Sol-AR} , c-f) $GM_{Sat-Sol}$ de la machine saine. Les points marqués correspondent aux indicateurs mesurés sur la machine défectueuse.

L'engrènement qui accouple le satellite à l'arbre solaire présente de nouveau une différence flagrante vis à vis de la loi paramétrique, qu'elle soit caractérisée par la vitesse moyenne de rotation sur le graphe c), ou par la puissance active moyenne, sur le graphe f). Cette différence confirme aussi les résultats obtenus par l'analyse vibratoire, et réfute par la même occasion les hypothèses s'appuyant sur l'incertitude de la localisation des capteurs, ou sur l'influence de la voie de transfert. D'une part, la localisation des capteurs optiques sur les deux machines sont ajustées, et donc sans influence différentielle sur les mesures. D'autre part, la voie de transfert qui sépare l'engrènement du codeur optique n'est pas la même que celle qui le sépare du capteur vibratoire, et la possibilité que deux phénomènes indépendants perturbent les voies de transfert séparant le satellite des deux capteurs sans perturber celles qui les séparent de la pompe mécanique est beaucoup plus fragile.

Cette observation, en plus de mettre en valeur la normalisation des indicateurs pour croiser l'expérience de deux machines, invite Maia Eolis à surveiller l'engrènement qui accouple le satellite à l'arbre solaire. La différence peut ne pas être visible aujourd'hui, mais les niveaux d'amplitude relevés selon les deux modes d'observation lui prédisent une durée de vie plus courte que l'engrènement analogue de la machine saine.

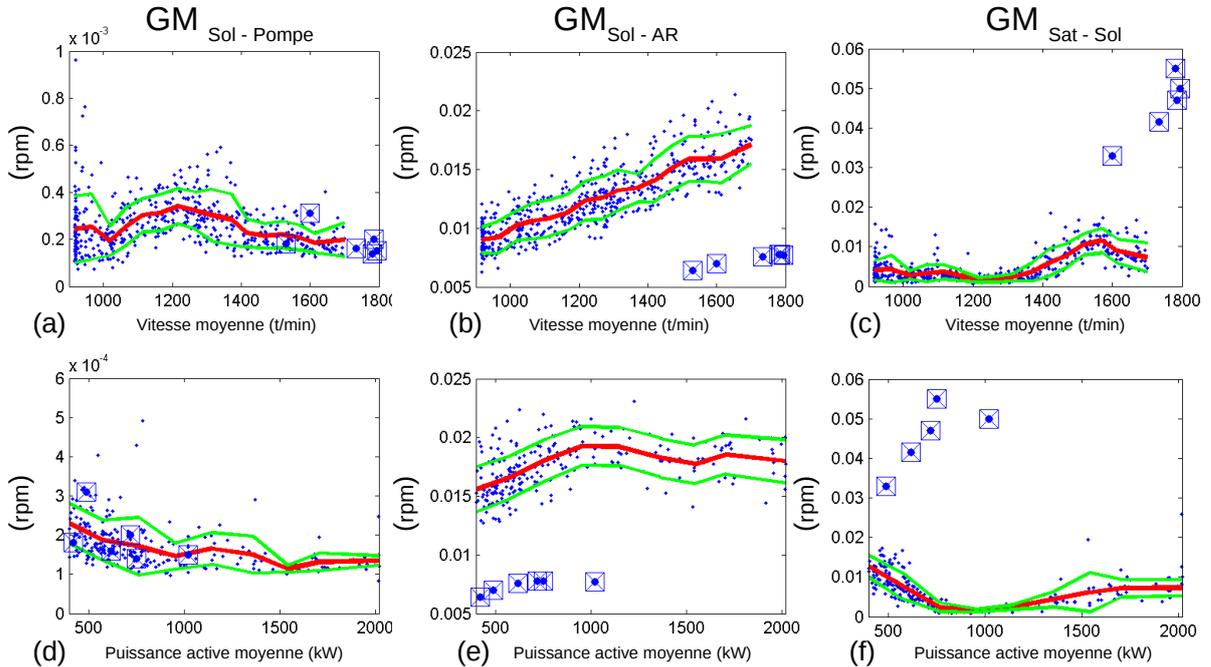


FIG. 4.36: Estimation de la loi paramétrique suivie par l'indicateur **vitesse angulaire instantanée** basé sur l'amplitude des raies respectivement associées aux trains a-d) $GM_{Sol-Pompe}$, b-e) GM_{Sat-AR} , c-f) $GM_{Sat-Sol}$ de la machine saine. Les points marqués correspondent aux indicateurs mesurés sur la machine défectueuse

4.5.4 Bilan

Ce chapitre fut tout d'abord l'occasion de développer un procédé de normalisation permettant de caractériser la loi suivie par un indicateur de surveillance, en fonction des paramètres de fonctionnement de la machine. Bien que les indicateurs de surveillance dépendent de l'amplitude du couple et de la vitesse, l'éolienne présente la particularité d'associer, en valeur moyenne, une vitesse à un couple. Dans un cas d'application où la mesure du couple serait disponible, plutôt que celle de la puissance active, une normalisation par rapport à ce seul paramètre de fonctionnement deviendrait envisageable.

La normalisation des indicateurs peut être utilisée pour comparer l'état de deux machines *a priori* similaires, mais cette option doit être utilisée en pondérant les résultats par l'incertitude introduite par les conditions de montage des capteurs et du système mécanique en lui-même. Le chapitre précédent souligne effectivement l'influence des opérations de montage sur les résultats de surveillance. Les voies de transfert peuvent ainsi dépendre des paramètres mécaniques de l'accouplement flexible, des différents paliers, des points de fixation, des plots amortisseurs du multiplicateur ou de la génératrice... Autant d'éléments que l'assembleur peut modifier d'une machine à l'autre. Cette pondération peut être facilitée par l'utilisation d'un modèle mécanique de la ligne

d'arbre, en supposant que ces paramètres soient connus pour chaque machine.

La normalisation des indicateurs peut aussi et surtout être utilisée pour faciliter la détection d'un dysfonctionnement sur une machine. Cette qualité n'a pu être explicitement mise en avant dans ce chapitre car la durée de la campagne ne s'est pas avérée suffisante pour observer l'apparition puis l'évolution d'un défaut réel. Les outils sont néanmoins disponibles pour surveiller l'évolution des indicateurs centrés-réduits dans un histogramme comparable à ceux actuellement utilisés par les systèmes de surveillance conventionnels. Par opposition aux systèmes actuels qui ne comparent que les mesures stationnaires sous des conditions de fonctionnement similaires, il est désormais question de rassembler les résultats obtenus pour toutes les conditions de fonctionnement dans un même histogramme.

Le système d'acquisition peut d'ailleurs être adapté pour mettre à profit cette surveillance normalisée, en présentant un mode de fonctionnement correspondant à chaque étape de la normalisation. Le premier mode de fonctionnement, visant l'estimation de la loi paramétrique initiale, est actuellement adapté pour déterminer cette loi le plus rapidement possible, quitte à surveiller la machine en continu. Le second mode de fonctionnement, peut alors se satisfaire d'une surveillance plus parcimonieuse, ne retenant par exemple qu'un signal par heure, sur des critères classiques de stabilité en vitesse ou en couple.

Si ce procédé de normalisation peut être adapté au système de surveillance basé sur un échantillonnage temporel, cette partie met aussi en avant les avantages de l'approche angulaire. Échantillonner les signaux vibratoires ou les mesures de vitesse instantanée dans le domaine angulaire permet aux observations spectrales d'être dotées d'une précision fréquentielle suffisante pour évaluer les fréquences caractéristiques de roulements pourtant jugés sains par Maia Eolis. Certains phénomènes, tel que le coincement d'engrènement abordé dans la dernière partie, ne sont d'ailleurs observables que sous des conditions de fonctionnement largement non stationnaires.

Au delà de la qualité angulaire de l'échantillonnage, les deux exemples cités dans ce chapitre montrent la complémentarité que partagent les signaux de nature vibratoire avec ceux de vitesse instantanée. La vitesse angulaire instantanée fut notamment montrée éblouie par le défaut géométrique du codeur, et l'utilisation d'un seul capteur pour surveiller l'intégralité de la ligne d'arbre est aujourd'hui prématurée. En revanche, la vitesse instantanée est sensible aux phénomènes dont la fréquence est plus basse que la limite usuelle de perception des accéléromètres. Le balourd de l'arbre lent, la fréquence de passage des pales ou les fréquences propres de ces dernières sont autant de phénomènes physiques analysables par la vitesse angulaire instantanée. En outre, la distinction que la vitesse angulaire instantanée fait vis à vis des deux roulements de génératrice reste intrigante. De nouveau, des travaux de modélisation pourraient être utilisés pour justifier cette sensibilité dont la mesure vibratoire n'a pas fait preuve.

4.6 Conclusion

À plusieurs reprises, le signal de vitesse instantanée fut étudié directement dans le domaine angulaire. D'une part, c'est en effet l'oscillation évanescence induite par l'engrènement qui a invité l'auteur à adapter les techniques d'enveloppe spectrale, un outil de traitement qui s'avère finalement aussi robuste que pour la surveillance vibratoire. D'autre part, bien que l'initiation du phénomène de résonance des pales ait pu être repéré par une observation de type temps - fréquence, c'est le signal de vitesse instantanée traité par une simple régression qui invita l'auteur à s'intéresser aux très basses fréquences, signature d'un phénomène indirectement lié à l'apparition du choc cyclique. Si les outils de traitement qui permettent de nettoyer les observations spatiales, telles que le moyennage synchrone ou les méthodes DRS²⁸, ne sont aujourd'hui pas adaptables aux signaux non stationnaires, la connaissance de la loi paramétrique suivie par un phénomène vibratoire déterministe ouvre de nouvelles perspectives dans ce domaine. En définitive, l'observation directe d'un signal angulaire, qu'il soit vibratoire ou de vitesse instantanée, est la traduction la plus brute de l'excitation angulaire par la structure. Elle permet une lecture dont l'intérêt ne doit pas être masqué par ceux qu'apportent les méthodes plus évoluées.

L'adaptation des techniques différenciant les phénomènes déterministes des perturbations aléatoires est une perspective aussi valorisable pour les observations spatiales qu'en amont des observations événementielles, utilisées à profusion, dans ce chapitre. En effet, si le domaine spectral est la panacée des phénomènes périodiques en temps, il est naturel que le spectre angulaire s'avère, dans la pratique, tout aussi efficace vis à vis des phénomènes cycliques. L'observation événementielle permet ainsi de différencier les types de défaut d'engrènement, les degrés de gravité de défaut de roulement, et dans une moindre mesure, les degrés de désalignement. De plus, l'approche angulaire au niveau de l'acquisition n'empêche pas d'éventuellement rééchantillonner le signal dans le domaine temporel pour mettre à profit les techniques qui s'appuient sur les vibrations modales de la structure, telles que l'enveloppe et le kurtogramme.

La résolution fréquentielle particulièrement élevée que permet l'observation angulaire apporte aussi de nouveaux résultats en matière de surveillance de roulement, dont les fréquences caractéristiques s'avère évaluables même dans le cas d'un roulement sain. En effet, la fréquence caractéristique de la bague externe fut clairement identifiable sur le banc d'essais et l'ensemble des fréquences caractéristiques des roulements de la génératrice fut atteignable sur l'éolienne. Cette qualité offre la perspective d'adapter les indicateurs d'un système de surveillance aux éléments roulants de chaque machine en éclaircissant les paramètres du roulement, qui sont souvent marqués d'incertitude plus ou moins grossière, et leur dépendance vis à vis des conditions de fonctionnement et de montage, qui s'avèrent influencer légèrement sur ces fréquences caractéristiques. Il est d'ailleurs montré que les fréquences caractéristiques sont d'avantage sensibles aux

²⁸Séparation des composantes déterministes et aléatoires.

conditions de fonctionnement et de montage qu'à la gravité d'un défaut localisé.

D'ailleurs, les paramètres qui caractérisent la gravité d'un défaut artificiel de roulement, classiquement limité à ceux qui définissent sa géométrie macroscopique, sont ici étendus à ceux représentatifs de l'état microscopique. Les résultats en la matière montrent que la surveillance angulaire est particulièrement sensible à ce nouveau paramètre, dont l'évolution pratique est plus subtile que le premier. Une collaboration entre des spécialistes de l'usure des roulements et des expérimentateurs disposant de banc d'essais insensibles aux opérations de montage peut d'ailleurs conduire à l'établissement d'un modèle prévisionnel de l'évolution d'un défaut par surveillance angulaire en générale, et par le biais d'une mesure de vitesse instantanée en particulier.

En effet, au delà de l'apport engendré par l'approche angulaire, les résultats obtenus par surveillance vibratoire se distinguent de ceux obtenus par analyse de la vitesse instantanée. Si un accéléromètre est sensible aux vibrations transmises par les efforts radiaux au carter de la structure, le capteur angulaire est principalement sensible aux vibrations transmises par les efforts tangentiels via la ligne d'arbre. Cette distinction justifie la supériorité de la vitesse instantanée au sujet des résultats obtenus sur le suivi du désalignement angulaire, dont la relation cinématique simplifiée fait directement intervenir la vitesse de rotation, mais aussi sur le diagnostic de l'engrènement, dont l'erreur de transmission est classiquement utilisée comme un indicateur pertinent. En outre, l'accéléromètre montre une sensibilité particulière à l'état du carter, dont la dégradation est directement influente sur les indicateurs des éléments roulants. En revanche, la facilité de l'installation des accéléromètres est indéniable et permet d'accéder aux zones où l'installation d'un capteur angulaire reste délicate.

Si la faisabilité de surveiller l'intégralité de la structure mécanique en n'utilisant qu'un capteur de vitesse angulaire instantanée reste envisageable, notamment parce qu'un défaut de roulement localisé s'avère identifiable par un capteur magnétique situé au delà de deux trains d'engrenage du palier, il est clair que ce type de mesure est marqué par des facteurs limitants. Tout d'abord, la perturbation géométrique introduit une erreur aujourd'hui encore indissociable des éléments dont la fréquence caractéristique est multiple de l'ordre de l'arbre qui porte le capteur. Ensuite, la distance qui sépare l'élément surveillé du capteur a inévitablement un effet nuisible sur la qualité de la surveillance, si bien que parmi les roulements sains, seuls ceux de la génératrice furent directement identifiés sur les mesures obtenues à partir du capteur angulaire installé du même coté de l'accouplement flexible.

Conclusion Générale

Synthèse du travail effectué

Ce travail a débuté par une étude approfondie de l'analyse vibratoire, qui jouit aujourd'hui d'une représentativité importante dans le secteur éolien. La certification attribuée par Germanischer Lloyd aux systèmes de surveillance dédiés à ce domaine, document représentatif de l'état de l'art industriel, impose l'utilisation de l'analyse vibratoire. Effectivement, l'analyse vibratoire repose sur une expérience de plus de 50 ans sur laquelle nous nous sommes appuyés.

Profitant d'une rétrospective sur les outils de diagnostic et autres indicateurs développés en surveillance vibratoire, cette exploration a offert une justification pertinente de l'approche angulaire, que les conditions de fonctionnement soient stationnaires ou non. En outre, si les systèmes d'acquisition proposant l'échantillonnage angulaire direct d'un signal analogique sont coûteux, les méthodes de rééchantillonnage basées sur un système d'acquisition classique associé à un capteur angulaire montrent d'aussi bon résultats. Au regard des résultats obtenus, il est même envisageable de comparer ces résultats à ceux obtenus sans l'utilisation de capteurs angulaires. Néanmoins, cette dernière solution étant limitée aux faibles variations de vitesse, il est peu probable que la manipulation de longs signaux soit fiable dans le domaine éolien.

L'analyse de la vitesse angulaire instantanée a ensuite été abordée comme une alternative pertinente aux mesures accélérométriques. Après présentation des procédés d'obtentions de cette mesure, la méthode d'« Écart Temporel » a été retenue en raison de son triple avantage : une discrétisation angulaire du signal, une mise en œuvre simple et une fréquence de comptage élevée. La précision des observations spectrales dressées à partir cette méthode a néanmoins été étudiée en détail et des résultats originaux permettent aujourd'hui d'estimer l'influence des paramètres de conception ainsi que ceux de fonctionnement. Il a été particulièrement intéressant de constater qu'un phénomène vibratoire dont l'amplitude est inférieure à la résolution de la mesure de vitesse instantanée peut être révélé par la variation macroscopique de cette même vitesse de rotation.

Pour appuyer les méthodes d'acquisition retenues, certains outils de traitement ont été adaptés à l'observation angulaire, quand d'autres ont été spécialement développés pour améliorer la mesure de vitesse instantanée. Cette dernière se montrant particulièrement sensible à l'évolution de la vitesse moyenne de rotation et exigeant une fréquence

d'acquisition plus élevée qu'à l'accoutumée, ces outils se sont avérés indispensables à l'analyse des mesures effectuées pendant la thèse. La possibilité d'appliquer les outils cyclostationnaires sur la mesure de vitesse instantanée est aussi une réelle avancée dans le domaine, initiée par l'étude de l'enveloppe spectrale. Ces derniers outils bénéficient d'une réelle perspective d'évolution dans la mesure où la fréquence de comptage dispose d'une importante marge de progression. Des solutions d'acquisition actuellement disponibles dans le commerce sont équipées de compteurs dont la fréquence atteint $10GHz$.

Enfin, les méthodes de mesures associées aux outils de traitement les plus adaptés ont été mis à l'épreuve sur différents bancs d'essais. Sous des conditions de fonctionnement stationnaires, l'approche angulaire et plus particulièrement la mesure de vitesse instantanée s'avèrent capable de distinguer un type de défaut d'engrènement et d'évaluer le niveau d'avancement d'un défaut de roulement. Ces résultats se sont révélés dépendant des conditions de fonctionnement et de fait, l'approche statistique qui permet d'associer une loi de probabilité paramétrique à chaque indicateur a été appliquée avantageusement aux mesures issues de l'éolienne.

Perspectives

Ce travail invite à réaliser différents modèles mécaniques pour supporter les campagnes expérimentales et faciliter le dimensionnement du système d'acquisition. Les résultats de ces modèles sauront être analysés par les outils présentés dans ce mémoire, et pourront orienter la campagne de mesure actuellement en cours sur l'éolienne. Si cette discussion n'est abordée qu'en conclusion, des investigations ont toutefois été lancées en parallèle à ce travail.

Un premier niveau de modèle vise à introduire une excitation cyclique dans une structure dynamique simple. Bien qu'on puisse imaginer utiliser un schéma itératif temporel pour retrouver la localisation exacte des impulsions cycliques, cette opération est suspectée de souffrir d'un manque de précision correspondant à l'erreur faite sur leur localisation. Fort de cette hypothèse, nous avons proposé un schéma itératif original, basé sur des équations différentielles non linéaires, pour résoudre les équations dynamiques directement dans le domaine angulaire [BOU 10]. Associé à un banc d'essais développé trop récemment pour que les résultats ne puissent être inclus dans ce mémoire, nous espérons retrouver les paramètres mécaniques qui définissent un défaut localisé de roulement.

En effet, ce banc d'essais a été récemment réalisé à l'appui de l'expérience apportée par ceux étudiés dans cette thèse. Dépourvue de transmission, cette ligne d'arbre illustrée sur la figure 4.37 est chargée axialement et radialement par deux systèmes de serrage dont l'ajustement est maîtrisé. Les conditions de chargement du roulement sont donc paramétrables, et une campagne de mesure peut viser à déterminer les lois suivies par les composantes spectrales du roulement vis à vis des conditions de fonctionnement et de

chargement.

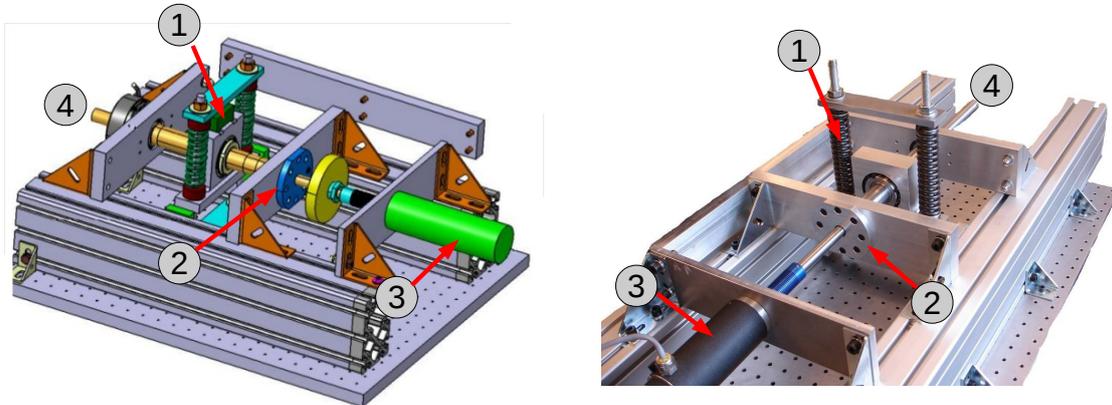


FIG. 4.37: Représentation du banc angulaire. 1) système de chargement radial, 2) roulement surveillé, 3) frein et 4) moteur électrique.

Les résultats apportés par cette étape intermédiaire pourraient nourrir un modèle mécanique plus élaboré, où les défauts seraient implémentés de manière réaliste sur des structures dynamiques complexes, telles que la ligne d'arbre d'éolienne. Ce second niveau de modèle aborderait les sujets suivants :

1. vérifier l'influence de la voie de transfert sur l'observation spectrale de vitesse angulaire instantanée. En particulier, le bruit de fond premièrement interprété comme électrique saurait-il être associé à l'amortissement structurel de la ligne d'arbre ?
2. maîtriser l'influence de la voie de transfert sur un défaut localisé en fonction de sa nature. En effet, on imagine bien que la composante radiale d'un défaut cyclique n'a pas la même influence que sa composante tangentielle : son filtrage par la voie de transfert ainsi que son interprétation par le système de mesure en serait dépendante.
3. identifier les zones idéales de positionnement d'un capteur angulaire qui optimisent l'observation des éléments sous surveillance. Doit-on s'appuyer sur les ventres de résonance structurelle ? doit-on privilégier les arbres à faibles inerties ou à faibles vitesses ?

En marge des travaux à conduire dans le domaine de la modélisation, une démarche pourrait être entreprise pour estimer la durée de vie résiduelle des roulements surveillés. Bien que ce domaine de recherche soit encore largement prospectif, une collaboration avec des spécialistes de la dégradation de roulement paraît enrichissante. Comprendre l'évolution d'un défaut localisé de roulement, en matière de géométrie macroscopique, microscopique et en fonction de ses conditions de chargement, c'est s'offrir une chance d'incorporer un modèle de vieillissement dans le modèle mécanique défini précédemment. On pourrait enfin imaginer utiliser le modèle mécanique pour prévoir

l'histogramme que suivrait l'indicateur de l'élément sujet à vieillissement.

Le travail réalisé lors de cette thèse ne finalise en réalité qu'une première étape par rapport à l'objectif qui consiste à concevoir un système de diagnostique d'une ligne d'arbre d'éolienne. L'auteur pense avoir apporté les éléments de réflexion permettant la définition d'un tel système, en proposant des solutions permettant d'exploiter au mieux les propriétés physiques des signaux mesurés.

Annexe A

Surveillance Vibratoire

A.1 Quelques indicateurs vibratoires

A.1.1 Indicateurs basés sur le moment d'ordre 2

La valeur efficace

La valeur efficace est la racine carrée du moment d'ordre 2 d'un signal centré autour de 0, comme indiqué Eq.A.1. Cet indicateur, largement utilisé dans bien d'autres domaines que la surveillance vibratoire, est représentatif des indicateurs d'ordre 2 tel que le facteur de crête ou le rapport énergétique.

$$RMS_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (\text{A.1})$$

Une écrasante majorité des normes développées pour caractériser l'état d'avancement de l'usure d'une machine sont basées sur cet indicateur. Mises en place par consensus entre utilisateurs et fabricants, ces normes sont standardisées avec des critères légèrement différents selon l'application ou le pays [THO 04] [ROB 03].

- ISO 2372 : Norme pour les machines dites normales.
- ISO 3945 : Norme pour les générateur et moteurs dont la puissance est supérieure à 300kW.
- ISO 7919 : Norme pour les mesures sur les parties rotatives
- ISO 10816 : Normes pour les mesures sur les parties fixes d'une machine tournante.
- ISO 13373, ISO 17359 : Normes définissant le process de mesure
- API Standards : Normes établies par l'industrie pétrochimique américaine
- CDA/MS/NVHS107 : norme canadienne indiquant des seuils de préalarmes, prenant en compte l'age de la machine.

Tous ces niveaux critiques d'intensité vibratoire ont été établis en vitesse efficace pour des vibrations se manifestant entre 10 et 1000Hz et sont exemplaires de l'approche énergétique mise en place pour surveiller les machines tournantes. Les procédures d'évaluation de ces indicateurs temporels standards sont limitées aux mesures large

bande sans prise en compte de la répartition fréquentielle.

Il est important de noter qu'une valeur efficace ne peut être définie que pour un signal aléatoire ergodique. C'est bien le cas d'une mesure vibratoire à vitesse constante, mais pas forcément d'une mesure de vitesse instantanée. Particulièrement dans le cas d'une mesure effectuée quand la vitesse macroscopique évolue, aucun des signaux vitesse instantanée et vibratoire angulaire ne peuvent être considérés ergodiques. Ce problème limitera l'utilisation de tous les indicateurs définis à partir de la valeur efficace.

Facteur de crête

Le facteur de crête est défini comme la division de l'amplitude du plus grand pic par la valeur efficace du signal vibratoire [SWA 80]. Il est donné par l'Eq. A.2 où $\mu_{x_i}^{(1)}$ représente la moyenne empirique de la réalisation x_i :

$$CF = \frac{\max(x_i) - \hat{\mu}_{x_i}^{(1)}}{RMS_x} \quad (\text{A.2})$$

CF est une mesure normalisée de l'amplitude du signal et est conçue pour augmenter en présence d'un faible nombre de défauts induisant des pics d'amplitude élevée. Si les vibrations sont de type harmonique, il présente un rapport de crête de l'ordre de 1.4. Si la vibration est de type aléatoire ou impulsif, le facteur de crête croitra à des valeurs supérieures à 3.

Moyennage synchrone

Le premier pas suivi pour améliorer la qualité des indicateurs fut d'améliorer la qualité de l'observation, en agissant notamment sur le rapport signal/bruit. On entend par bruit tout phénomène influant sur l'indicateur sans pour autant représenter l'état de l'élément sous surveillance : perturbations électriques, magnétiques et les vibrations mécaniques émises par d'autres systèmes que celui sous surveillance. Tous les indicateurs sont sensibles au bruit de mesure, mais les plus fins d'entre eux rendent l'utilisation d'outil de "nettoyage" indispensable. Traditionnellement, le bruit blanc est réduit par moyennage temporel synchrone [BRA 75]. Cet outil s'est avéré être à double tranchant dans le cas des engrenements qui, à l'instar d'autres types de transmissions, induisent des variations de charge et de vitesse en fonction du nombre de dents en contact. Dans le cas des machines de puissance élevée, la variation de vitesse induite par la transmission tend à rendre la signature vibratoire de l'engrenement aussi vulnérable au moyennage temporel que le bruit électrique [C.J 00]. La première solution fut de limiter la surveillance de la ligne d'arbre aux périodes où les engrenements ne sont pas chargés, trahissant de fait la philosophie du contrôle en ligne. Stander et Heyns ont combiné l'échantillonnage angulaire et le moyennage temporel synchrone pour isoler les phénomènes cycliques par moyennage angulaire synchrone [C.J 02].

FM0.

FM0 fut formulé comme un indicateur robuste vis à vis des défaut d'engrènement lourds car il vise à surveiller les changements de forme majeurs dans la signature du signal [STE 77]. L'indicateur FM0 est la division du niveau crête à crête du signal moyenné par la somme des amplitudes correspondant aux composantes fréquentielles de l'engrènement en question (Eq. A.3). Les défauts localisés tels qu'une rupture de dent élèvent le niveau crête à crête. Pour les défauts répartis avancés, bien que le niveau crête à crête n'évolue pas, c'est l'amplitude des composantes spectrales correspondant au défaut qui a tendance à décroître. Dans ces deux cas, l'indicateur FM0 augmente avec l'apparition d'un défaut.

$$FM0 = \frac{\max(x_i)}{\frac{1}{N} \sum_{h=0}^M |\mathcal{F}_{x_i}(f_h)|} \quad (\text{A.3})$$

où $\mathcal{F}_x(f)$ est la Transformée de Fourier. La normalisation par N considère que la mesure x_i est pondéré par une fenêtre d'apodisation rectangulaire. Dans cette approche, première du genre, l'estimation globale issue du signal temporel est mêlée à une évaluation pouvant être très fine issue de l'observation spectrale associée.

A.1.2 Indicateurs basés sur le moment d'ordre 4

Le kurtosis

Cet indicateur estime le moment normalisé d'ordre 4 d'un signal x . Le kurtosis est un indicateur de l'irrégularité d'un signal, ou encore du nombre et de l'amplitude des pics présents dans le signal.

$$Kurt = \frac{N \sum_{i=1}^N \left(x_i - \mu_x^{(1)} \right)^4}{\left(\sum_{i=1}^N \left(x_i - \mu_x^{(1)} \right)^2 \right)^2} \quad (\text{A.4})$$

Le kurtosis d'un signal harmonique équivaut à son facteur de crête. Un signal constitué exclusivement d'un bruit gaussien voit son kurtosis tendre vers 3, et les résultats supérieur seront considérés comme représentatif d'une machine dont l'usure est avancée [BOU 99]. Le kurtosis est ici présenté comme l'indicateur d'ordre 4 représentatif de toute une famille dont quelques éléments sont présentés ci-dessous. Utilisé sur l'ensemble d'un signal sans plus de distinction, cet indicateur est à l'interface des familles énergétiques et typologiques. Les méthodes dérivées du kurtosis décrites ci-dessous sont utilisées sur des signaux pré-traités par moyennage synchrone directement après leur digitalisation, afin de révéler les composantes strictement périodiques et de noyer les perturbations aléatoires. Sans être clairement énoncé, le caractère cyclo-stationnaire d'ordre 1 de l'engrènement est recherché à travers de nouveaux indicateurs topologiques.

L'indicateur FM4

Il a été développé pour détecter les signatures vibratoires liées aux défauts répartis sur un nombre de dents limité [STE 77]. L'équation A.5 présente le quatrième moment statistique appliqué au signal résiduel, obtenu après soustraction des composantes cyclostationnaires d'ordre 1 du signal original. Pour un engrenement en bon état, le signal résiduel se limiterait à un bruit gaussien. Avec l'apparition d'un défaut sur 1 ou 2 dents, une série de pic apparait dans le signal résiduel augmentant son kurtosis bien au-delà de 3.

$$FM4 = \frac{N \sum_{i=1}^N \left(r(i) - \mu_r^{(1)} \right)^4}{\left(\sum_{i=1}^N \left(r(i) - \mu_r^{(1)} \right)^2 \right)^2} \quad (A.5)$$

où $r(i)$ est la $i^{\text{ème}}$ valeur prise par le signal résiduel, $\mu_r^{(1)}$ est la moyenne du signal résiduel et N est la taille du signal.

L'indicateur NA4

Il a été développé en 1993 pour s'adapter à l'évolution du défaut tel qu'il est détecté par l'outil précédent [J.J 93]. C'est un kurtosis presque normalisé qui est obtenu depuis le signal résiduel comme détaillé Eq.A.6

$$NA4(M) = \frac{N \sum_{i=1}^N (r_M(i) - \bar{r}_M)^4}{\left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (r_j(i) - \bar{r}_j)^2 \right)^2} \quad (A.6)$$

où \bar{r}_M est la moyenne du $M^{\text{ème}}$ signal résiduel, M est le nombre signaux mis en comparaison et j l'indice identifiant le signal parmi l'ensemble des mesures. Comme l'indicateur précédent, $NA4$ est adimensionné et tend vers 3 si l'ensemble des signaux résiduels sont purement gaussiens.

Le paramètre NB4

Il fut développé par Zakrajsek, Handschuh and Decker en 1994 comme un indicateur de défaut de denture localisé [ZAK 94]. La création de cet indicateur est justifiée par la variation de charge différente qu'elle soit transmise par une dent avariée ou par une dent saine. Cette variation peut être observée sur l'enveloppe du signal. Comme pour $NA4$, $NB4$ est basé sur un kurtosis quasi normalisé. Cependant, le signal résiduel est remplacé par l'enveloppe d'un signal préalablement convolué au travers d'un filtre passe bande centré autour de la fréquence d'engrènement.

L'indicateur NA4*

C'est une amélioration du $NA4$ développée en 1994 par Decker, Handschuh and Zakrajsek [H.J 94]. Le dénominateur de $NA4$ est bloqué quand la variance du signal résiduel

atteint un seuil prédéterminé. cette modification est basée sur l'observation d'un défaut progressant d'une indentation localisée à une usure répartie. L'augmentation significative de la variance induit un repli du kurtosis aux valeurs nominales. En normalisant le moment d'ordre 4 par la variance d'un niveau de référence défini à partir des mesures où la transmission fonctionne correctement sous des conditions nominales, l'aptitude à suivre la tendance de l'évolution du défaut est améliorée. Il est empiriquement montré que la variance d'un signal d'une transmission dégradée dépasse celle d'une transmission saine. Le dénominateur est verrouillé à la limite supérieure L définie telle que :

$$L = \bar{v} + \frac{Z}{\sqrt{N}}\sigma \quad (\text{A.7})$$

où \bar{v} est la valeur moyenne des variances précédentes, Z est le coefficient de probabilité choisi pour une distribution normale, σ est l'écart type des variances précédentes et M est le nombre d'échantillons. Pour une distribution normale, Z est défini théoriquement. Néanmoins, il est conseillé d'arrêter le choix de Z après expérimentation car un nombre de valeurs trop faible peut conduire à une pluie de dépassement de seuil. De même, le paramètre $NB4^*$ verrouille l'estimation de la variance pour améliorer l'observation $NB4$.

Ces deux derniers indicateurs sont particulièrement révélateurs de la philosophie suivie pour surveiller une machine tournante. La connaissance empirique du défaut a successivement permis d'affiner la surveillance en ciblant les différentes fréquences caractéristiques puis la tendance prise par ces mêmes composantes avec l'évolution du défaut.

A.2 Quelques outils de traitement

A.2.1 Méthodes de réduction de bruit

L'intérêt est ici porté aux méthodes menant à dissocier les composantes spectrales discrètes des composantes continues d'un signal. Ce problème, récurrent en traitement du signal, traduit la volonté de distinguer des phénomènes physiques différents avec des moyens adaptés. Les outils de traitement appliqués en aval des méthodes de réduction peuvent être choisis en fonction des propriétés statistiques des signaux obtenus à partir de ces mêmes méthodes.

Méthodes ANC

De l'anglais *adaptive noise cancelation*, les méthodes ANC font partie de celles qui permettent de faciliter l'observation de la signature vibratoire d'un roulement sous des conditions environnementales difficiles (rapport signal bruit faible). La méthode ANC est réalisée en utilisant deux signaux vibratoires synchrones provenant de deux capteurs vibratoires respectivement situés à proximité du phénomène surveillé et du phénomène perturbateur. Le capteur situé à proximité de l'élément sous surveillance est le capteur

principal, tandis que celui localisé aux environs de la source supposée de bruit est le capteur de référence. Idéalement, le capteur de référence ne contient pas l'information d'intérêt fournie par le capteur principal, et le filtre adaptatif qui lui est appliqué permet de construire le bruit perturbateur présent sur les deux signaux. Ce bruit est ensuite soustrait du signal principal et facilite la surveillance du phénomène faiblement énergétique. Une réalisation typique de cette méthode est présentée dans le cas de la surveillance vibratoire d'un palier distant (comme le roulement principal de l'éolienne) d'une boîte de vitesses bruyante par un accouplement [BAN 85].

Méthodes SANC

Dans l'espoir de se passer d'un capteur de référence, Randall et Li ont adapté la méthode "Adaptive Line enhancer" aux signaux vibratoires pour dissocier roulements et engrenements à partir d'un seul capteur et l'ont renommée de manière à faire référence à la méthode détaillée précédemment [RAN 95]. De l'anglais *Self adaptive noise cancellation*, cette méthode a donc le même objectif que la méthode ANC. À l'appui du théorème de Wold qui certifie l'unicité de la décomposition d'un signal vibratoire en une composante périodique et un résidu non déterministe, il est question de prédire la composante déterministe du signal en fonction d'un nombre fini de valeurs passées du signal complet. De nombreuses discussions visent à optimiser la pondération affectée aux échantillons pour donner la meilleure estimation de la partie déterministe. Le principe de la méthode SANC est basée sur le traitement du signal vibratoire retardé par un filtre transverse puis sa soustraction du signal vibratoire instantané pour produire une prédiction de l'erreur. Le filtre transverse est ajusté pour minimiser cette erreur selon différentes méthodes dont la plus réputée reste celle des moindres carrés. En outre la réflexion menée sur la méthode d'optimisation, l'ajustement des paramètres tels que la taille du filtre, le facteur d'oubli ou le délai laissé entre le dernier point du signal retardé et l'instantané est aussi l'objet de plusieurs recherches.

Méthodes DRS

La méthode SANC ayant des problèmes de convergence, il est courant de traiter le signal de nombreuses fois avant d'espérer retenir une solution optimale. Dans le cas des signaux stationnaires, d'autres approches permettent d'obtenir la même solution sans passer par un processus d'adaptation. L'estimation des filtre H_1 en analyse modale est, par exemple, basée sur le moyennage d'une série de transformée de Fourier effectuée bloc par bloc. De l'anglais *discrete random separation*, cette méthode génère la fonction de transfert linéaire qui sépare le signal instantané de sa version retardée et apparaît ainsi comme un moyen plus efficace de prédiction de sa partie déterministe [ANT 04b]. Cette fonction de transfert convoluée au signal instantané estime la partie périodique du signal qui, par soustraction, permet aussi de révéler la composante non déterministe du signal.

A.2.2 Méthode d'enveloppe

Un outil de traitement fréquentiel très apprécié par la communauté scientifique est l'analyse de l'enveloppe : cette méthode permet d'analyser les modulations des oscillations hautes fréquences par les excitations basses fréquences liées aux défauts recherchés. Cet outil a originellement permis aux acousticiens de caractériser le son généré par un synthétiseur, et notamment l'évolution temporelle de son amplitude au cours du temps. Il s'est montré aussi particulièrement adapté pour la surveillance des défauts caractérisés par une signature vibratoire impulsionnelle oscillante comme ceux observés au moyen d'un accéléromètre.

Liens avec l'analyse cyclostationnaire

Se focalisant sur la réponse de la structure qui sépare le capteur vibratoire à l'impulsion générée par le défaut, l'enveloppe est souvent utilisée pour révéler un phénomène faiblement énergétique sur l'observation spectrale. En ce sens, l'enveloppe peut être vue comme un outil distinguant les phénomènes temporels des phénomènes angulaires. La réponse de la structure est caractérisée par ses modes propre (fonction du temps) tandis que le rythme caractéristique du défaut d'un élément tournant dépend de sa position angulaire. Ainsi, les phénomènes excitateurs voient leurs propriétés statistiques évoluer cycliquement tandis que les phénomènes filtrant voient leurs propriétés statistiques évoluer périodiquement. Différencier les phénomènes excitateurs, cycliques, des phénomènes filtrant, temporels, est l'un des objectifs de la cyclo-stationnarité. D'ailleurs, de nombreuses références appliquent cette méthode à la densité spectrale de puissance pour étudier l'enveloppe carrée ([ZHU 06],[PIC 09],[RAN 00]) qui se trouve être un cas particulier de l'analyse cyclo-stationnaire [ANT 09b].

Opérateur de moyennage cyclique

En effet, le spectre de puissance cyclique $P_x(t, f; \Delta f)$ représente toutes les enveloppes en fonction de leur fréquence porteuse f , calculées sur l'intervalle fréquentiel constant Δf .

$$P_x(t, f; \Delta f) = \mathcal{P}\{|x_{\Delta f(t;f)}|^2\} \quad (\text{A.8})$$

où la moyenne cyclique \mathcal{P} symbolise l'extraction de l'ensemble des composantes périodiques d'une fonction temporelle. Cet opérateur symbolise donc la convolution du signal d'origine par une batterie de filtres passe bande de largeur Δf et respectivement centré de manière à couvrir l'intervalle fréquentiel complet. La cyclostationnarité d'ordre 1 est relative à toute composante non nulle extraite par l'opérateur $\mathcal{P}\{x(t)^1\}$, tandis que la cyclostationnarité d'ordre 2 est relative à toute composante non nulle extraite par l'opérateur $\mathcal{P}\{|x(t)|^2\}$. Comme nous l'avons vu dans la partie A.2.1, il est adroit d'analyser ces deux types de cyclostationnarité séparément, car en plus d'être générés par des phénomènes physique différents, les phénomènes cyclostationnaires d'ordre 1 peuvent masquer les phénomènes cyclostationnaires d'ordre 2.

Spectre de Modulation cyclique

L'analyse spectrale du spectre de puissance cyclique peut passer par le spectre de modulation cyclique, qui regroupe ainsi l'ensemble des enveloppes spectrales obtenues depuis $P_x(t, f; \Delta f)$. Le spectre de modulation cyclique est classiquement estimé à partir du périodogramme, lui même déterminé en s'appuyant sur la Transformée de Fourier à Court Terme ¹ du signal x élevée au carré .

$$CMS(\alpha, f) = \frac{1}{I} \sum_{i=0}^{I-1} |\tilde{\mathcal{F}}_x(f, t_i)|^2 e^{-j2\pi\alpha t_i} = \mathcal{F}_{|\tilde{\mathcal{F}}_x(f, t_i)|^2}(\alpha) \quad (\text{A.9})$$

Il est à noter que cette formulation est un cas particulier dont l'approximation n'est valide que dans le cas où le régime de fonctionnement est stable : les deux Transformées de Fourier Discrète employées dans cette estimation sont appliquées sur un signal échantillonné dans le même domaine. Néanmoins, la première TFD concerne les phénomènes temporels correspondant aux structures résonnantes, tandis que la seconde TFD concerne les phénomènes excitateurs cycliques.

De plus, la TFCT souffre d'un compromis en terme de résolution temps/fréquence qui limite sérieusement son utilisation dans les problèmes de détection car explose les coûts de calcul associés. La solution de ce problème, que le spectre de modulation cyclique partage avec le kurtogramme, est brièvement présentée dans le paragraphe suivant.

L'estimation du Kurtogramme

Présenté en quelques mots dans la partie A.1.2, le Kurtosis estime le moment normalisé d'ordre 4 d'un signal. Une fois appliqué à l'enveloppe d'un signal non stationnaire, Le « Kurtosis Spectral » estime l'impulsivité contenue dans la bande fréquentielle démodulée à travers l'enveloppe. L'amplitude atteinte par le Kurtosis Spectral s'avère dépendre tout autant de l'impulsivité contenue dans l'enveloppe que de la largeur et de la position où l'enveloppe est démodulée [ANT 06a]. Ainsi, dans un mode de réalisation où l'on cherche à identifier quel couple (f, df) doit caractériser le passe bande extracteur de l'enveloppe, les résultats obtenus pour différentes combinaisons sont ordonnés dans un Kurtogramme [ANT 06b]. L'estimation du Kurtogramme est une tâche extrêmement laborieuse tant qu'elle est basée sur la TFCT. Heureusement, une méthode originale de calcul permet d'obtenir le kurtogramme et les enveloppes associées à partir d'une manipulation astucieuse dont la complexité de calcul est comparable à celle de l'algorithme de Cooley-Tukey [ANT 07a]. Cette méthode n'est pas basée sur la TFCT mais sur la convolution du signal temporel par les filtres passe-bande dont la forme est optimisée pour en minimiser le nombre.

¹développée dans la partie A.2.4

A.2.3 Analyse cepstrale

Le cepstre est un anagramme de "spectre". C'est une transformée qui utilise l'effet cumulatif du logarithme pour séparer un signal de sa modulation. Techniquement, il est obtenu en prenant la transformée de Fourier inverse du logarithme de la densité spectrale de puissance d'un signal x :

$$\mathcal{C}_{xx}(\tau) = \mathcal{F}^{-1} \{ \log(\mathcal{D}_{xx}(f)) \} \quad (\text{A.10})$$

L'unité de l'abscisse du cepstre est homogène à un temps et peut être considérée comme "temps périodique". Le logarithme va d'une part mettre en valeur les composantes basse fréquence de la densité spectrale de puissance, et d'autre part transformer le produit de convolution qui lie l'excitation à la voie de transfert en une simple somme. L'influence de la voie de transfert sur l'excitation représentative du défaut est additive sur le cepstre et les deux peuvent être analysés séparément [RAN 87]. L'orthographe de cepstre peut surprendre, mais souligne l'analogie spectrale souhaitée par ses initiateurs. Il est pratique de considérer le cepstre comme l'observation spectrale d'une densité spectrale de puissance. Pour supporter cette philosophie, tous les termes relatifs à l'étude cepstrale sont déformés pour renvoyer à leur analogue spectral. (spectrum \rightarrow cepstrum, frequency \rightarrow quefrequency, *etc...*) Typiquement, le cepstre peut être utilisé en surveillance vibratoire pour démoduler les fréquences de rotation des fréquences caractéristiques d'un roulement. Il a récemment permis de différencier le diagnostic pour deux défauts localisés d'engrenage : un écaillage et une fissure [END 09]. L'analyse cepstrale fut aussi récemment utilisée comme estimateur de l'espérance de la distance séparant l'entrée d'un défaut en zone chargée de la sortie [SAW 11].

A.2.4 Méthodes temps-fréquence

Si l'observation spectrale est idéale pour l'étude de signaux stationnaires, elle est limitée dans le cas où les propriétés statistiques des phénomènes vibratoires sous surveillance évoluent au cours de l'observation. Dans le cas où des signaux non stationnaires sont à l'étude, on peut préférer l'utilisation d'outil d'observation Temps-Fréquence.

Transformée de Fourier à Court Terme

La Transformée de Fourier à Court terme (TFCT) est certainement le plus simple outil permettant de dissocier l'information temporelle du contenu fréquentiel d'un signal vibratoire. À l'image des outils présentés dans cette partie, la TFCT permet de déterminer l'amplitude et la phase des phénomènes vibratoires d'un signal dont la stationnarité évolue dans le temps. Une extension à l'observation Angle/Fréquence cyclique développée dans ce mémoire est une adaptation de la TFCT aux mesures angulaires, elle est présentée en détail dans ce paragraphe. Le calcul de la TFCT se décompose de la manière suivante : Soit $2M + 1$ échantillons d'un signal x échantillonné en temp, obtenus à la fréquence F_s .

$$\forall n \in [-M : M], \quad x_m(n) = x(n - m \cdot H) \quad (\text{A.11})$$

où x_m est le $m^{\text{ème}}$ segment du signal temporel formé de $2M + 1$ échantillons. Le délai H (en échantillons) qui distingue deux segments consécutifs définit le taux de recouvrement ². Le segment est multiplié point par point par une fenêtre de pondération de taille $2M + 1$ pour obtenir le $m^{\text{ème}}$ segment fenêtré.

$$\forall n \in [-M : M] , x_{m,w}(n) = x(n - m \cdot H) \cdot w(n) \quad (\text{A.12})$$

La TFCT est finalement obtenue en appliquant la transformée de Fourier à chaque segment $x_{m,w}$:

$$\tilde{\mathcal{F}}_x(f_k, t_m) = \frac{1}{2M + 1} \sum_{n=-M}^M x_{m,w}(n) e^{-j2\pi kn} \quad (\text{A.13})$$

avec $f_k = \frac{k}{2m+1} \cdot F_s$ la fréquence en hertz et $t_m = \frac{mH}{F_s}$ le temps en seconde, et permet l'observation duale Temps / Fréquence.

L'une des limitations principales de la TFCT réside dans le réglage de la double résolution fréquentielle/temporelle sous laquelle sont présentés les résultats. C'est la taille du segment, $2M + 1$, qui détermine aussi bien la résolution fréquentielle que la résolution temporelle. Une fenêtre large, par exemple, donne accès à une résolution fréquentielle élevée, mais augmente de fait l'espace séparant deux localisations spatiales (ou temporelles) consécutives. Bien qu'il soit possible de sélectionner les échantillons de manière à ce que les segments x_m et x_{m+1} partagent une zone de recouvrement, en prenant $H < 2M + 1$, les résultats qui ne respectent pas le principe d'incertitude de Heisenberg sont alors redondants. Le recouvrement est donc une parade imparfaite, source de problèmes liés au temps et au volume de calcul. Dans les cas d'application où ce problème devient limitant, la Transformée par Ondelettes prend tout son sens.

Transformée en ondelettes

Évolution intéressante de la Transformée de Fourier Court Terme, la transformée en ondelettes remplace la sinusoïde de la transformée de Fourier par une famille de translations et dilatations d'une même fonction : l'ondelette. Les paramètres de translation et de dilatation sont deux arguments de la transformée en ondelettes qui permettent de déterminer la fréquence d'un phénomène vibratoire ainsi que sa localisation spatiale (ou temporelle). La forme de l'ondelette permet aussi de rajouter un effet filtrant à la transformation. Cette méthode de traitement, très largement étudiée par la communauté du traitement du signal, a aussi fait de nombreux émules dans la communauté de la surveillance vibratoire [LEI 09]. On retient entre autre l'étude de Rafiee, qui superpose l'observation de plusieurs échantillons mesurés sous différentes vitesses de rotation, les signaux étant ré-échantillonnés en utilisant une interpolation en spline par morceaux pour obtenir des signaux comparables [RAF 09]. Wang invite à baser la méthode de surveillance de transmissions par engrenages sur la décomposition en ondelettes et certifie la performance de cet outil pour la détection précoce de défaut d'engrènement [WAN 08].

²« hop size » en anglais

La transformée de Wigner Ville

La distribution de Wigner Ville permet de situer dans le cycle un phénomène dont les propriétés statistiques sont périodiques de période celle du cycle. La distribution de Wigner Ville est utilisée dans l'étude du comportement d'un moteur à combustion interne où la mesure vibratoire est synchronisée angulairement [ANT 02]. Dans cet exemple, plusieurs artefacts apparaissent avec la même fréquence (1 fois par cycle) et sont déphasés les uns des autres. Ces artefacts, liés à l'ouverture ou la fermeture des soupapes, à l'injection ou à l'explosion d'un moteur à combustion sont des phénomènes cyclo-stationnaires de second ordre (car influencés par le comportement aléatoire de la mécanique des fluides, et dont les statistiques restent périodiques en respect de la cinématique du mécanisme).

A.2.5 Outils cyclo-stationnaires

Expliquée, détaillée et appuyée de nombreux exemples [ANT 09b], la cyclo-stationnarité est un concept gagnant en popularité qui porte sur la périodicité des propriétés statistiques d'un signal. La cyclo-stationnarité caractérise ainsi la différence entre les vibrations liées à des macro-phénomènes qui se répètent parfaitement sur des cycles périodiques et le comportement aléatoire d'un système influencé par des micro-phénomènes difficilement prévisibles. Si les premiers peuvent correspondre aux bruits d'engrènement, de balourds ou de faux ronds, le second s'identifie par les défauts d'écoulement fluide, de frottement sec ou encore des variations aléatoires de vitesse induites par un défaut de roulement (glissement ?) [ANT 09a]. Voici quelques outils s'y rapportant :

- la Densité Spectrale de Corrélation permet de comparer différents niveaux de cyclo-stationnarité (un niveau correspond à l'ordre de la variable statistique étudiée).
- la Cohérence Spectrale permet d'identifier les ordres de cyclo-stationnarité des phénomènes apparaissant sur la DSC.
- le spectre de Puissance Cyclique (équivalent à une analyse spectrale par enveloppe carrée), dont la supériorité sur l'analyse spectrale par enveloppe simple s'est révélée dans la majorité des cas [RAN 00].

A.3 Correction de rééchantillonnage

L'objectif de la partie 1.3.2 vise notamment à étudier l'influence de l'horloge utilisée pour cadencer l'acquisition du signal vitesse. Dans les applications usuelles, les accéléromètres sont rarement échantillonnés à des fréquences qui dépassent les $20kHz$. Une telle fréquence d'acquisition peut paraître trop faible pour estimer correctement le signal de vitesse utilisé pour le rééchantillonnage, surtout si le tachymètre à l'origine du signal vitesse est de résolution élevée.

A.3.1 Notations et hypothèses

La définition du Temps doit tout d'abord devenir relative pour que le problème puisse être abordé. Soit H une horloge de fréquence F_H en hertz. Les fonctions dont l'image est un nombre d'impulsion d'horloge H_i sont indicées de manière à préciser leur référence. En particulier, si $t(\theta_n)$ représente le temps pris par le système pour atteindre le segment θ_n en secondes, conformément à la terminologie employée dans la partie 2.2.1.3, on note $t_H(\theta_n) = t(\theta_n) \cdot F_H$ est le temps relatif qui représente le nombre d'impulsions délivrées par l'horloge H entre le départ de l'horloge et l'instant de franchissement du n^{eme} pas d'angle θ_n . Similairement, on note $\tau_H(\theta_n)$ le nombre d'impulsions délivrées par l'horloge H entre les instants de franchissement des segments consécutifs θ_{n-1} et θ_n :

$$\tau_H(\theta_n) = t_H(\theta_n) - t_H(\theta_{n-1}) \quad (\text{A.14})$$

Par soucis de simplification, le phénomène de quantification introduit dans le chapitre 2 n'est pas pris en compte ici. Les fonctions en question sont définies sur \mathbb{R}^+ et non sur \mathbb{N} . Ceci revient à considérer qu'il est possible de mesurer une quantité non entière de top horloge. Ainsi, si on note $f(\theta)$ une fonction dont l'image est un temps en seconde, il est possible d'affirmer que pour tout couple d'horloge H_i, H_j , on a l'égalité :

$$\frac{f_{H_i}(\theta)}{F_i} = \frac{f_{H_j}(\theta)}{F_j} = f(\theta) \quad (\text{A.15})$$

A.3.2 Influence de l'erreur sur le signal Vitesse Angulaire Instantanée.

La vitesse angulaire instantanée discrétisée est obtenue par l'équation A.16. On remarque que d'après l'équation A.15, $\omega(\theta_n)$ ne dépend pas de H tant que la fréquence de l'horloge F_H est en cohérence avec la mesure du temps $\tau_H(\theta_n)$.

$$\omega(\theta_n) = \frac{2\pi}{R} \cdot \frac{F_H}{\tau_H(\theta_n)} \quad (\text{A.16})$$

Si la fréquence de l'horloge présente une erreur d'estimation, on distingue alors la vitesse instantanée mesurée $\omega_m(\theta_n)$ de la vitesse instantanée réelle $\omega_r(\theta_n) = \omega(\theta_n)$ respectivement calculées à partir des mesures $\tau_{H_m}(\theta_n)$ et $\tau_{H_r}(\theta_n)$ mais de la même fréquence F_{H_r} . Une erreur s'introduit donc dans la mesure de la différence finie $\tau_{H_m}(\theta_n)$ et se répercute dans l'estimation de la vitesse instantanée telle que :

$$\omega_m(\theta_n) = \frac{2\pi}{R} \cdot \frac{F_{H_r}}{\tau_{H_m}(\theta_n)} \quad (\text{A.17})$$

En combinant les équations A.15 et A.17, l'erreur introduite dans la vitesse instantanée apparaît constante :

$$\forall n, \frac{\omega_m(\theta_n)}{\omega_r(\theta_n)} = \frac{\tau_{H_m}(\theta_n)}{\tau_{H_r}(\theta_n)} = \frac{F_{H_r}}{F_{H_m}} \quad (\text{A.18})$$

La fréquence des phénomènes cycliques n'est donc pas altérée. Seule l'amplitude des coefficients spectraux est transformée par homothétie du coefficient présenté dans l'équation A.18.

Pour valider expérimentalement ces premiers résultats, il est proposé de comparer deux signaux $\omega_1(\theta)$ et $\omega_2(\theta)$ mesurés simultanément sur le banc d'essais présenté dans l'Annexe D.1.1. Si la mesure du signal $\omega_1(\theta)$ est effectuée en utilisant la méthode angulaire à partir d'une acquisition analogique directement basée sur une horloge de fréquence $105kHz$, la mesure du signal $\omega_2(\theta)$ est effectuée en utilisant la méthode digitale basée sur une horloge de fréquence $120MHz$ (cf. §2.2.1.3). La fréquence de cette horloge est ensuite réduite à $105kHz$ en usant l'équation suivante :

$$t_{H_{105kHz}}(\theta) = \left\langle t_{H_{120MHz}}(\theta) \cdot \frac{105 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^6} \right\rangle \quad (\text{A.19})$$

où l'opérateur $\langle \cdot \rangle$ arrondit à l'entier directement supérieur et où $t(\theta)$ représente la fonction Angle/Temps utilisée pour rééchantillonner le signal vibratoire (cf. §1.3.1.2). Dans la pratique, la fonction Angle/Temps est obtenue à partir de la mesure de la vitesse instantanée $\tau(\theta)$ d'après la formule suivante :

$$t(\theta) = \sum_{\theta_i=0}^{\theta} \tau(\theta_i) \quad (\text{A.20})$$

Une simple différence finie donne accès à un signal $\tau_{H_{105kHz}}$ dont la fréquence d'acquisition est bien $105kHz$. La figure A.1 présente la superposition de spectres obtenus simultanément et usant de différentes horloges de fréquence proche de $105kHz$. L'observation spectrale superpose raisonnablement les deux densités spectrales de puissance, validant expérimentalement l'hypothèse selon laquelle l'erreur faite sur l'estimation de la fréquence sur l'observation en vitesse instantanée est négligeable. Il est à noter que les signaux ont été préalablement fenêtrés pour permettre le traitement sous ces conditions difficiles de fonctionnement (cf §. 3.3).

A.3.3 Influence de l'erreur sur le signal vibratoire.

On note \mathcal{P} le morphisme qui associe à un signal échantillonné en temps $x(t)$, et à la fonction Angle/Temps $t(\theta_n)$ présentée dans le paragraphe précédent, le même signal échantillonné en angle.

$$\mathcal{P} : \left. \begin{array}{l} x(t) \\ t(\theta_n) \end{array} \right\} \rightarrow \xi(n) = x(t(\theta_n)) \quad (\text{A.21})$$

On considère le signal correctement rééchantillonné quand les bases qui servent de référence temporelle pour les fonctions $x(t)$ et $t(\theta_n)$ sont identiques. Si l'on se place néanmoins dans le cas où la fonction Angle/Temps mesurée $t_{AT}(\theta_n)$ est obtenue à une

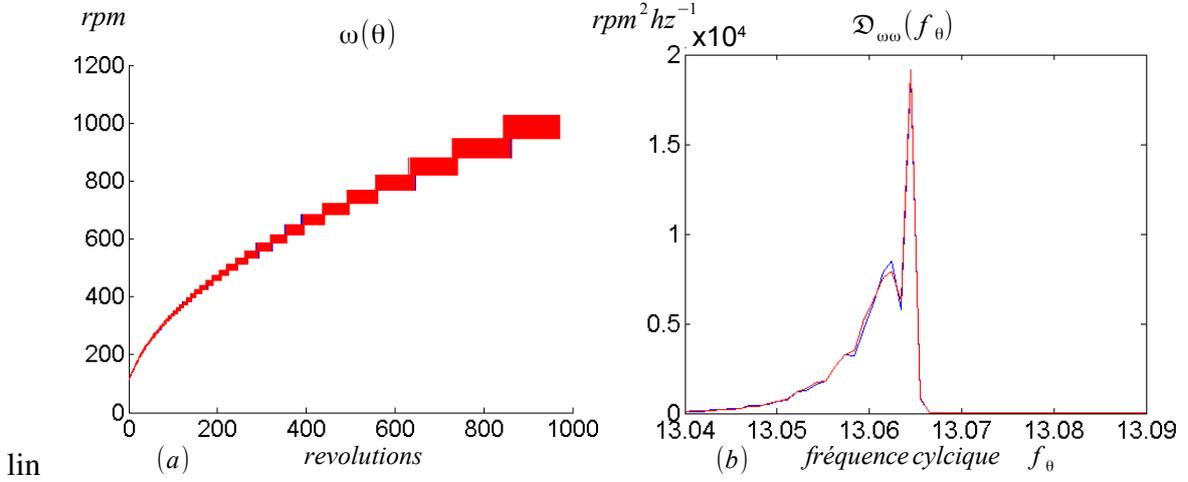


FIG. A.1: Superposition de l'observation en vitesse instantanée en utilisant deux horloges différentes de fréquence 105kHz. gauche : observation spatiale du signal $\omega(\theta)$, droite : densité spectrale de puissance de $\omega(\theta)$

fréquence F_{AT} différente de la fréquence F_{vib} utilisée pour l'acquisition du signal vibratoire $x_{vib}(t)$, l'équation A.15 permet de lier la fonction angle temps "biaisée" $t_{AT}(\theta)$ avec celle qui aurait été mesurée à partir de la fréquence F_{vib} , logiquement notée $t_{vib}(\theta_n)$:

$$t_{AT}(\theta_n) = \frac{F_{AT}}{F_{vib}} \cdot t_{vib}(\theta_n) \quad (\text{A.22})$$

Ainsi, la confusion introduite dans le rééchantillonnage $\xi_b(n)$ par l'utilisation de différentes horloges se traduit par l'expression biaisée

$$\mathcal{P} : \left. \begin{array}{l} x_{vib}(t) \\ t_{AT}(\theta_n) \end{array} \right\} \rightarrow \xi_b(n) = x_{vib} \left(\frac{F_{AT}}{F_{vib}} t_{vib}(\theta_n) \right) \quad (\text{A.23})$$

La transformée de Fourier respecte la propriété de contraction : une contraction dans le domaine réel entraîne une dilatation dans le domaine spectral du même rapport.

$$\mathcal{F}_{\xi_b}(f^\theta) = \frac{F_{AT}}{F_{vib}} \cdot \mathcal{F}_{x_{vib}(t(\theta))} \left(\frac{F_{AT}}{F_{vib}} \cdot f^\theta \right) \quad (\text{A.24})$$

Ainsi, l'amplitude et la fréquence cyclique apparaissent affectées par un rapport $\frac{F_{AT}}{F_{vib}}$. L'erreur en amplitude, similairement au cas évoqué dans le paragraphe précédent, est raisonnablement négligeable. Plus gravement, une erreur en fréquence peut induire une impossibilité de localiser un défaut. En effet, si un signal est chargé de phénomènes cycliques dont certaines harmoniques sont proches, la finesse de la résolution fréquentielle ne suffira pas à identifier les composantes fréquentielles contenues dans le spectre.

Pour valider expérimentalement l'approche proposée, deux signaux rééchantillonnés $\xi_1(\theta)$ et $\xi_2(\theta)$ sont obtenus simultanément, ce qui permet de considérer le contenu physique de chaque signal équivalent. Un seul signal vibratoire échantillonné à la fréquence de 105kHz a été utilisé pour rééchantillonner ces deux signaux. La différence entre $\xi_1(\theta)$ et $\xi_2(\theta)$ vient de la fonction angle temps utilisée pour recaler chacun d'eux. $\xi_1(\theta)$ s'appuie sur la fonction angle temps obtenue à partir du signal $\omega_1(\theta)$, originellement échantillonné avec la même horloge 105kHz . Parallèlement, $\xi_2(\theta)$ est rééchantillonné à partir de la fonction angle temps définie par $\omega_2(\theta)$, dont la mesure s'appuie sur une horloge à 120MHz .

La figure A.2, sur la gauche, présente la superposition des signaux rééchantillonnés à un instant où le décalage entre les deux signaux devient apparent. En effet, aucune différence ne distingue les signaux ξ_1 et ξ_2 lors des premiers tours. La perturbation impulsionnelle clairement reconnaissable sur les deux signaux permet de statuer que le retard pris sur les 765 premiers tours est de 0.2 tours.

La même figure, sur sa partie droite, présente la superposition des spectres d'amplitude des deux signaux angulaires. Il est intéressant de constater que seul le spectre associé à $\omega_1(\theta)$ correspond à la fréquence cyclique calculée par la cinématique du système, ainsi qu'à la fréquence cyclique correspondant aux observations spectrales de la vitesse instantanée de la figure A.1.

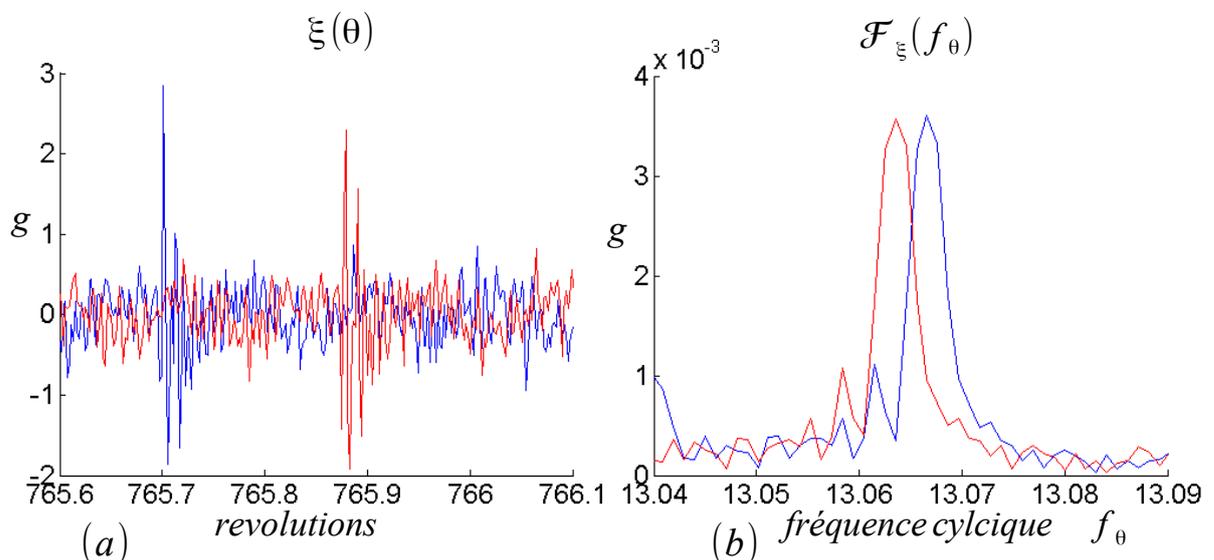


FIG. A.2: Superposition des observations vibratoires temporelles (à gauche) et spectrales (à droite) de 2 signaux rééchantillonnés à partir de $\omega_1(\theta)$ (en rouge) et de $\omega_2(\theta)$ (en bleu).

A.3.4 Correction de l'erreur sur le signal vibratoire.

À partir de l'équation A.24, l'effet de contraction spectrale est simplement corrigé en multipliant la répartition fréquentielle ainsi que l'amplitude des coefficients spectraux par le rapport inverse.

$$\mathcal{F}_\xi(f^\theta) = \frac{F_{vib}}{F_{AT}} \cdot \mathcal{F}_{\xi_b}\left(\frac{F_{vib}}{F_{AT}} f^\theta\right) \quad (\text{A.25})$$

Le ratio qui permet de corriger le signal ξ_2 , présenté dans le paragraphe précédent, est obtenu directement à partir de la comparaison de phénomènes cycliques caractéristiques sur le spectre. Les harmoniques des fréquences d'engrènement sont particulièrement adaptées à ce procédé car sont d'une part très énergétiques, et leur localisation fréquentielle élevée améliore d'autre part la précision du recalage. Dans l'expérience, la 5^{ème} harmonique de la fréquence d'engrènement entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire est utilisée pour rétablir une échelle temporelle homogène :

$$\frac{\mathcal{F}_\xi(f^\theta = 135)}{\mathcal{F}_{\xi_b}(f^\theta = 135)} = \frac{\mathcal{F}_{\xi_1}(f^\theta = 135)}{\mathcal{F}_{\xi_2}(f^\theta = 135)} = \frac{F_{vib}}{F_{AT}} = 1 + 2.32 \cdot 10^{-4} \quad (\text{A.26})$$

La figure A.3 montre que les signaux corrigés se superposent aussi bien en temps qu'en fréquence. La localisation du phénomène cyclique est en accord avec la prédiction donnée par la cinématique ainsi qu'avec l'observation spectrale de la vitesse instantanée. Bien sur, cette méthode de correction ne peut s'appliquer que dans le cas où l'horloge du signal analogique est aussi utilisée pour faire l'acquisition du codeur, et ce afin de déterminer le rapport $\frac{F_{vib}}{F_{AT}}$ et ne trouve donc son utilité que dans le cadre de cette étude.

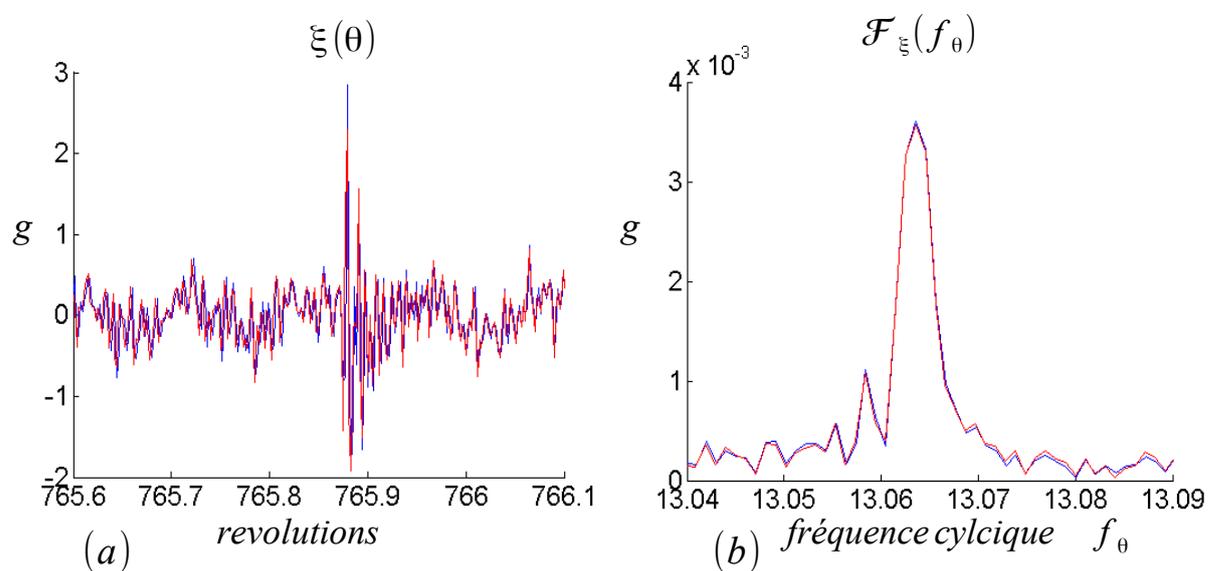


FIG. A.3: Superposition des observations temporelle (à gauche) et spectrale (à droite) des signaux rééchantillonnés dont le rééchantillonnage est corrigé.

Annexe B

Surveillance par mesure de vitesse instantanée

B.1 Nature du signal vitesse instantanée

B.1.1 Estimations de vitesse par la transformée de Fourier

On cherche à vérifier la propriété suivante :

la moyenne obtenue à partir du signal vitesse échantillonné angulairement correspond à la vitesse moyenne du signal si et seulement si la vitesse est constante sur l'intervalle de mesure.

Pour ce faire, on considère l'application φ bijective, inversible et de classe \mathcal{C}^1 définie de $[0, T] \subset \mathbb{R}$ dans $[0, \Theta] \subset \mathbb{R}$ qui associe un temps t à un angle θ et vérifiant :

$$\varphi(0) = 0 \text{ et } \varphi(T) = \Theta. \quad (\text{B.1})$$

On définit également l'application ω_t qui associe un temps à une vitesse par

$$\begin{aligned} \omega_t : [0, T] \subset \mathbb{R} &\longmapsto \mathbb{R}, \\ t &\longrightarrow \varphi'(t) \end{aligned}$$

En outre, on se donne une application ω_θ définie de $[0, \Theta] \subset \mathbb{R}$ dans \mathbb{R} qui associe un angle à une vitesse et vérifiant

$$\omega_t(t) = (\omega_\theta \circ \varphi)(t). \quad (\text{B.2})$$

On souhaite comparer les quantités

$$\bar{\omega}_t = \frac{1}{T} \int_0^T \omega_t(t) dt \text{ et } \bar{\omega}_\theta = \frac{1}{\Theta} \int_0^\Theta \omega_\theta(\theta) d\theta \quad (\text{B.3})$$

On effectue le changement de variable $\theta = \varphi(t)$ dans $\bar{\omega}_\theta$, on obtient

$$\bar{\omega}_\theta = \frac{1}{\Theta} \int_{\varphi^{-1}(0)}^{\varphi^{-1}(\Theta)} \omega_\theta(\varphi(t)) \varphi'(t) dt. \quad (\text{B.4})$$

Par définition de ω_t et ω_θ , φ étant bijective et inversible et d'après (B.1), on a

$$\bar{\omega}_\theta = \frac{1}{\Theta} \int_0^T (\omega_t(t))^2 dt. \quad (\text{B.5})$$

Ainsi, si $\bar{\omega}_t = \bar{\omega}_\theta$, alors

$$\omega_t(t) \left(\frac{\Theta}{T} - \omega_t(t) \right) = 0 \text{ presque partout sur } [0, T] \quad (\text{B.6})$$

On peut donc conclure que ces quantités ne sont égales que si, et seulement si, $\omega_t(t)$ est une constante égale Θ/T .

B.2 Généralités statistiques

Le caractère stochastique des différentes perturbations, flagrant dans le cas du bruit électrique, est manipulé au moyen d'outils statistiques. Cette approche permet en effet de déterminer un intervalle de confiance qui estime l'influence des diverses perturbations sur l'observation spectrale de la vitesse angulaire instantanée. Idéalement, pour chaque canal de l'observation spectrale, on vise à déterminer, sous une certaine probabilité, si cette valeur peut être induite par le bruit ou par une variation de vitesse réelle. Valider l'hypothèse qu'un échantillon respecte une loi suivie par une variable aléatoire descriptive du bruit revient à créer un seuil distinguant le signal du bruit. La création de ce type de seuil nécessite l'utilisation des outils statistiques présentés ci-dessous.

B.2.1 Introduction des notations, concepts et autres approximations

B.2.1.1 Notations.

On notera $X(\theta, \xi)$ un signal aléatoire X . Il s'agit d'un ensemble de fonctions de la variable spatiale θ , cet ensemble étant indexé par la variable ξ . Un signal aléatoire est une quantité bivariable, dépendant dans notre cas à la fois de l'angle θ et de l'épreuve ξ . Lorsque l'on s'intéresse à une mesure en particulier, l'épreuve est fixée de sorte que $\xi = \xi_i$ et on obtient une réalisation du processus aléatoire que l'on notera $X(\theta, \xi_i)$, ou plus simplement $X_i(\theta)$. Lorsque la variable θ est fixée, le processus aléatoire se réduit à une simple variable aléatoire. En considérant le processus pour $\theta = \theta_i$, on obtient une variable aléatoire $X(\theta_i, \xi)$ que l'on notera X_{θ_i} . Enfin, on notera \tilde{x}_{θ_i} les valeurs prises par la variable aléatoire X_{θ_i} .

B.2.1.2 Variables, signaux aléatoires.

Si une variable aléatoire X_{θ_i} est un ensemble de valeurs caractérisées par une loi de probabilité $p_{X_{\theta_i}}$, on appelle alors signal aléatoire un ensemble de fonctions auxquelles on adjoint une loi de probabilité. On peut modéliser comme des signaux aléatoires les signaux dont le processus de production est trop compliqué à décrire, ou inconnu, ou des

signaux pour lesquels l'aléa provient de la propre incertitude de l'observateur. A partir d'une modélisation probabiliste, il faut alors espérer que l'on pourra aboutir à une caractérisation intéressante et à des outils de traitement qui pourront permettre d'extraire de l'information des signaux aléatoires. Les signaux aléatoires peuvent être caractérisés par deux types de description :

- une description complète qui permet de caractériser complètement le processus, mais qui nécessite une connaissance infinie. Par soucis de simplicité, on considère rarement cette option !
- une caractérisation partielle à partir des moments du processus aléatoire.

On dit que $X(\theta, \xi)$ est connu à un instant, si pour tout θ_i , on connaît la loi de la variable aléatoire $X(\theta_i, \xi)$. Celle-ci est simplement une variable aléatoire au sens habituel, que l'on peut en général caractériser à l'aide des moments :

$$\begin{aligned} m_x^{(1)}(\theta_i) &= E \{X(\theta_i, \xi)\} = \int_{\Omega} \tilde{x}_i \cdot p_{X_{\theta_i}}(\tilde{x}_i) d\tilde{x}_i \\ m_x^{(n)}(\theta_i) &= E \{X(\theta_i, \xi)^n\} = \int_{\Omega} (\tilde{x}_i)^n \cdot p_{X_{\theta_i}}(\tilde{x}_i) d\tilde{x}_i \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

B.2.1.3 Quelques mots sur la densité spectrale de puissance

Les définitions présentées ci-dessus s'appliquent parfaitement dans le domaine fréquentiel. Les moments statistiques offrent ainsi une introduction élégante de la densité spectrale de puissance. Si un signal aléatoire $X(\theta, \xi)$ n'a pas de Transformée de Fourier unique, on peut cependant associer une TF à chaque réalisation du signal aléatoire que nous noterons $\mathcal{F}_{X_i}(f_\theta)$. La TF en question, superposition de variables aléatoires, est aussi une variable aléatoire caractérisable par son moment d'ordre 2 : la densité spectrale de puissance, que l'on note par conséquent $\mathcal{D}_{XX}(f_\theta)$.

$$(\mathcal{D})_{XX}(f_\theta) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} E \left\{ |\mathcal{F}_{X_i}(f_\theta)|^2 \right\} \quad (\text{B.8})$$

Cette notation souligne simultanément le fait que la densité spectrale de puissance est définie pour le signal aléatoire (ne varie pas d'une réalisation à l'autre) et qu'elle est obtenue par l'espérance du carré de $\mathcal{F}_{X_i}(f_\theta)$. La DSP sert à caractériser les signaux aléatoires gaussiens stationnaires et ergodiques et se révèle indispensable à la quantification des bruits électroniques en tout genre. En définitive, un signal aléatoire n'a pas de TF commune à toute ses réalisations mais une densité spectrale de puissance ou encore un spectre d'amplitude, qui ne peut être qu'estimé tant que les processus testés sont tronqués (voir le théorème de Wiener Khintchine pour plus de détails).

B.2.2 Loi de probabilité

B.2.2.1 Théorème centrale limite

Le théorème central limite (parfois appelé théorème de la limite centrale) établit la convergence en loi d'une suite de variables aléatoires vers la loi normale. Intuitivement, ce

résultat affirme que toute somme de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées tend vers une variable aléatoire gaussienne. Soit $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ une suite de variables aléatoires définies sur le même espace de probabilité, suivant la même loi et indépendantes. Supposons que l'espérance μ et l'écart-type σ de cette loi existent et soient finis ($\sigma \neq 0$). Considérons la somme $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$. Alors l'espérance de S_n est $n\mu$ et son écart-type vaut $\sigma\sqrt{n}$. De plus, quand n est assez grand, la loi normale $\mathcal{N}(n\mu, n\sigma^2)$ est une bonne approximation de la loi de S_n .

B.2.2.2 Loi de Khi2

Cette loi est caractérisée par un paramètre dit degrés de liberté à valeur dans l'ensemble des entiers naturels (non nuls). Soit $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$, k variables aléatoires indépendantes de même loi normale centrée et réduite. Alors la variable $S_k^{(2)}$, définie telle que $S_k^{(2)} = \sum_{i=1}^k X_i^2$, suit une loi du χ^2 à k degrés de liberté. Soit $S_k^{(2)}$ une variable aléatoire suivant une loi du χ^2 à k degrés de liberté, on notera $\chi^2(k)$ la loi de $S_k^{(2)}$. Alors la densité de $S_k^{(2)}$ sera notée $d_{S_k^{(2)}}$:

$$d_{S_k^{(2)}}(t) = \frac{t^{k/2-1} e^{-t/2}}{2^{k/2} \cdot \Gamma(k/2)}, \forall t > 0 \quad (\text{B.9})$$

où $\Gamma : z \rightarrow \Gamma(z)$ est la fonction gamma définie sur \mathbb{C} tel que $\Re(z) > 0$ par :

$$\Gamma : z \rightarrow \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (\text{B.10})$$

Cette intégrale converge absolument sur le demi-plan complexe où la partie réelle est strictement positive.

Annexe C

Outils d'analyse pour l'observation de la vitesse instantanée

C.1 Traitement de la tendance macroscopique

Pour ce faire, on utilise deux réalisations $\omega(i)$ et $\theta(i)$ des signaux aléatoires $\omega(i, \xi)$ et $\theta(i, \xi)$. Supposant que la composante linéaire est estimée à partir d'une mesure sur N points de la vitesse $\omega(\theta)$, on définit la droite $\omega_d(\theta) = \omega_0 + a \cdot \theta$ telle que :

$$\omega_d(\theta) = \begin{cases} \mu_{[1:N]}^{(1)}(\omega) + \frac{S_{\theta, \omega}}{S_{\theta\theta}} \cdot (\theta - \mu_{[1:N]}^{(1)}(\theta)) & , \forall \theta \in [\theta_1, \theta_n] \\ 0 & , \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

où $\mu_{[1:N]}^{(1)}(\omega)$ et $\mu_{[1:N]}^{(1)}(\theta)$ sont respectivement les moments empiriques d'ordre 1 obtenus à partir des N premiers points des réalisations $\omega(i)$ et $\theta(i)$. Ces valeurs sont utilisées pour calculer la covariance empirique $S_{\theta, \omega}$ et la variance empirique $S_{\theta\theta}$ telle que :

$$\begin{aligned} S_{\theta, \omega} &= \mu_{[1:N]}^{(1)}(\omega \cdot \theta) - \mu_{[1:N]}^{(1)}(\omega) \cdot \mu_{[1:N]}^{(1)}(\theta) \\ S_{\theta\theta} &= \mu_{[1:N]}^{(1)}(\theta \cdot \theta) - \mu_{[1:N]}^{(1)}(\theta) \cdot \mu_{[1:N]}^{(1)}(\theta) \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

La distribution de θ est raisonnablement considérée uniforme sur $[0, \frac{N-1}{R}]$. Ainsi, la moyenne empirique ne dépend pas de la réalisation et vaut $\mu_{[1:N]}^{(1)}(\theta) = \frac{N}{2 \cdot R}$. À partir des équations précédentes, on obtient le signal vitesse corrigé $\omega_r(\theta)$ en conservant l'estimation empirique de la vitesse moyenne :

$$\omega_r(\theta) = \omega(\theta) - \omega_d(\theta) + \mu_{[1:N]}^{(1)}(\omega) \quad (\text{C.3})$$

Dans le cas où la regression linéaire

Annexe D

Etude Expérimentale

D.1 Présentation des bancs d'essais

D.1.1 Banc d'essais : boîte de vitesses automobile

D.1.1.1 Description technique

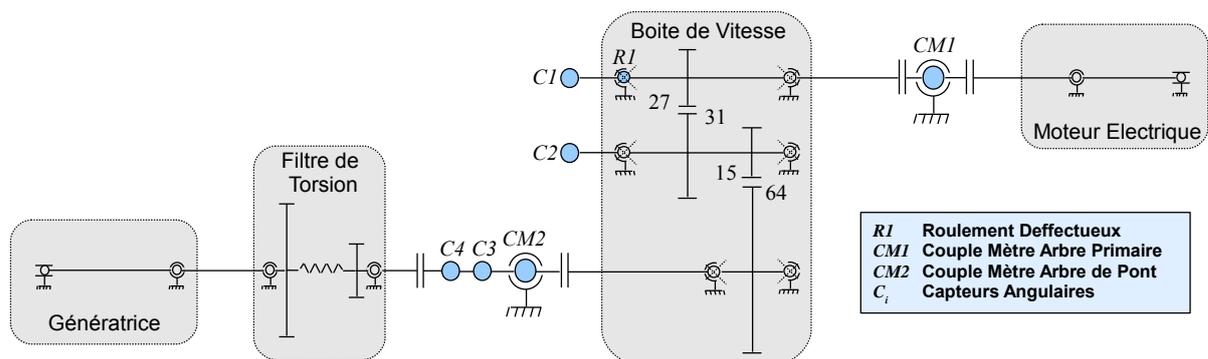


FIG. D.1: Schéma cinématique du banc d'essais BV

Le « Banc BV », illustrée par la figure D.1 est équipé d'une boîte de vitesses automobile *PSA*, de type *BE3*, entraînée par un moteur électrique fonctionnant en boucle ouverte. Ce moteur électrique, monté sur un châssis pivotant, est accouplé à l'arbre primaire par un double joint de cardan. Ce montage, présenté sur la figure D.1, fut réalisé par des travaux antérieurs dans le but de simuler l'acyclisme d'un moteur à explosion. La ligne d'arbre est chargée par une génératrice électrique commandée en couple. Les vibrations torsionnelles induites par la génératrice sont mécaniquement filtrées par une barre de torsion séparant des roues d'inertie. La vitesse de rotation et le couple transmis par la chaîne cinématique peuvent couvrir l'intervalle usuel des conditions de fonctionnement de la boîte de vitesses équipée. La boîte de vitesses présente un premier étage de réduction présentant 4 rapports de transmission, et d'un second étage présentant un

rapport de 64/15. L'ensemble des tests présentés dans ce manuscrit sont effectués alors que la troisième vitesse est enclenchée, induisant un rapport de transmission de 27/31 sur le premier étage. Deux couple-mètres sont installés de part et d'autre de la boîte de vitesses pour asservir les boucles de contrôle de la vitesse de rotation et du couple résistant. Quatre capteurs angulaires sont installés sur les trois arbres constitutifs de la ligne d'arbre. Ces capteurs, présentés dans la table D.1 et sur la figure D.2, délivrent un signal de type TTL. Deux accéléromètres, de type IEPE, sont fixés la boîte à proximité du roulement défectueux localisé sur le schéma cinématique D.1, et photographiés sur la figure D.3. Ces capteurs sont tous deux orientés dans la direction de la charge imposée par l'engrènement au palier défectueux. Le premier accéléromètre est installé directement sur la plaque qui assure le serrage du roulement instrumenté ¹. Les signaux vibratoires sont coupés à 2000Hz dans le système de conditionnement, avant d'être lus par un système d'acquisition de type FPGA. La système d'acquisition FPGA étant équipé d'une horloge externe, effectue l'échantillonnage angulaire direct des voies vibratoires à partir des signaux codeur. Les signaux codeur sont quant à eux comptés par une horloge de fréquence 120Mhz.

Dénomination	Résolution	Technologie	Montage
C1	2048	Optique	Arbre Traversant
C2	2048	Optique	Arbre Traversant
C3	20480	Magnétique	Arbre Traversant
C4	2048	Magnétique	Arbre Traversant piste fendue

TAB. D.1: Description des capteurs angulaires installés sur le banc BV

D.1.1.2 Utilité du banc d'essais

Le banc BV fut utilisé à de nombreuses reprises pendant cette thèse. Tout d'abord, le banc d'essais permis d'étudier et de comparer le fonctionnement de différents capteurs angulaires. Les capteurs magnétiques, avant d'être installés sur l'éolienne, ont été testés sur ce banc d'essais dont les dimensions facilitent l'adaptation de capteurs angulaires volumineux.

Le banc BV fut l'occasion de montrer que les variations de vitesse induites par un défaut de roulement peuvent être transmises au delà de 2 trains d'engrenages. Cette validation fondamentale influença l'instrumentation mise en place sur l'éolienne.

Ensuite, la présence d'une boîte de vitesses et la possibilité de paramétrer des conditions de fonctionnement non stationnaires ont naturellement conduit à utiliser ce banc comme une réplique miniature de l'expérience à grande échelle menée sur

¹ et dont les vis de fixation se sont usées pendant les campagnes successives de la partie 4.4

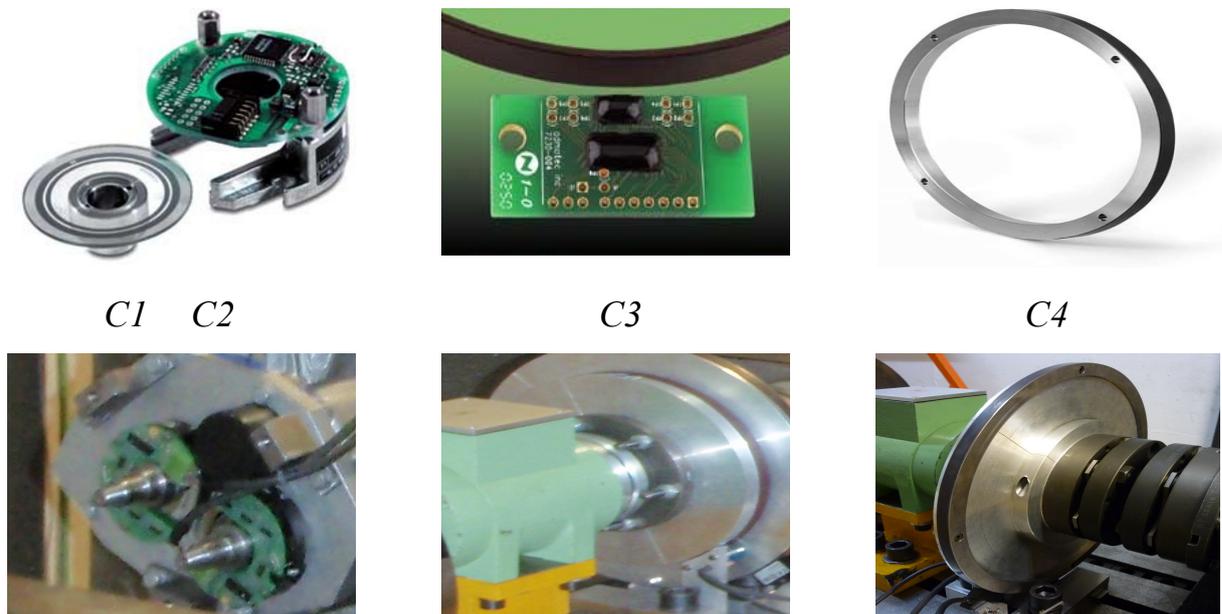


FIG. D.2: Photographie des capteurs angulaire installés sur le banc BV

l'éolienne. Incidemment, il n'est pas imaginable d'introduire un défaut mécanique sur l'éolienne dans le simple but de tester son observabilité par l'analyse des variations de vitesse...

La présence du double joint de cardan offre la possibilité de simuler un défaut de type désalignement angulaire.

D.1.1.3 Réalisation des défauts de roulement

Quelques précisions sur le roulement étudié

L'analyse expérimentale s'appuie sur l'observation de huit roulements de marque SNR et de type 32005-VS02H100. Ce palier, situé sur l'arbre primaire de la boîte de vitesses à proximité du capteur C1, est constitué d'un roulement conique dont la bague interne est montée serrée sur l'arbre tandis que la bague externe, statique, est ajustée dans l'alésage du carter. Seul l'endommagement de la bague externe est réalisable sans risquer de rompre la cage en élastomère. De plus, le changement de la bague interne nécessitant des manipulations complexes sur la boîte de vitesses, seule la bague externe est remplacée entre les différentes mesures. L'étude se limite donc à la surveillance d'un défaut localisé de bague externe, dont la fréquence caractéristique théorique vaut 7.255 événements par tour d'arbre rapide. Les dimensions qui caractérisent les composantes macroscopique / microscopique du défaut localisé sur les différentes bagues sont présentées dans la table D.2. La bague 7 étant saine, aucune dimension macroscopique ne lui est associée.

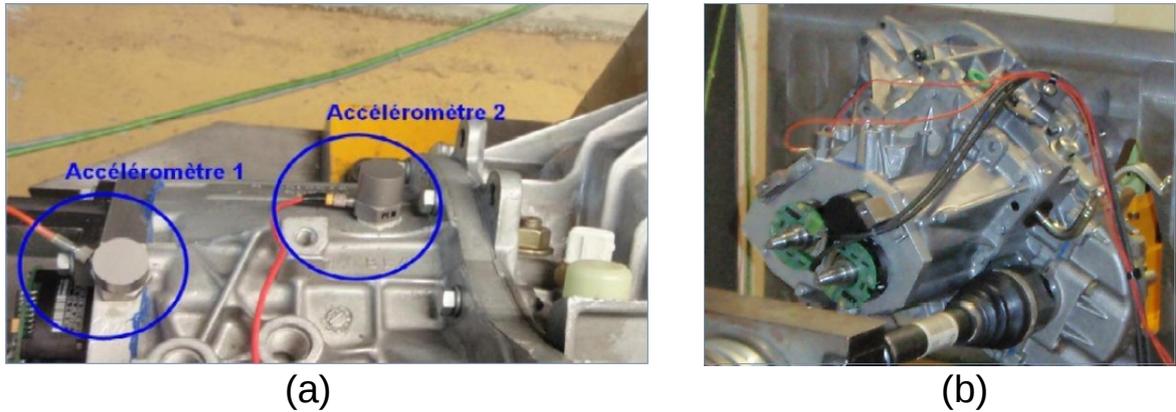


FIG. D.3: Photographie des accéléromètres installés sur la boîte de vitesse.

Indice de la bague	Nature	Profondeur μm	Largeur mm	Longueur mm	Rugosité μm
1	Artificiel	140	2.5	3.5	24
2	Artificiel	300	6.5	3.5	24
3	Artificiel	500	8	7.7	24
4	Artificiel	420	6.5	3.5	18
5	Artificiel	380	6.5	3.5	28
6	Artificiel	400	6.5	3.5	38
7	Naturel	0	0	0	$\mu 1$
8	Naturel	170	6	3	16

TAB. D.2: Description quantitative des défauts localisés de chaque bague.

Usinage par électro-érosion

Parmi ces roulements, six présentent un défaut d'origine artificielle. Ces simulations ne sont pas obtenues par une technique conventionnelle d'usinage, comme il est pourtant d'usage. En effet, si les techniques usuelles sont particulièrement pratiques pour réaliser un défaut grossier de géométrie angulaire, l'usinage par électro-érosion présente le double avantage de faciliter le paramétrage de la rugosité, tout en permettant un modelage plus subtile du défaut. L'électroérosion est une technique procédant par fusion, vaporisation et éjection de la matière. L'usinage s'opère dans un liquide diélectrique ² qui, associé à la distance séparant les électrodes, paramètre la tension de claquage. Quand la tension séparant les électrodes dépasse la tension de claquage, un arc électrique attaque la matière conductrice de l'outil à proximité de l'électrode et, dans une moindre mesure, la matière de l'électrode. L'empreinte laissée dans la matière est donc l'image inversée de la forme que présente la pointe de l'outil, comme schématisée sur le graphe a) de la figure D.4.

²typiquement du kérosène

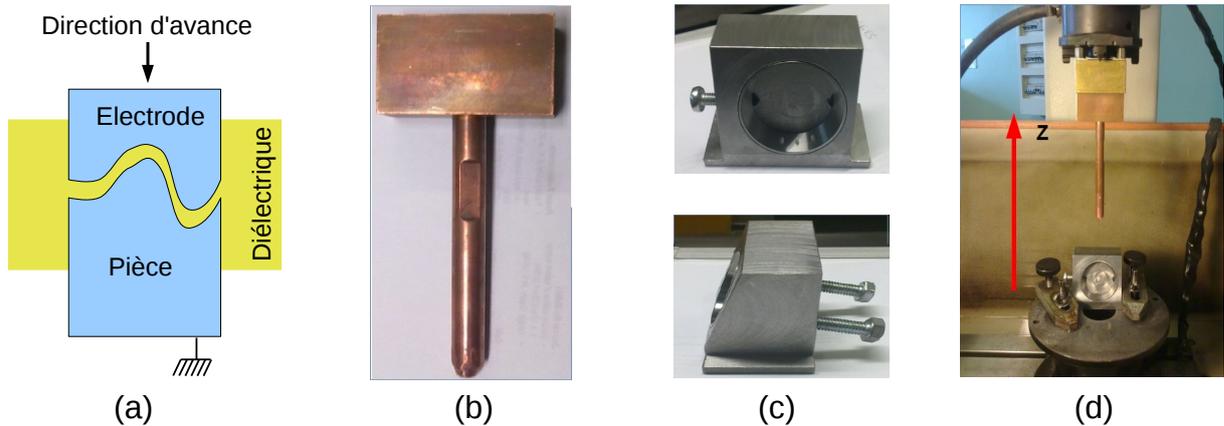


FIG. D.4: Principe et mise en oeuvre de l'usinage par électroérosion.

Cette technique modifie les caractéristiques de la matière en surface et en sous-couche : augmentation de la dureté, présence de contraintes résiduelles de traction d'origine thermique, présence de micro-fissures. Il s'ensuit une meilleure résistance à la corrosion et à l'usure, mais une baisse notable de la tenue en fatigue des pièces. Cet inconvénient est sans conséquence sur l'étude étant donné la brièveté des mesures qui s'en suivront. La surface usinée à l'ébauche présente une rugosité qui, bien que qualifiée de grossière dans l'industrie, présente un niveau correspondant à celui du défaut naturel d'écaillage léger ($R_a = 15 \pm 5 \mu m$). De plus, l'ébauche est réalisée avec un débit de matière satisfaisant et une usure très faible, ce qui permet d'enlever une grande partie de matière sans trop impacter la forme de l'électrode ³. L'électrode en cuivre, qui se substitue à l'outil conventionnel, est mise en forme manuellement pour laisser une empreinte représentative d'un écaillage naturel. L'analyse par rugosimétrie, résumée par la figure D.5, montre qu'un écaillage naturel prend effectivement la forme caractéristique d'une pyramide convexe et arrondie dont le sommet penche en direction de la zone d'où le contact avec l'élément roulant démarre. R_a , la rugosité arithmétique de la surface usinée, est la moyenne intégrale en valeur absolue par rapport à la ligne moyenne (voir équation D.1). Les profils mesurés par le rugosimètre mécanique pour ces défauts artificiels étant approximables par un polynôme d'ordre 2, ce polynôme définit la ligne moyenne $\bar{z}(x)$ à partir de laquelle est mesurée cette rugosité. L'instrument de mesure est présenté sur la photographie b) de la figure D.4.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x) - \bar{z}(x)| dx \quad (D.1)$$

³sous réserve que les matériaux soient correctement choisis. Dans cette application, l'électrode est en cuivre et la bague est en acier Cr6

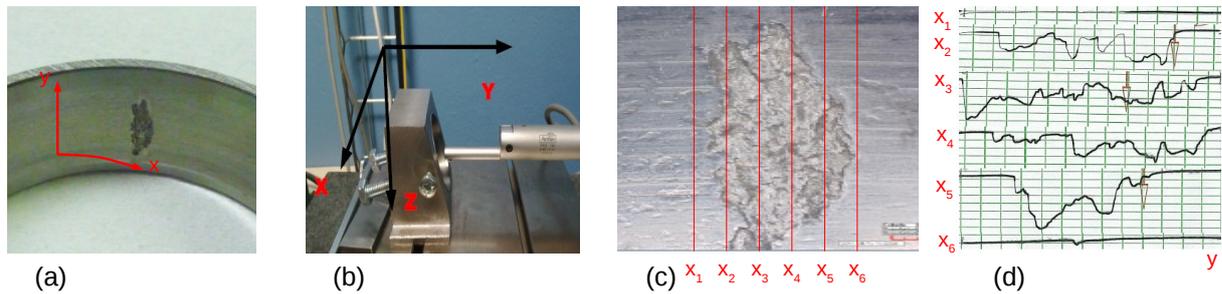


FIG. D.5: a) La bague externe 8 présente un défaut naturel dont b) un rugosimètre détermine d) la profilométrie. Les coupes respectivement indiquées correspondent aux droites indiquées sur c).

Pendant l'usinage et la mesure de l'empreinte, la bague externe doit être non seulement maintenue en position, mais présenter la piste de roulement de manière à ce que son plan tangent (son profil) soit normal à l'axe de l'outil (horizontal). Un porte outil en acier est conçu pour maintenir la bague dans une position légèrement inclinée et faciliter le positionnement adéquat de l'outil dans le référentiel de la pièce à usiner. Ce porte outil est présenté sur la photographie c) de la figure D.4.

Pour augmenter la rugosité au delà de $20\mu m$ tout en freinant la dégradation de l'outil, il faut jouer avec les différents leviers se présentant à l'opérateur. Le ratio temps de décharge (T) vis à vis du temps de repos (P) altère le temps laissé au fluide diélectrique pour évacuer la quantité de copeau accumulée. Une diminution de ce ratio se traduit par une détérioration de l'uniformité des impacts électriques ainsi que de l'état de surface. La modification de l'intensité électrique des impacts est quant à elle réglée par les paramètres de compression (C) et de gain (G). Sous ces conditions de fonctionnement relativement sévères, une couche de carbone (provenant du diélectrique) se forme sur l'outil et perturbe de fait la réaction électrochimique. Il est important de noter que les bagues ont été usinées par ordre croissant sans que l'outil ne soit retouché entre temps. D'après la table D.3, décrivant les paramètres d'usinage utilisés pour chaque bague, le roulement 5 devrait présenter les mêmes caractéristiques quantitatives que le roulement 2, ce qui n'est confirmé sur la table D.2 que pour les dimensions macroscopiques. Si la rugosité est bien maîtrisée pour les trois premières bagues, il fut plus difficile de respecter une géométrie constante pour les bagues 4 à 6.

Résultats graphiques

Le résultat d'une génération de défaut obtenu par électro érosion est présenté sur la figure D.6 pour les bagues 1 à 6. Ces photographies sont réalisées à l'aide d'un microscope électronique, par ailleurs capable de délivrer une estimation de la rugosité arithmétique (R_a) préalablement présentée dans la la table D.2. La comparaison de l'état de surface ainsi que de la géométrie macroscopique des défauts est appréciable qualitativement, et

Indice de la bague	Z μm	T μs	P μs	I A	C	P
1	-150	22	15	12	30	12
2	-300	22	15	12	30	12
3	-500	22	15	12	30	12
4	-300	22	22	12	30	12
5	-300	22	15	12	30	12
6	-300	22	15	12	25	10

TAB. D.3: Description des élément.

justifie les notations qualitatives de la table 4.4, page 140. .

D.1.1.4 Fréquences caractéristiques de roulement conique

L'obtention de ces fréquences caractéristiques n'est ni nouveau, ni complexe. Il m'a néanmoins été difficile de vérifier ces formules par des travaux dans la littérature. Il apparait donc nécessaire de préciser la manière dont nous obtenons les fréquences caractéristiques du roulement défectueux du banc d'essais « boîte de vitesses automobile ». Les paramètres sont présentés sur la figure D.7, qui schématise le mouvement rotatif des éléments constitutifs d'un roulement conique.

En supposant que les éléments roulent sans glissement, les vitesses relatives aux points de contact sont nulles.

$$\vec{V}_{M_e}^{BE} = \vec{V}_{M_e}^{ER} \quad (D.2)$$

$$\vec{V}_{M_i}^{BI} = \vec{V}_{M_i}^{ER} \quad (D.3)$$

où M_e et M_i sont respectivement les points de contact entre l'élément roulant ER et la bague extérieure BE puis intérieure BI . En considérant que le roulement conique voit ses points de contact situés sur une même normale à l'axe de rotation de l'élément roulant, elle même présentant un angle κ avec l'axe des bagues, il vient les équations cinématiques suivantes :

$$\vec{V}_{M_e}^{BE} = \frac{l}{\cos \varepsilon} \sin(\kappa + \varepsilon) \cdot \omega_{BE} \quad (D.4)$$

$$\vec{V}_{M_i}^{BI} = \frac{l}{\cos \varepsilon} \sin(\kappa - \varepsilon) \cdot \omega_{BE} \quad (D.5)$$

$$\vec{V}_{M_e}^{ER} = l \cdot \sin(\kappa) \omega_C - l \cdot \sin(\varepsilon) \omega_{ER} \quad (D.6)$$

$$\vec{V}_{M_i}^{ER} = l \cdot \sin(\kappa) \omega_C + l \cdot \sin(\varepsilon) \omega_{ER} \quad (D.7)$$

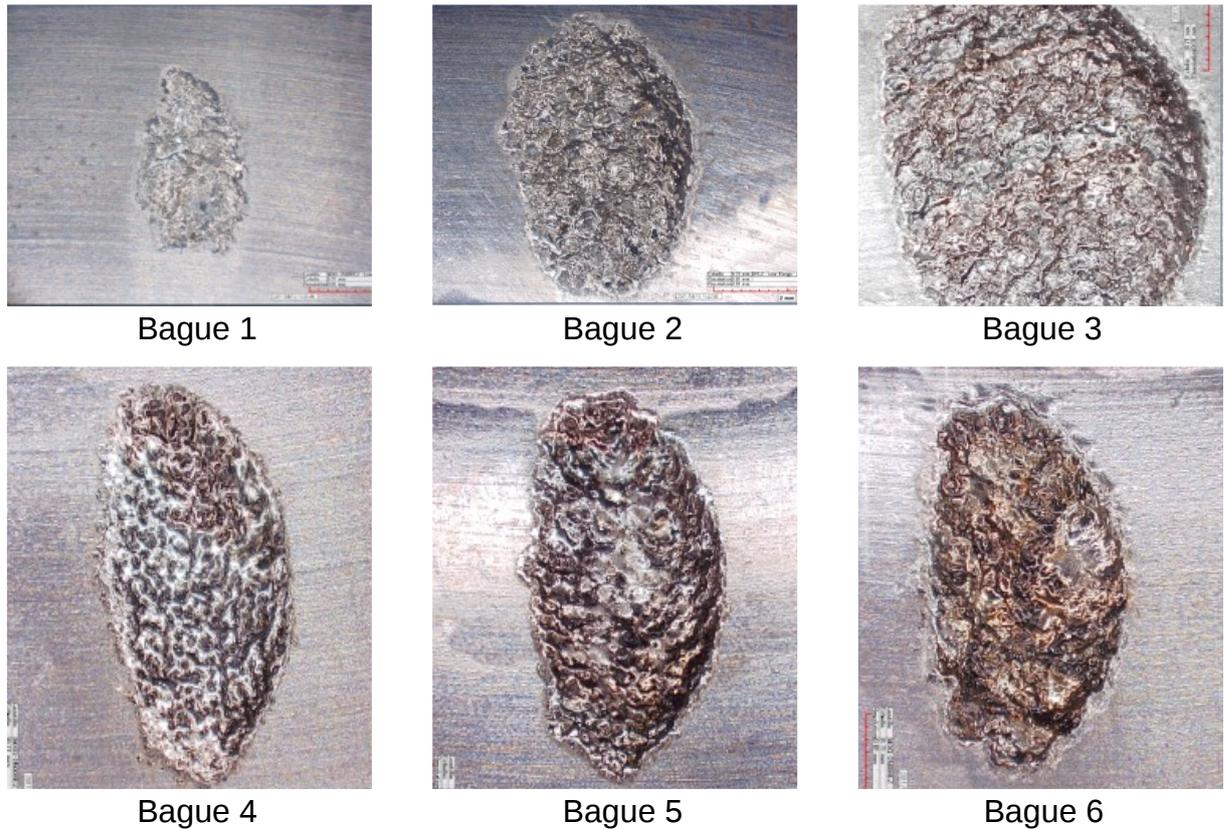


FIG. D.6: Photographie microscopique des défauts d'écaillage simulé par électroérosion.
Les échelles sont identique pour

Ainsi, en supposant le roulement sans glissement, il vient :

$$\frac{\sin(\kappa + \varepsilon)}{\cos\varepsilon} \cdot \omega_{BE} = \sin(\kappa) \cdot \omega_C - \sin(\varepsilon)\omega_{ER} \quad (\text{D.8})$$

$$\frac{\sin(\kappa - \varepsilon)}{\cos\varepsilon} \cdot \omega_{BI} = \sin(\kappa) \cdot \omega_C + \sin(\varepsilon)\omega_{ER} \quad (\text{D.9})$$

Dans le cas particulier où la bague extérieure est maintenue fixe,

$$\sin \kappa \cdot \omega_C - \sin \varepsilon \omega_{ER} = 0 \quad (\text{D.10})$$

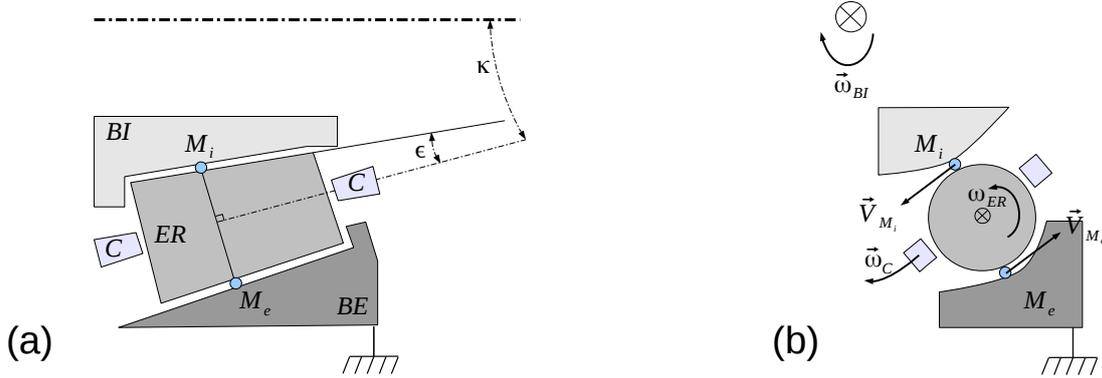


FIG. D.7: Schéma du roulement conique selon l'axe a) tangentiel puis b) axial.

Les fréquences caractéristiques sont alors définies par les équations suivantes :

$$BPF O = N \cdot \frac{\omega_C}{\omega_{BI}} = N \frac{\sin(\kappa - \epsilon)}{2 \cdot \sin(\kappa) \cdot \cos(\epsilon)} \quad (D.11)$$

$$BPF I = N \cdot \frac{\omega_{BI} - \omega_C}{\omega_{BI}} = N \left(1 - \frac{\sin(\kappa - \epsilon)}{2 \cdot \sin(\kappa) \cdot \cos(\epsilon)} \right) \quad (D.12)$$

$$FTF = \frac{\omega_C}{\omega_{BI}} = \frac{\sin(\kappa - \epsilon)}{2 \cdot \sin(\kappa) \cdot \cos(\epsilon)} \quad (D.13)$$

$$2 \cdot BSF = 2 \frac{\omega_{ER}}{\omega_{BI}} = \frac{\sin(\kappa - \epsilon)}{\cos(\epsilon) \sin(\epsilon)} \quad (D.14)$$

D.1.2 Banc GDS

D.1.2.1 Description technique

Le banc GDS, *Gear Dynamic Simulator*, illustré sur la figure D.8 est conçu et commercialisé par la société SpectraQuest⁴. Il est constitué d'un train d'engrènement unique, alimenté en boucle ouverte par un moteur électrique de 2.3kW et chargé par un frein magnétique à poudre. Le pignon installé sur l'arbre moteur peut être remplacé par des pignons présentant différents types de défaut. Ainsi, plusieurs engrènements défectueux sont testés sur ce banc d'essais, de manière à ce qu'il soit possible d'étudier l'influence sur le système mécanique des défauts de type (voir figure D.9) :

1. dent arrachée (la dent est fraisée au niveau du pied)
2. demi partiellement arrachée (une portion de la dent est fraisée au niveau du pied)
3. usure répartie sur l'ensemble des dent (toutes les dents sont lourdement endommagées)

⁴Lien vers un note technique anglophone : <http://www.spectraquest.com/Products/GDS.shtml>

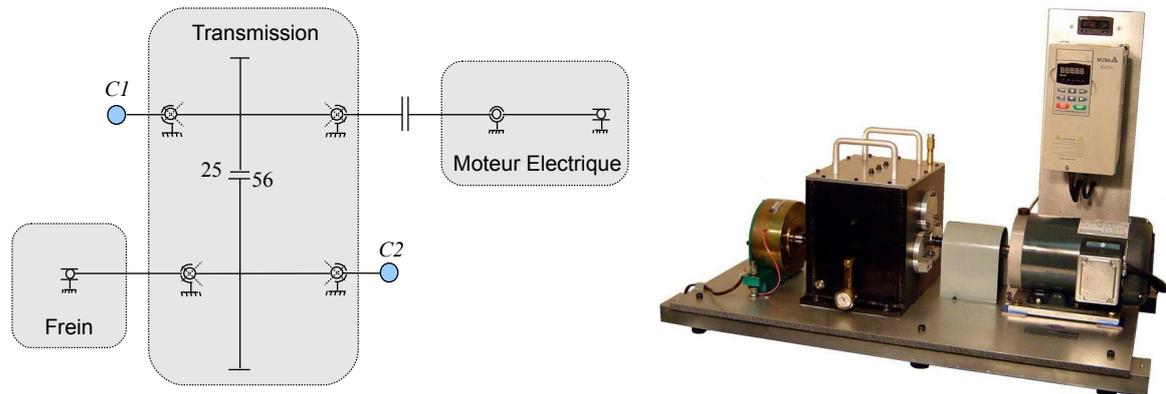


FIG. D.8: Schéma cinématique du banc d'essais GDS

4. fissure en pied de dent (une entaille entame 20% de l'épaisseur du pied de dent, sur toute la largeur de la dent)

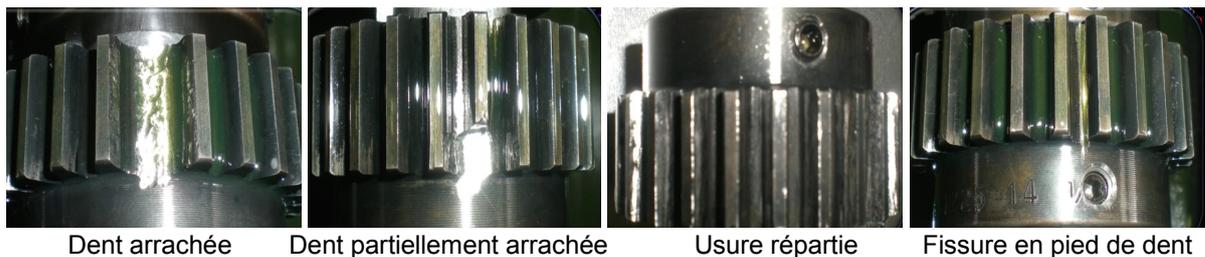


FIG. D.9: Photographie des pignons défectueux

Un accéléromètre de type IEPE est installé sur le carter de la boîte de transmission. Le signal vibratoire est lu par un système d'acquisition dépourvu d'horloge externe. Le signal vibratoire est donc échantillonné sur une base temporelle, à une fréquence d'acquisition de 10kHz. Les deux codeurs installés sur chaque arbre sont de type optique, et présentent chacun 2500 points par tour.

D.1.2.2 Utilité du banc d'essais

Le banc GDS a été spécifiquement conçu par SpectraQuest pour simuler le comportement d'une transmission mécanique à des fins éducatives et expérimentales. Tous les éléments constitutifs du banc sont relativement simples à manipuler, si bien que les engrenements/roulements peuvent être facilement remplacés à des fins expérimentales. De plus, la simplicité de la ligne d'arbre facilite sa maintenance. Les inévitables défauts d'usure susceptibles d'évoluer pendant une campagne de mesure, sont ici facilement identifiés et réparés, améliorant ainsi la stabilité du dispositif. Néanmoins, le bruit électrique

probablement imposé par le variateur du moteur électrique est sans pareil. Le seul système d'acquisition résistant à ces perturbations ⁵ étant dépourvu d'horloge externe, les mesures vibratoires doivent être rééchantillonnées pour être dans le domaine angulaire. Le système de commande ne permettant pas le paramétrage de conditions non stationnaires, ce banc sera principalement utilisé sous conditions stationnaires, et dans le but de tester l'observabilité des défauts d'engrènement avec les systèmes de mesure de variations de vitesse.

D.1.3 Instrumentation de éolienne

D.1.3.1 Présentation générale

L'éolienne instrumentée est un produit proposé par le fabricant allemand REPOWER sous la dénomination *MM82*. Le nom qui caractérise cette machine traduit la puissance produite (2MWh) sous des conditions de vent nominales ainsi que la taille du rotor (82 mètres). À partir de l'énergie cinétique que présente un écoulement de vent uniforme dans un cylindre de diamètre équivalent à celui de l'éolienne, on peut estimer la puissance théoriquement récupérable par la machine. ⁶

Dans notre cas, le système de calage des pâles associé à la technologie de la génératrice permet un fonctionnement continu sur une gamme de vitesse de vent allant de 3 à 25m/s. Cependant, la puissance nominale de 2MW n'est atteinte qu'à partir de 12m/s. La table D.4 montre la répartition des conditions de vent sur le parc où la machine instrumentée est installée, et souligne la rareté des conditions menant à un fonctionnement nominal de l'aérogénérateur.

Vitesse de vent (ms^{-1})	0-3	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	> 13
Pourcentage de l'année	1%	25%	18%	28%	23%	5%	1%

TAB. D.4: Répartition des vitesses de vent sur le site où l'éolienne est installée.

Dans cette étude mécanique, on s'intéresse particulièrement au contenu de la nacelle, ici située à 80 mètres de hauteur. Les éléments principaux sont illustrés sur les photographies de la figure D.10 ⁷, et hormis le moteur de yaw, qui s'attache à maintenir la nacelle face au vent, tout ses éléments font partie intégrante de la ligne d'arbre sous surveillance.

D.1.3.2 Dissection de la ligne d'arbre

Le multiplicateur

Les éoliennes ne sont pas nécessairement pourvues d'une telle transmission. C'est principalement le mode de fonctionnement de la génératrice associée à la superficie du

⁵le signal TTL est codé en différentiel sur 95% du parcours, permettant une meilleure protection au bruit

⁶la loi de Betz souligne que la puissance récupérable par une éolienne ne peut dépasser 60% de la puissance cinétique proposée par le vent.

⁷Photos issues du site internet Repower.

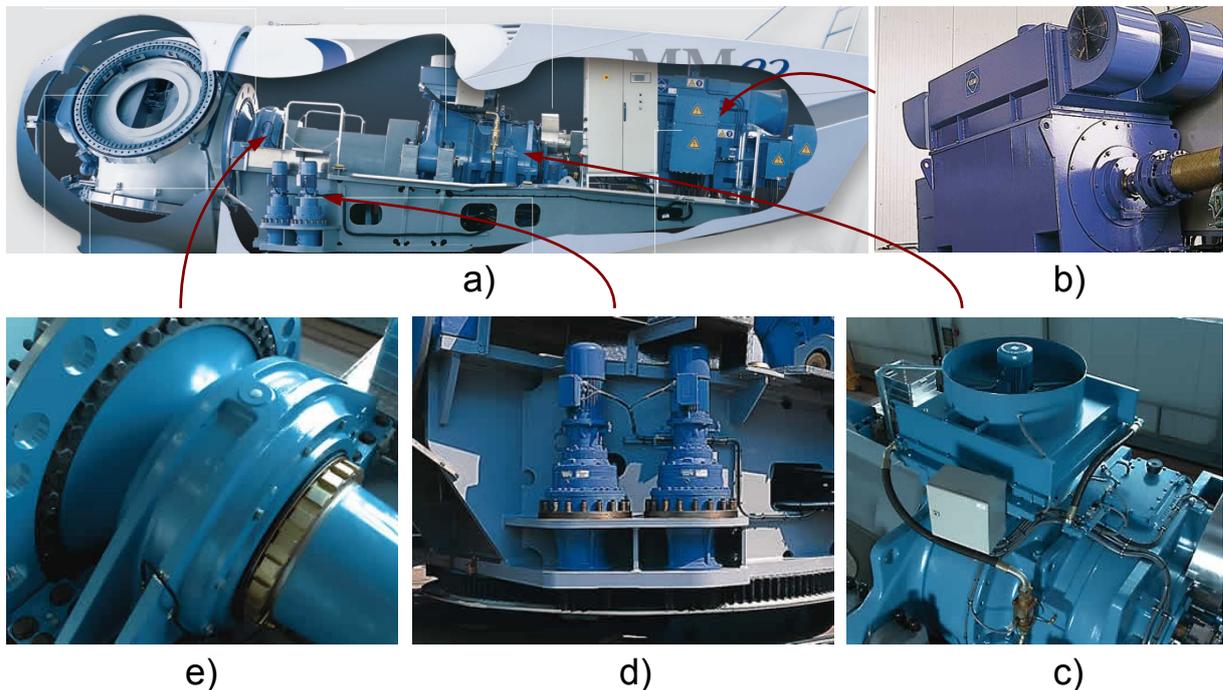


FIG. D.10: Les éléments constitutifs de la nacelle d'une éolienne a) en particulier munie b) d'une génératrice, c) d'un multiplicateur, d) d'un moteur de Yaw ; e) d'un roulement principal

rotor qui impose le rapport de transmission. Les éoliennes capable de produire 2MW au moyen d'une génératrice asynchrone à double alimentation nécessite un rapport de transmission qui dépasse couramment la centaine. Dans notre cas particulier, le multiplicateur, de marque RENK, est constitué d'un train épicycloïdal et de deux trains parallèles simples mis en série. Muni de trois satellites, le train épicycloïdal plan de type II présente l'originalité de maintenir le porte satellite fixe. L'arbre d'entrée (Arbre Lent) est associé au planétaire extérieur tandis que l'arbre solaire⁸ est la sortie de ce planétaire. Cet intéressant choix technologique offre un très bon premier rapport de multiplication et permet au multiplicateur d'être particulièrement compact. En effet, un simple engrenement parallèle relie l'arbre solaire à l'arbre rapide, véritable sortie du multiplicateur. Il est à noter que l'arbre solaire entraîne aussi par un engrenage simple la pompe à huile mécanique. Le nom attribué à chaque arbre ainsi que le nombre de dents des roues/pignons/couronne constitutives du multiplicateur sont indiqués sur le schéma cinématique de la ligne d'arbre, figure D.11. Ce schéma souligne le mode de réalisation permettant la mise en place d'un tel train, où l'arbre solaire est maintenu, selon un montage largement hyperstatique, en rotation autour de l'arbre lent. Le type de chaque roulement est spécifié dans la table D.5.

⁸l'« arbre solaire » est un anglicisme sémantique qui correspond à l'arbre planétaire intérieur

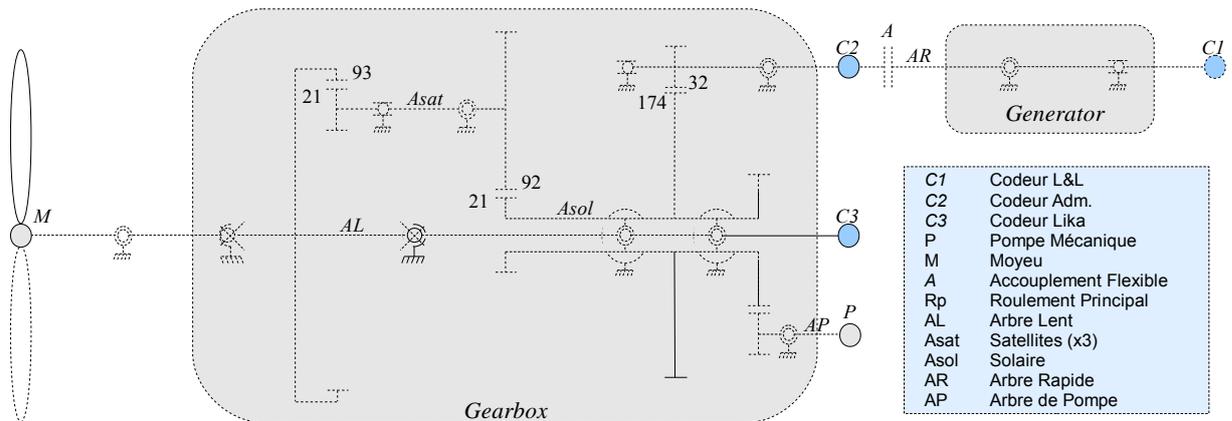


FIG. D.11: Schéma de la ligne d'arbre d'une éolienne de type MM82 équipée d'un multiplicateur Renk.

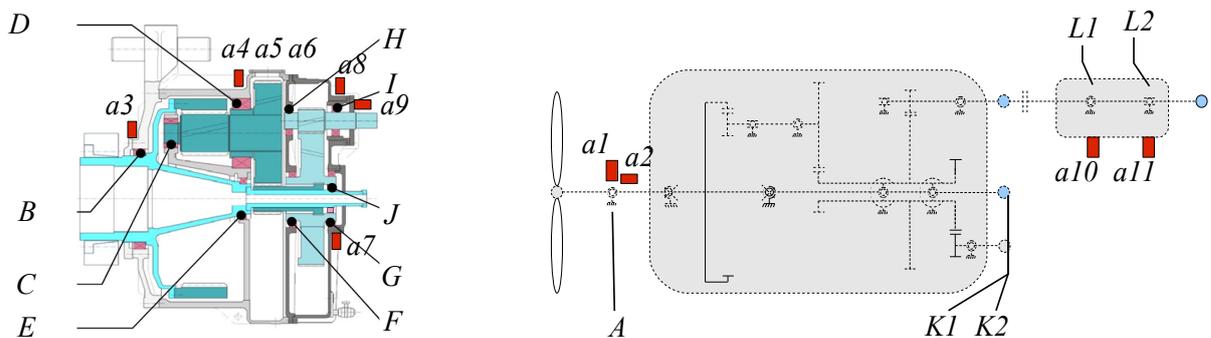


FIG. D.12: Localisation des capteurs accélérométriques et des roulements porteurs de la ligne d'arbre

L'accouplement flexible

La puissance est transmise du multiplicateur à la génératrice par un accouplement flexible dont le rôle premier est d'éviter que les désalignements éventuels d'un des deux éléments ne détériore l'autre. En effet, les problèmes d'alignement sont souvent cause de ruine pour les multiplicateurs d'aérogénérateur. La caractéristique fondamentale d'un tel accouplement est donc sa faible rigidité en flexion. De plus, l'accouplement joue aussi le rôle de limiteur de couple à friction. Il est en effet chargé de permettre un mouvement de rotation relatif entre les deux éléments « accouplés » en cas de surcharge d'un côté ou de l'autre. Si le couple vient à dépasser un seuil jugé critique par le concepteur de l'éolienne, qui pourrait par exemple être induit par un grippage de la génératrice ou par un simple arrêt d'urgence, l'accouplement cède pour laisser l'élément à forte inertie s'arrêter sans risquer la pérennité de ses composants.

Rt	Caractéristiques
A	Rotule sur 2 rangées de rlx sphérique
B	Rlt à 1 rangée de rlx coniques
C	Rlt à 2 rangées de rlx cylindriques
D	Rotule sur 2 rangées de rlx coniques
E	Rlt à une rangée de rlx coniques
F/G	Rlt à une rangée de rlx cylindriques
H	Rlt à une rangée de rlx coniques
I	Rlt à 2 rangées de rlx coniques
J	Butées à rotule sur rlx sphérique
K	Rlt à bille à contact radial
L1/L2	Rlt à gorge profonde

TAB. D.5: Désignation des roulements constitutifs de la ligne d'arbre.

L'accouplement installé sur la ligne d'arbre, de type FLENDER, répond à ces critères comme le confirment les paramètres mécaniques reportés dans la table D.6. On distingue la raideur angulaire, graduée en Nm/rad , qui permet de déterminer le moment fléchissant de rappel en fonction de l'angle de désalignement corrigé par l'accouplement ; de la raideur torsionnelle, aussi graduée en Nm/rad , susceptible d'influencer les variations de vitesse de rotation. Cette raideur particulière, relativement basse vis à vis de la raideur globale en torsion de la ligne d'arbre, fut suspectée à priori de jouer un rôle prépondérant dans le filtrage des vibrations en torsion du mécanisme, et a motivé en conséquence l'installation d'un capteur angulaire de part et d'autre de l'accouplement.

Couple nominal	Nm	$1,1.10^5$
Couple limite	Nm	$2,2.10^4$
Couple de glissement	Nm	$2.10^4 \pm 20\%$
Raideur torsionnelle	Nm/rad	$1,44.10^6$
Raideur axiale	N/m	$5,6.10^5$
Raideur angulaire	Nm/rad	$1,5.10^4$

TAB. D.6: Paramètres mécanique de l'accouplement flexible.

La génératrice MADA

Dans le cas étudié, la génératrice est une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dont le rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques. Le rotor contient également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne. En particulier, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de tirer le maximum de puissance possible

de chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique, tandis qu'un second circuit placé au rotor est relié au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. La puissance rotorique étant intrinsèquement plus faible, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison d'une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. Une éolienne équipée d'une telle génératrice présente quatre phases de fonctionnement, qui sont illustrées dans la figure D.13 et détaillées ci-dessous.

1. La phase de démarrage de la machine, qui n'a lieu que si le vent est suffisamment puissant pour soutenir l'espoir d'une production électrique⁹. Bien qu'assez faible, la production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice.
2. La phase d'extraction de la puissance maximale ou phase MPPT (Maximum Power Point Tracking). Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale. La puissance électrique augmente rapidement. Dans cette zone, l'angle de pitch¹⁰ reste constant à sa valeur minimale. La puissance maximale est ainsi obtenue pour chaque valeur de la vitesse mécanique et pour des vitesses de vent moyennes (7-13 m/s environ).
3. La phase à vitesse mécanique quasi constante. L'angle de calage des pales varie afin d'obtenir une puissance électrique maximale pour différentes valeurs de vent. La puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale.
4. La phase à puissance constante. Lorsque la vitesse du vent augmente encore, l'angle de calage des pales devient important afin de conserver la puissance électrique constante et nominale.

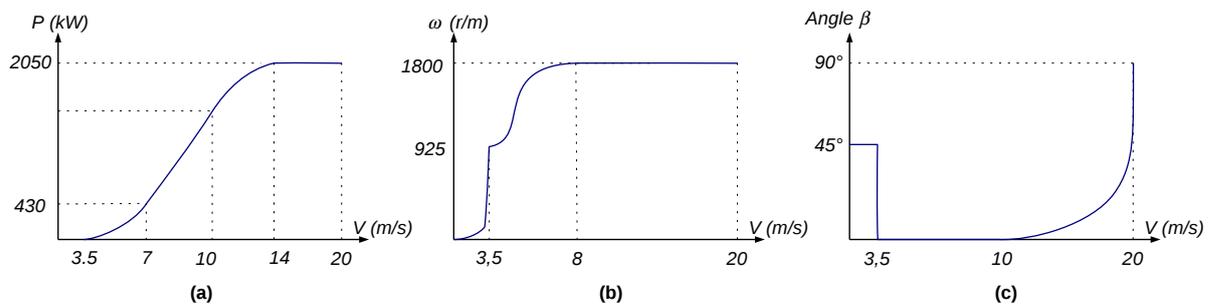


FIG. D.13: Caractéristiques en fonction de la vitesse du vent de a) la puissance active produite, b) la vitesse de rotation de l'arbre rapide et c) l'angle de pitch.

La génératrice VEM assure la liaison pivot entre le rotor et la nacelle par l'intermédiaire de deux roulements à gorge profonde disposés de part et d'autre des barres rotoriques (voir figure D.11). Le roulement L1 assure une fonction de palier fixe, tandis

⁹ en l'occurrence, le vent doit dépasser 3,5 m/s.

¹⁰ anglicisme couramment usité pour traduire l'angle de calage des pales

que le roulement *L2* est laissé flottant. C'est le roulement *L1* qui porte le chargement axial induit par le poids du rotor (incliné de 5°) associée à la tension magnétique axiale. Le chargement du roulement *L2* est donc exclusivement radial, si bien que les angles de contact des deux roulements sont très certainement différents. Ce point remet en question l'égalité des fréquences caractéristiques associées à ces deux roulements, tels que présentée par la suite dans la table D.10.

D.1.3.3 Le système d'acquisition

Les acquisitions s'appuient sur 3 capteurs angulaires, 11 capteurs vibratoires, et 2 mesures représentatives de conditions extérieures : le vent mesuré au dessus de la nacelle par un anémomètre ainsi que la puissance générée par la machine mesurée dans le convertisseur.

Les capteurs angulaires

Le positionnement des capteurs angulaires est justifié par l'état de connaissance en début de thèse : le banc BV montre que la variation de vitesse induite par un défaut de roulement est transmissible à travers deux trains d'engrenage. Deux capteurs sont à priori indispensables pour surveiller l'intégralité de la ligne d'arbre, où trois trains d'engrènement séparent la partie lente de la partie rapide. De plus, l'amortissement suspecté des vibrations en torsion par l'accouplement flexible justifie l'installation d'un capteur angulaire de part et d'autre de l'arbre rapide.

La résolution de chaque capteur angulaire est dimensionnée pour permettre l'observation des 20 premières harmoniques des éléments sous surveillance. Si les capteurs situés sur l'arbre rapide peuvent facilement respecter ce critère de manière à surveiller l'intégralité de la ligne d'arbre, le phénomène cyclique qui dimensionne la partie lente est l'engrènement satellite / solaire : le capteur installé sur l'arbre lent est ainsi dimensionné pour surveiller les éléments directement liés à l'arbre lent et satellites. Les caractéristiques de chaque capteur sont présentées dans la table D.7.

Nom	Technologie	Résolution (évt./rév.)	Facteur d'interpolation	Fréq délivrée maximale (Hz)	Entrefer spécifié (mm)
Lika	Magnétique	20480	40	5850	$0,55 \pm 0,45$
Admotec	Magnétique	2048	16	61440	$1,55 \pm 1$
Leine Linde	Optique	2048	4	61440	

TAB. D.7: Spécification des capteurs angulaires.

Les capteurs vibratoires

Les onze accéléromètres localisés sur la figure D.12 sont des capteurs typiquement utilisés dans les systèmes de surveillance vibratoire pour aérogénérateurs. D'une sensibilité de 100mV/g, ils sont caractérisés par une fonction de transfert plate entre 10Hz et 5kHz. Le conditionneur permet d'optimiser la plage du signal analogique (gain réglable) tout en filtrant les fréquences élevées pour éviter les problèmes de repliement. Par souci de simplicité, le conditionneur est limité à 5kHz pour toute la durée de l'expérimentation. Certains accéléromètres sont disposés axialement quand la plupart s'intéressent aux vibrations radiales subies par le carter. La table D.8 associe la localisation et la direction de chaque capteur à l'élément prépondérant qu'il permet surveiller.

a1	radial	Roulement Principale
a2	axial	Roulement Principale
a3	radial	Entrée du multiplicateur
a4	radial	Satellite Midi
a5	radial	Satellite 16h
a6	radial	Satellite 20h
a7	radial	Solaire Pompe
a8	radial	Arbre Rapide
a9	axial	Arbre Rapide
a10	radial	Génératrice coté multiplicateur
a11	radial	Génératrice coté codeur

TAB. D.8: Présentation des capteurs vibratoires

L'électronique

Le système d'acquisition mis en place sur le banc d'essais BV, présenté dans la partie D.1.1, est étendu pour recevoir ce plus grand nombre de voies analogiques. Néanmoins, la forme prise par le système hard/soft d'acquisition limite le nombre d'entrées digitales par carte que les capteurs angulaires peuvent utiliser. Ainsi, l'acquisition angulaire des capteurs vibratoires installés sur la partie lente fut initialement attribuée aux capteurs Lika et Leine Linde réduit¹¹, tandis que celle des capteurs vibratoires installés sur la partie rapide est attribuée aux capteur Admotec et Leine Linde sans réduction. Ceci fut décidé sans tenir compte de l'impérieuse loi de Murphy, à laquelle se soumet docilement ce genre d'expérimentation de haut vol [ALH 32]. Le capteur angulaire Admotec ayant cédé après deux jours de loyaux services, les capteurs vibratoires qui devait être échantillonnés par ce dernier furent depuis échantillonné à pas de temps constant ($F_s = 10kHz$). La table D.9 résume l'attribution des accéléromètres aux horloges cadencant leur acquisition respective.

¹¹le coefficient de réduction, présenté dans la partie 3.2.3, fut presque exclusivement égal à 16.

		Carte 1	Carte 2
Voies Analogiques	voie 1	$a7$	$a1$
	voie 2	$a8$	$a2$
	voie 3	$a9$	$a3$
	voie 4	$a10$	$a4$
	voie 5	$a11$	$a5$
	voie 6	Puissance active	$a6$
	voie 7	Anémomètre	.
Horloge	codeur 1 codeur 2	Leine Linde Admotec puis 10kHz	Leine Linde Réduit Lika

TAB. D.9: Spécification des capteurs angulaires.

D.1.3.4 Les éléments sous surveillance

L'objectif industriel de Maia Eolis étant d'assurer un suivi de l'ensemble de la ligne d'arbre, les fréquences cycliques représentatives des différentes cinématiques doivent être maîtrisées pour savoir où focaliser les observations. En ce qui concerne les phénomènes liés aux engrenements et autres défauts d'arbre, les fréquences cycliques concernées sont déterminées sans ambiguïtés et peuvent être déduites simplement des rapports de transmission détaillés dans la figure D.11. En revanche, les fréquences caractéristiques des éléments roulants sont sujets à discussion. Le constructeur d'un multiplicateur donne une estimation des fréquences caractéristiques de roulement sans assurer l'origine du constructeur du roulement, décrédibilisant de fait la précision de la fréquence caractéristique. En effet, un roulement respecte la tenue à un niveau d'effort tout en répondant aux exigences géométriques qui accueilleront un roulement, en utilisant le résultat de son propre dimensionnement interne : angle de contact, nombre d'éléments roulant, diamètre des pistes de roulement... Inversement, dans le cas d'un multiplicateur d'éolienne, le constructeur se réserve le droit de remplacer chaque roulement par celui d'un autre roulement dans le cas où la provision du premier fournisseur viendrait à manquer, sans préciser quel roulement est finalement équipé.

Dans le cas particulier du multiplicateur RENK, les roulements étant d'origine *SKF* et *FAG*, une consultation des fournisseurs offre un aperçu de la différence entre les fréquences caractéristiques associées à des roulements qui ne sont semblables qu'en apparence. La table D.10 présente les fréquences caractéristiques¹² conseillées par les constructeurs (Renk, VEM) ainsi que les variations qui séparent les fréquences caractéristiques entre fournisseurs (FAG et SKF). Cette étude souligne le manque exubérant de précision sur la localisation des fréquences caractéristiques.

¹²fréquences cycliques en référence à l'arbre rapide

Rt	Fréquences caractéristiques			Précision en %		
	BPFI	BPFO	2xBSF	BPFI	BPFO	2xBSF
A	0.1496	0.1252	0.1041	3.7	3.3	2.4
B	0.3445	0.3191	0.2440			
C	0.5684	0.4391	0.3161			
D	0.6452	0.5302	0.4148	3.8	3.5	1
E	0.1462	0.1192	0.0897	3.1	4.1	3.1
F/G	3.2721	2.7941	2.3143			
H	7.92	5.08	4.34			
I	11.9	9.07	6.91	4.6	5.2	0.5
J	1.6383	1.2631	1.0368	1	1.2	7.3
K	6.4901	4.5475	6.0706	1	1.5	6.5
L1/L2	4.81	3.19	4.72	12.5	12.5	0

TAB. D.10: Estimation des fréquences cycliques caractéristiques, par rapport à l'arbre rapide, des roulements porteurs de la ligne d'arbre.

D.2 Approche tribologique

La tribologie est l'étude de la friction entre deux surfaces en contact. Par extension, ce vaste domaine traite les problèmes qui associent lubrification et détérioration de surface. Les contacts de type Elasto Hydro Lubrifié se définissent par la présence d'un lubrifiant utilisé pour séparer deux corps par une pression tellement élevée que les deux surfaces se déforment élastiquement. Bien sur, le film de lubrifiant qui sépare les deux corps est très fin, en général de l'ordre du micron. La pression de contact est si élevée qu'elle mène à de radicaux changement de comportement du lubrifiant, qui peut devenir localement solide. Ce sont la taille de la surface de contact déformée et l'effet piezo-visqueux¹³ du lubrifiant qui caractérisent les contacts Elasto Hydro Lubrifié, que l'on rencontre aussi bien dans les engrènements que dans les roulements à billes/rouleaux.

Dans le cas du roulement, la charge radiale qu'applique l'arbre sur l'alésage est transmise par la pression générée entre les surfaces de contact. La figure D.14 représente les distributions de pression transmises par le film en fonction de la direction de roulement (X) dans un contact de type EHL. Le creux de pression correspondant à la localisation de l'indentation n'est pas symétrique car le modèle incorpore du glissement dans le roulement. Les zones de surpression qui entourent l'indentation sont représentatives du soulèvement de matière entourant inévitablement l'indent. Les variations de vitesse induites par le passage de l'indentation sont difficiles à prévoir, tant les phénomènes en jeu sont complexes.

Sachant qu'une indentation est une déformation microscopique dont la profondeur

¹³la viscosité s'accroît avec la pression

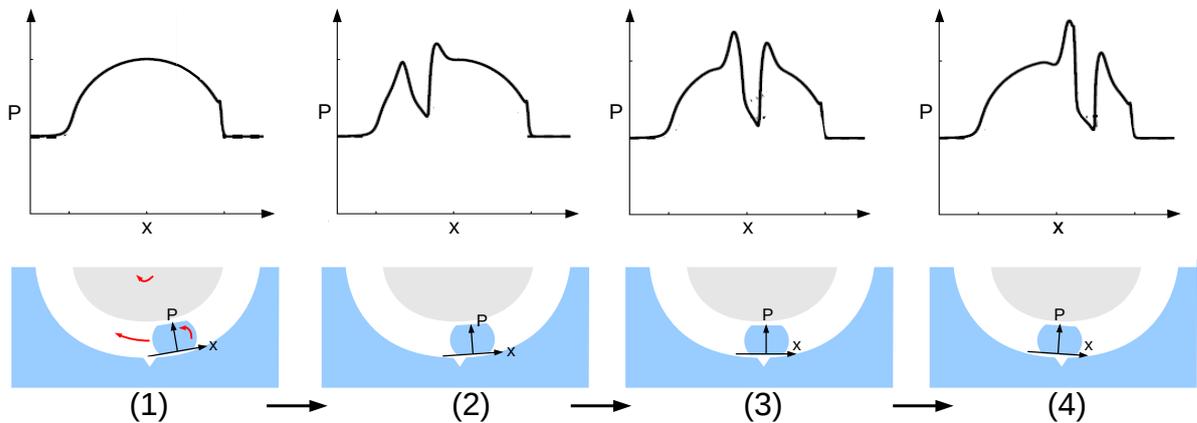


FIG. D.14: Figure basée sur les travaux de Biboulet [BIB 08] représentant la distribution de pression dans le fluide séparant l'élément roulant de la bague extérieure pendant 4 phases classées chronologiquement et représentative de la traversée d'une indentation à travers la zone de contact.

est aussi faible que l'épaisseur du film, elle est mécaniquement plus proche de la rugosité de l'écaillage que de l'écaillage considéré dans sa globalité. Les travaux de Biboulet permettent de souligner l'influence des perturbations microscopiques sur le comportement dynamique de l'ensemble et invite à ne pas négliger les déformations de petites tailles lors de la simulation d'élément défectueux, car ils sont eux aussi susceptibles d'affecter la vitesse de rotation du mécanisme. La taille de l'indentation apparaît, d'un point de vue macroscopique, équivalente à l'évolution du coefficient de frottement, lui même susceptible de ralentir périodiquement le système au passage de l'indentation dans la zone chargée.

Bibliographie

- [ALH 32] AL-HAZRED A.
La loi de Murphy pour les nuls. *Le petit doctorant*, vol. 1, n° 1, 932, p. 1 - 2.
- [ANT 02] ANTONI J., DANIÈRE J., GUILLET F.
Effective vibration analysis of IC engines using cyclostationarity. part I-A methodology for condition monitoring. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 257, n° 5, 2002, p. 815–837.
- [ANT 04a] ANTONI J., RANDALL R. B.
Unsupervised noise cancellation for vibration signals : part I–evaluation of adaptive algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, n° 1, 2004, p. 89–101.
- [ANT 04b] ANTONI J., RANDALL R.
Unsupervised noise cancellation for vibration signals : part II–A Novel Frequency Domain Algorithm. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, n° 1, 2004, p. 103–118.
- [ANT 06a] ANTONI J.
The spectral kurtosis : a useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, n° 2, 2006, p. 282 - 307.
- [ANT 06b] ANTONI J., RANDALL R.
The spectral kurtosis : application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, n° 2, 2006, p. 308 - 331.
- [ANT 07a] ANTONI J.
Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, n° 1, 2007, p. 108 - 124.
- [ANT 07b] ANTONI J.
Cyclic spectral analysis in practice. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, n° 2, 2007, p. 597–630.
- [ANT 09a] ANTONI J.
Quelques apports de la cyclostationnarité à la surveillance des systèmes mécaniques. *Proceedings du 2ème Congrès International sur l'Ingénierie des Risques Industriels, mai 2009, Reims, France, , 2009.*

- [ANT 09b] ANTONI J.
Cyclostationarity by examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, n° 4, 2009, p. 987–1036.
- [BAN 85] BANNISTER R. H.
A review of rolling element bearing monitoring techniques. *I.MECH.E Conference on condition monitoring of machinery and plant*, vol. 1, 1985, p. 11–24.
- [BAR 09a] BARSZCZ T., RANDALL R.
Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, n° 4, 2009, p. 1352 - 1365.
- [BAR 09b] BARTELEMUS W., ZIMROZ R.
A new feature for monitoring the condition of gearboxes in non-stationary operating conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, n° 5, 2009, p. 1528-1534.
- [BER 99] BERTOCCO M., FLAMMINI A., MARIOLI D., TARONI A.
Robust and accurate real-time estimation of sensors signal parameters by a DSP approach. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999. IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE*, vol. 2, 1999, p. 697-702 vol.2.
- [BIB 08] BIBOULET N.
Influence of indentations on rolling bearing life. Ecole Doctorale MEGA, INSA de Lyon, 09 2008.
- [BIN 92] BINDER J.
New generation of automotive sensors to fulfil the requirements of fuel economy and emission control. *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 31, n° 1-3, 1992, p. 60–67.
- [BON 05] BONNARDOT F., EL BADAoui M., RANDALL R., DANIERE J., GUILLET F.
Use of the acceleration of a gearbox in order to perform angular resampling (with limited speed fluctuation). *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 19, 2005, p. 766-785.
- [BOU 99] BOULENGER A., PACHAUD C.
Diagnostic vibratoire en maintenance préventive. 2-10-004105-3 Dunod, technique et ingénierie édition, 1999.
- [BOU 10] BOURDON A., ANDRÉ H., RÉMOND D.
A New way of writing motion equation in rotating machines by translation into the angular domain. *Proceedings of the 8th IFToMM International Conference on Rotor-dynamics, KIST, Seoul, South Korea*, , 2010.
- [BRA 75] BRAUN S.
The extraction of periodic waveforms by time domain averaging. *Acustica*, vol. 32, 1975, p. 69-77.
- [BRU 07] BRUYÈRE D.
suivi de comportement d'une ligne d'arbre d'éolienne. *Master Thesis of Mechanical Engineering, ED MEGA, Insa Lyon*, , 2007.

- [CHA 09] CHARLES P., SINHA J. K., GU F., LIDSTONE L., BALL A.
Detecting the crankshaft torsional vibration of diesel engines for combustion related diagnosis. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 321, n° 3-5, 2009, p. 1171 - 1185.
- [C.J 00] C.J. STANDER P. H.
Fault detection on gearboxes operating at varying speeds and loads. *Proceedings of the 13th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Houston, Texas, Dec. 2000*, p. 1011-1020.
- [C.J 02] C.J. STANDER P.S. HEYNS W. S.
Using vibration monitoring for local fault detection on gears operating under fluctuating load conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 16, n° 6, 2002, p. 1005-1024.
- [DAH 10] DAHER Z., SEKKO E., ANTONI J., CAPDESSUS C., ALLAM L.
Estimation of the synchronous average under varying rotating speed condition for vibration monitoring. *Proceedings of the ISMA conference 2010*, , 2010.
- [D'E 10] D'ELIA G., DAHER Z., ANTONI J.
A novel approach for the cyclo-non-stationary analysis of speed varying signals. *Proceedings of the ISMA conference 2010*, , 2010.
- [DES 10] DESBIOLLES P., ELBADAoui M., MUSY O., RÉMOND D.
Brevet WO2010/122240A1, Method for detecting a structural defect in a mechanical assembly including a rotary member. rapport, 2010, SNR, Lamcos, Laspi.
- [DOL 08] DOLLA G. L., KOTZALASB M. N., KANGC Y. S.
Life-Limiting Wear of Wind Turbine Gearbox Bearings : Origins and Solutions. *Proceedings Ewec 2010, Varsovie*, , 2008.
- [END 09] ENDO H., RANDALL R., GOSSELIN C.
Differential diagnosis of spall vs. cracks in the gear tooth fillet region : Experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, n° 3, 2009, p. 636–651.
- [FAU 89] FAURE L.
Contrôle des engrenages : mesure de l'écart de transmission. *CETIM Informations*, vol. 109, 1989, p. 47-55.
- [FAU 92] FAURE L.
Aspect des dentures d'engrenages après fonctionnement. 9782854002539 CETIM, 1992.
- [FUF 98] FUFÉ K.
Analysis of computed order tracking. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 11, n° 2, 1998, p. 187-205.
- [GAB 46] GABOR D.
Theory of communication. *J. IEE*, vol. 93, 1946, p. 429-457.
- [GAR 90] GARDNER W.
Introduction to random processes. *Mc Graw Hill*, , 1990.

- [Ger07] GermanisherLloyd, Gmbh, Guideline for the certification of condition monitoring systems for windturbines, germanischer lloyd renewables certification édition, 2007.
- [GIR 02] GIROLAMI G., VAKMAN D.
Instantaneous frequency estimation and measurement : a quasi-local method. *Measurement Science and Technology*, vol. 13, n° 6, 2002, p. 909-917.
- [GIR 10] GIRARDIN F., RÉMOND D., RIGAL J.
Tool wear detection in milling—An original approach with a non-dedicated sensor. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, n° 6, 2010, p. 1907 - 1920.
- [GU 06] GU F., YESILYURT I., YUHUA L., HARRIS G., BALL A.
An investigation of the effects of measurement noise in the use of instantaneous angular speed for machine diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, n° 6, 2006, p. 1444–1460.
- [HAL 96] HALLIWELL N.
The laser torsional vibrometer : A step forward in rotating machinery diagnostics. *Journal of sound and vibration*, vol. 190, n° 3, 1996, p. 399–418.
- [HEI 05] HEIDENHAIN
Système de mesure pour entraînements électriques. Dr Johanness Heidenhain Gmbh, Dr Johanness Heidenhain Strasse 5, 83301 Traunreut, Germany, dec 2005.
- [H.J 94] H.J. DECKER R.F. HANDSCHUH J. Z.
An enhancement to the NA4 gear vibration diagnostic parameter. *Technical Report NASA TM-106553, ARL-TR-389, NASA and the US Army Research Laboratory*, , 1994.
- [HO 00] HO D., RANDALL R. B.
Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 14, n° 5, 2000, p. 763–788.
- [HUS 11] HUSSAIN S., GABBAR H.
A novel method for real time gear fault detection based on pulse shape analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, n° 4, 2011, p. 1287 - 1298.
- [JAL 09] JALAN A. K., MOHANTY A.
Model based fault diagnosis of a rotor-bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 327, n° 3-5, 2009, p. 604 - 622.
- [JIA 01] JIANGUO Y., LIJUN P., ZHIHUA W., YICHEN Z., XINPING Y.
Fault detection in a diesel engine by analysing the instantaneous angular speed. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 15, n° 3, 2001, p. 549 - 564.
- [J.J 93] J.J. ZAKRAJSEK D.P. TOWNSEND H. D.
An analysis of gear fault detection methods as applied to pitting fatigue failure data. *Technical Report NASA TM-105950, AVSCOM TR-92-C-035, NASA and the US Army, Aviation Systems Command*, , 1993.

- [KAU 97] KAUL S., KOUL R., BHAT C., KAUL I., TICKOO A.
Use of a look-up table improves the accuracy of a low-cost resolver-based absolute shaft encoder. *Measurement Science & Technology*, vol. 8, 1997, p. 329-331.
- [KAU 08] KAUL S., TICKOO A., KOUL R., KUMAR N.
Improving the accuracy of low-cost resolver-based encoders using harmonic analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 586, n° 2, 2008, p. 345 - 355.
- [KIL 11] KILUNDU B., CHIEMENTIN X., DUEZ J., MBA D.
Cyclostationarity of Acoustic Emissions (AE) for monitoring bearing defects. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, n° 6, 2011, p. 2061 - 2072. Interdisciplinary Aspects of Vehicle Dynamics.
- [KON 87] KONG X.
Gear train monitoring by transmission error method. *PhD Thesis, University of Wisconsin Madison*, , 1987.
- [LEI 09] LEI Y., HE Z., ZI Y.
Application of an intelligent classification method to mechanical fault diagnosis. *Expert Systems with Applications*, vol. 36, n° 6, 2009, p. 9941-9948.
- [LI 98] LI X., MEIJER G.
A novel low-cost noncontact resistive potentiometric sensor for the measurement of low speeds. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47 (3), n° 3, 1998, p. 776-781.
- [LIG 04] LIGUORI C., PAOLILLO A., PIGNOTTI A.
Estimation of signal parameters in frequency domain in presence of harmonic interference : a comparative analysis. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004. IMTC 04. Proceedings of the 21st IEEE*, vol. 1, mai 2004, p. 156 - 161 Vol.1.
- [MBA 08] MBA D.
The Use of Acoustic Emission for Estimation of Bearing Defect Size. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 8, 2008, p. 188-192, Springer Boston. 10.1007/s11668-008-9119-8.
- [MCB 09] MCBAIN J., TIMUSK M.
Fault detection in variable speed machinery : Statistical parameterization. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 327, n° 3-5, 2009, p. 623 - 646.
- [McF 84] MCFADDEN P. D., SMITH J. D.
Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. *Journal of Sound Vibration*, vol. 96, 1984, p. 69-82.
- [MCF 87] MCFADDEN P.
Examination of a technique for the early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 2, n° 1, 1987, p. 173-183.

- [MCF 89] MCFADDEN P.
Interpolation techniques for time domain averaging of gear vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 3, n° 1, 1989, p. 87–97.
- [MEY 80] MEYER L. D., AHLGREN F. F., WEICHBRODT B.
An Analytic Model for Ball Bearing Vibrations to Predict Vibration Response to Distributed Defects. *Journal of Mechanical Design*, vol. 102, n° 2, 1980, p. 205-210, ASME.
- [MUL 02] MULLER J.
Le bruit dans les systèmes électroniques. *Support de court, Lycée Louis Armand de Mulhouse*, , 2002.
- [MUN 92] MUNRO R.
Review of the theory and measurement of gear transmission error. *InProceedings I MechE Conference*, , 1992, page 3.
- [PIC 09] PICHLER K., DEL RE L., SCHREMS A., WÜRTELE M.
Monitoring procedure in frequency domain using intensity estimation of the energy of the envelope. *proceedings of the 15th IFAC Symposium on System Identification, Saint Malo, France, 2009*.
- [POT 90] POTTER R.
A New Order Tracking Method for Rotating Machinery. *Sound & Vibration*, vol. 24, 1990, p. 30-34.
- [RAF 09] RAFIEE J., TSE P.
Use of autocorrelation of wavelet coefficients for fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. In Press, Accepted Manuscript, 2009, p. -.
- [RAN] RANDALL R., SAWALHI N.
Semi-automated bearing diagnostics - Three case studies. *Proceedings of COMADEM 2007, The 20th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostics Engineering Management, Faro, Portugal, June 13-15*.
- [RAN 87] RANDALL R.
Frequency Analysis, third edition. Bruel&Kjaer, 1987.
- [RAN 95] RANDALL R., LI L.
Diagnostics of planetary gear bearings in the presence of gear vibrations. *Second International Conference on Gearbox Vibration and Diagnostics, ImechE*, , 1995, p. 73-80.
- [RAN 00] RANDALL R.
Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 14, n° 5, 2000, p. 763 - 788.
- [RAN 01] RANDALL R., ANTONI J., CHOBSAARD S.
The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 15, n° 5, 2001, p. 945–962.

- [REN 10] RENAUDIN L., BONNARDOT F., MUSY O., DORAY J., RÉMOND D.
Natural roller bearing fault detection by angular measurement of true instantaneous angular speed. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. In Press, Corrected Proof, 2010, p. -.
- [RES 05] RESOR B. R., TRETHERWEY M. W., MAYNARD K. P.
Compensation for encoder geometry and shaft speed variation in time interval torsional vibration measurement. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 286, n° 4-5, 2005, p. 897 - 920.
- [ROB 03] ROBICHAUD J.
Reference Standards for Vibration Monitoring and Analysis. Bretech Engineering Ltd, 2003. disponible sur www.bretech.com, consulté le 01/03/2011.
- [RÉM] RÉMOND D.
Mesures, modèles expérimentaux et identification en dynamique des machines tournantes. Habilitation à diriger les recherches, INSA de Lyon, Ecole doctorale MEGA.
- [RÉM 98] RÉMOND D.
Practical performances of high-speed measurement of gear transmission error or torsional vibrations with optical encoders. *Measurement Science and Technology*, vol. 9, n° 3, 1998, p. 347–353.
- [RÉM 05] RÉMOND D., MAHFOUDH J.
From transmission error measurements to angular sampling in rotating machines with discrete geometry. *Shock and Vibration*, vol. 12, n° 2, 2005.
- [SAW 07] SAWALHI N., RANDALL R., ENDO H.
The enhancement of fault detection and diagnosis in rolling element bearings using minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, n° 6, 2007, p. 2616–2633.
- [SAW 11] SAWALHI N., RANDALL R.
Vibration response of spalled rolling element bearings : Observations, simulations and signal processing techniques to track the spall size. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, n° 3, 2011, p. 846 - 870.
- [STE 77] STEWART R.
Some useful analysis techniques for gearbox diagnostics. *Technical Report MHM/R/10/77, Machine Health Monitoring Group, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton*, , 1977.
- [SWA 80] SWANSSON N.
Application of vibration signal analysis techniques to signal monitoring. *Conference on Friction and Wear in Engineering, Australia*, vol. 1.2, 1980, p. 262-267.
- [THO 04] THOMAS M.
Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines. Université du Québec, École de technologie supérieure, 2004.

- [VAK 00] VAKMAN D.
New high precision frequency measurement. *Measurement Science and Technology*, vol. 11, n° 10, 2000, p. 1493-1497.
- [VIL 48] VILLE J.
Théorie et application de la notion de signal analytique. *Cables Transm.*, vol. 2, 1948, p. 61-74.
- [VIL 11] VILLA L. F., REÑONES A., PERÁN J. R., DE MIGUEL L. J.
Angular resampling for vibration analysis in wind turbines under non-linear speed fluctuation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, n° 6, 2011, p. 2157 - 2168. Interdisciplinary Aspects of Vehicle Dynamics.
- [WAN 92] WANG P., DAVIES P., STARKEY J., ROUTSON R.
A torsional vibration measurement system. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1992. IMTC '92., 9th IEEE*, mai 1992, p. 661 -666.
- [WAN 08] WANG D., MIAO Q., KANG R.
Robust health evaluation of gearbox subject to tooth failure with wavelet decomposition. *Journal of Sound and Vibration*, vol. In Press, Corrected Proof, 2008.
- [WEL 67] WELCH P. D.
The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra : A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. *IEEE Trans. Audio Electroacoust., Volume AU-15*, p. 70-73, vol. 15, 1967, p. 70-73.
- [WIL 96] WILLIAMS J.
Improved methods for digital measurement of torsional vibration. *AE Paper No. 962204*, , 1996.
- [XU 94] XU M., MARANGONI R. D.
Vibration Analysis Of A Motor-Flexible Coupling-Rotor System Subject To Misalignment And Unbalance, Part I : Theoretical Model And Analysis. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 176, n° 5, 1994, p. 663 - 679.
- [YU 10] YU S., ZHANG X.
A data processing method for determining instantaneous angular speed and acceleration of crankshaft in an aircraft engine-propeller system using a magnetic encoder. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, n° 4, 2010, p. 1032 - 1048.
- [YUH 05] YUHUA L., GU F., HARRIS G., BALL A., BENNETT N., TRAVIS K.
The measurement of instantaneous angular speed. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 19, n° 4, 2005, p. 786-805.
- [ZAK 94] ZAKRAJSEK J.
A review of transmission diagnostics research at NASA Lewis Research Center. *Technical Report NASA TM-106746, ARL-TR-599, NASA and the US Army Research Laboratory*, , 1994.
- [ZHU 06] ZHUANG LI S. G.
Rotating Machinery Fault Diagnosis Techniques, Envelope and Cepstrum Analyses.

Technote, August 2006, Spectra Quest Inc., 8201 Hermitage Road, Richmond, VA 23228.

FOLIO ADMINISTRATIF

THÈSE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

NOM : ANDRÉ

DATE de SOUTENANCE : 09 décembre 2011

Prénoms : Hugo, Benjamin

TITRE : SURVEILLANCE ANGULAIRE D'UNE LIGNE D'ARBRE D'ÉOLIENNE SOUS CONDITIONS NON STATIONNAIRES

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2010-ISAL-XXX

École doctorale : MEGA

Spécialité : Mécanique - Génie Mécanique - Génie Civil

Cote B.I.U. - Lyon : T 50/210/19 / et bis CLASSE :

RÉSUMÉ :

Dans le cadre de la maintenance conditionnelle, l'analyse vibratoire temporelle repose sur 50 ans d'expérience et jouit, de fait, d'une représentativité importante dans le secteur éolien. Cette analyse, appliquée sous des conditions de fonctionnement non stationnaires, fait néanmoins preuve d'un manque de précision dans la détection de défauts mécaniques. Afin de synchroniser l'échantillonnage avec les défauts des éléments tournants de la ligne d'arbre, il est alors nécessaire de s'appuyer sur une discrétisation angulaire du vecteur d'information. L'objet de cette étude est le développement d'un outil de surveillance disposant de cette qualité et s'appuyant sur les variations que présente la vitesse instantanée de la machine tournante pour évaluer l'état des éléments tournants.

La vitesse angulaire instantanée, associée à l'analyse spectrale, est assujettie à des perturbations dont les origines sont identifiées et les influences quantifiées. Ainsi, il est envisageable de dimensionner un système de mesure en fonction des caractéristiques de la chaîne cinématique sous surveillance. Ce document propose également plusieurs outils de traitement originaux qui permettent, sous des conditions de fonctionnement non stationnaires, d'améliorer suffisamment l'observation pour que l'utilisation d'un seul capteur soit envisageable pour assurer la surveillance de la ligne d'arbre dans sa totalité. Ces outils mettent en exergue la dualité temporelle angulaire de la surveillance de machines tournantes et tirent parti des conditions de fonctionnement non stationnaires par la connaissance de la vitesse instantanée.

Les procédés d'acquisition combinés aux outils de traitement sont mis à l'épreuve sur plusieurs banc d'essais. Sensible au degré de désalignement, au type de défaut d'engrènement et à la gravité d'un écaillage, la vitesse angulaire instantanée est dorénavant une alternative confirmée à la surveillance vibratoire, même angulaire. Une vaste campagne de mesures a été lancée en parallèle et en continu sur une éolienne dans l'objectif ambitieux de mettre en place un procédé de pronostic. Les diverses conditions de fonctionnement sont prises en compte par une approche statistique permettant d'utiliser avantageusement leurs influences sur les mesures qui en sont issues. Ces travaux constituent une première étape dans la réalisation d'un modèle de surveillance multi-niveau adapté aux machines à fonctionnement variable dont les éoliennes sont un parfait exemple de complexité.

MOTS-CLÉS : Éolienne, Surveillance, Diagnostique, Non Stationnaire, Angulaire, Vibrations, Vitesse instantanée, Traitement du signal.

Laboratoire(s) de recherche : Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures
UMR CNRS 5259 - INSA de Lyon
18-20 rue des Sciences
69621 Villeurbanne Cedex FRANCE

Directeur de thèse : Monsieur le Professeur Didier RÉMOND

Président du jury : Jérôme ANTONI

Composition du jury :	Robert RANDALL	Jean Paul DRON
	Fengshou GU	Didier RÉMOND
	Adeline BOURDON	Nicolas GIRARD
	Jérôme ANTONI	