



**HAL**  
open science

# PHM Autonome : Application au roulement intelligent

Yoann Hebrard

► **To cite this version:**

Yoann Hebrard. PHM Autonome : Application au roulement intelligent. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Lyon, 2018. Français. NNT : 2018LYSEI004 . tel-04060086

**HAL Id: tel-04060086**

**<https://theses.hal.science/tel-04060086>**

Submitted on 6 Apr 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N°d'ordre

NNT : 2018LYSEI004

**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**  
opérée au sein de  
**INSA-LYON**

**Ecole Doctorale N° 162**  
**Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique**

**Spécialité/ discipline de doctorat :**  
Génie mécanique

Soutenue publiquement le 22/01/2018, par :

**Yoann HEBRARD**

Ingénieur Ecole Centrale de LILLE

---

**PHM autonome : application au  
roulement intelligent**

---

Devant le jury composé de :

Pr. Emmanuelle VIDAL-SALLE  
Pr. Yves BERNARD  
Pr. Benoit GUIFFARD  
Dr. Oscar D'ALMEIDA  
Pr. Jocelyn BONJOUR  
Pr. Colette LACABANNE  
Pr. Laurent LEBRUN  
Dr. HDR Pierre-Jean COTTINET  
Dr. Jean-Fabien CAPSAL  
Yves MAHEO

INSA-Lyon  
Université de PARIS-SUD  
Université de NANTES  
SAFRAN  
INSA-Lyon  
UNIVERSITE TOULOUSE 3  
INSA-Lyon  
INSA-Lyon  
INSA-Lyon  
SKF-AEROSPACE

Présidente  
Rapporteur  
Rapporteur  
Rapporteur  
Représentant ED  
Examinatrice  
Directeur de thèse  
Invité  
Invité  
Invité

## Département FEDORA-INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
<b>CHIMIE</b>	<p><b>CHIMIE DE LYON</b>  <a href="http://www.edchimie-lyon.fr">http://www.edchimie-lyon.fr</a></p> <p>Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise                      Pascal 3<sup>e</sup> etage  <a href="mailto:secretariat@edchimie-lyon.fr">secretariat@edchimie-lyon.fr</a> Insa : R. GOURDON</p>	<p><b>M. Stéphane DANIELE</b>                      Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon                      IRCELYON-UMR 5256                      Equipe CDFA                      2 avenue Albert Einstein                      69626 Villeurbanne cedex  <a href="mailto:directeur@edchimie-lyon.fr">directeur@edchimie-lyon.fr</a></p>
<b>E.E.A.</b>	<p><b>ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</b>  <a href="http://edeea.ec-lyon.fr">http://edeea.ec-lyon.fr</a></p> <p>Sec : M.C. HAVGOUDOUKIAN  <a href="mailto:Ecole-Doctorale.eea@ec-lyon.fr">Ecole-Doctorale.eea@ec-lyon.fr</a></p>	<p><b>M. Gérard SCORLETTI</b>                      Ecole Centrale de Lyon                      36 avenue Guy de Collongue                      69134 ECULLY                      Tél : 04.72.18 60.97 Fax : 04 78 43 37 17  <a href="mailto:Gerard.scorletti@ec-lyon.fr">Gerard.scorletti@ec-lyon.fr</a></p>
<b>E2M2</b>	<p><b>EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION</b>  <a href="http://e2m2.universite-lyon.fr">http://e2m2.universite-lyon.fr</a></p> <p>Sec : Sylvie ROBERJOT                      Bât Atrium - UCB Lyon 1                      04.72.44.83.62                      Insa : H. CHARLES  <a href="mailto:secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr">secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr</a></p>	<p><b>M. Fabrice CORDEY</b>                      CNRS UMR 5276 Lab. de géologie de Lyon                      Université Claude Bernard Lyon 1                      Bât Géode                      2 rue Raphaël Dubois                      69622 VILLEURBANNE Cédex                      Tél : 06.07.53.89.13  <a href="mailto:cordev@univ-lyon1.fr">cordev@univ-lyon1.fr</a></p>
<b>EDISS</b>	<p><b>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES- SANTE</b>  <a href="http://www.ediss-lyon.fr">http://www.ediss-lyon.fr</a></p> <p>Sec : Sylvie ROBERJOT Bât Atrium                      - UCB Lyon 1 04.72.44.83.62                      Insa : M. LAGARDE  <a href="mailto:secretariat.ediss@univ-lyon1.fr">secretariat.ediss@univ-lyon1.fr</a></p>	<p><b>Mme Emmanuelle CANET-SOULAS</b>                      INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1                      Bâtiment IMBL                      11 avenue Jean Capelle INSA de Lyon                      696621 Villeurbanne                      Tél : 04.72.68.49.09 Fax :04 72 68 49 16  <a href="mailto:Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr">Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr</a></p>
<b>INFOMATHS</b>	<p><b>INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES</b>  <a href="http://infomaths.univ-lyon1.fr">http://infomaths.univ-lyon1.fr</a></p> <p>Sec :Renée EL MELHEM Bat Blaise                      Pascal                      3<sup>e</sup> etage  <a href="mailto:infomaths@univ-lyon1.fr">infomaths@univ-lyon1.fr</a></p>	<p><b>Mme Sylvie CALABRETTO</b>                      LIRIS – INSA de Lyon                      Bat Blaise Pascal                      7 avenue Jean Capelle                      69622 VILLEURBANNE Cedex                      Tél : 04.72. 43. 80. 46 Fax 04 72 43 16 87  <a href="mailto:Sylvie.calabretto@insa-lyon.fr">Sylvie.calabretto@insa-lyon.fr</a></p>
<b>Matériaux</b>	<p><b>MATERIAUX DE LYON</b>  <a href="http://ed34.universite-lyon.fr">http://ed34.universite-lyon.fr</a></p> <p>Sec : M. LABOUNE                      PM : 71.70 –Fax : 87.12                      Bat. Direction  <a href="mailto:Ed.materiaux@insa-lyon.fr">Ed.materiaux@insa-lyon.fr</a></p>	<p><b>M. Jean-Yves BUFFIERE</b>                      INSA de Lyon                      MATEIS                      Bâtiment Saint Exupéry                      7 avenue Jean Capelle                      69621 VILLEURBANNE Cedex                      Tél : 04.72.43 71.70 Fax 04 72 43 85 28  <a href="mailto:jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr">jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr</a></p>
<b>MEGA</b>	<p><b>MECANIQUE,ENERGETIQUE,GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE</b>  <a href="http://mega.universite-lyon.fr">http://mega.universite-lyon.fr</a></p> <p>Sec : M. LABOUNE                      PM : 71.70 –Fax : 87.12                      Bat. Direction  <a href="mailto:mega@insa-lyon.fr">mega@insa-lyon.fr</a></p>	<p><b>M. Philippe BOISSE</b>                      INSA de Lyon                      Laboratoire LAMCOS                      Bâtiment Jacquard                      25 bis avenue Jean Capelle                      69621 VILLEURBANNE Cedex                      Tél : 04.72 .43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37  <a href="mailto:Philippe.boisse@insa-lyon.fr">Philippe.boisse@insa-lyon.fr</a></p>
<b>ScSo</b>	<p><b>ScSo*</b>  <a href="http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/">http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/</a></p> <p>Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS                      Insa : J.Y. TOUSSAINT                      Tél : 04 78 69 72 76  <a href="mailto:viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr">viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr</a></p>	<p><b>M. Christian MONTES</b>                      Université Lyon 2                      86 rue Pasteur                      69365 LYON Cedex 07  <a href="mailto:Christian.montes@univ-lyon2.fr">Christian.montes@univ-lyon2.fr</a></p>

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

## Remerciements

Ces quelques lignes m'offrent l'opportunité de remercier les nombreuses personnes qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours de recherche qui démarra un jour de Février 2010 au sein de la société SKF-AEROSPACE et du LGEF-Insa Lyon.

De nombreuses personnes m'ont permis d'accomplir la première étape de ce parcours de recherche. Ces lignes sont l'occasion de les remercier pour leur soutien. Mes premières pensées vont à Monsieur Pierre-Jean Cottinet, mon encadrant de thèse. Je tiens à le remercier vivement pour son soutien professionnel et personnel sans faille durant toutes ces années. Je lui suis reconnaissant de la confiance qu'il m'a accordée. Ses conseils et son écoute ont grandement contribué à l'avancée de ce travail. Il a su me transmettre sa passion pour le métier d'enseignant-chercheur.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du jury, aux rapporteurs de cette thèse qui me font l'honneur d'évaluer ce travail et de participer à ce jury de soutenance de thèse, ainsi qu'aux Professeurs Alain Daidié et Jean-Charles Mare, à Michel Todeschi de la société AIRBUS pour leurs lettres de soutien à mon dossier de candidature à l'obtention d'une Thèse par VAE.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à l'ensemble des membres du LGEF pour leurs remarques et leur soutien, qui m'ont accompagné et encouragé depuis nos premières collaborations. Mes remerciements vont également à l'ensemble de l'équipe administrative du LGEF, de l'INSA-Lyon et plus particulièrement à Evelyne Dorieux.

Ma reconnaissance s'adresse aussi à tous mes collègues pour avoir partagé cette aventure humaine. Je tiens à remercier plus spécifiquement Gwénohé et Franck, pour les moments de bonne humeur partagée et l'intérêt qu'il a porté à mon travail, Alexandre, pour nos échanges, son écoute, Bruno, compagnon de route depuis 2011, et Jean-Baptiste, pour sa présence et son soutien.

Mon étude empirique a pu être réalisée grâce à de nombreuses personnes. Mes sincères remerciements vont à Hervé, Renaud et Jean-Louis pour m'avoir fait découvrir l'univers des essais, à Stéphane, Pierrick et François pour m'avoir ouvert les portes du monde de la mécatronique au sein de SKF. Je pense également à Gregory Zimmerman et Olivier Message : merci d'avoir facilité ma compréhension du groupe.

La réalisation de ce travail a été facilitée par Yves Maheo qui m'a ouvert les portes de son service et a soutenu ma démarche de VAE. Merci à tous les autres collègues que j'ai rencontrés et qui m'ont accordé du temps pour me transmettre un peu de leur savoir.

Je tiens à remercier à travers ces quelques lignes l'ensemble de mes amis. Merci d'avoir toujours été là pour moi !

Mes remerciements vont enfin à ma famille, mon épouse et mes filles, mes parents et mon frère, qui ont toujours été d'un réconfort absolu : mon épouse pour son indéfectible soutien, ses encouragements et sa patience, mes parents et mon frère pour avoir toujours cru en moi et en cette thèse. Merci pour les valeurs que vous m'avez transmises ! Sans vous, rien n'aurait été possible !

## Table des matières

Motivations à l'obtention d'un diplôme de doctorat par validation des acquis de l'expérience .....	1
Introduction.....	2
1. Le management de l'innovation dans les entreprises.....	3
2. Activités et rôle au sein du service développement produit de SKF-AEROSPACE .....	4
3. Curriculum vitae .....	8
4. Vue d'ensemble des activités .....	12
5. Présentation des projets .....	14
5.1. COVADIS (2006-2009).....	14
5.2. EPICE-CORALIE (2010-2015) .....	16
5.3. NEXGED (2010-2015).....	17
5.4. ACTUATION 2015 (2010-2015).....	20
6. Thématiques et activités de recherche .....	22
6.1. Surveillance de santé, récupération d'énergie, système embarqué.....	22
6.2. Capteurs et roulements capteur, transmission sans fil et traitement du signal : vers le roulement smart.....	40
7. Activités pédagogiques et autres .....	49
8. Liste des publications .....	49
AVANT-PROPOS.....	51
PARTIE I. Le roulement smart .....	53
Introduction.....	54
Chapitre 1. Du condition monitoring vers le PHM des roulements .....	55
1. Comparaison et alignement des processus de CBM, SHM et PHM .....	56
1.1 Condition Based Maintenance (CBM) .....	56
1.2. Structural Health Monitoring (SHM) .....	56
1.3 Prognostic and Health Management (PHM) .....	57
1.4 Comparaisons entre CBM, CM, SHM et PHM.....	58
1.5. Apport des méthodes à travers une étude sur le contrôle de santé des structures.....	61
Chapitre 2. Application au contrôle de santé des roulements à billes .....	65
2.1. Problématique de recherche.....	65
2.2. Constitution générale de roulement .....	65
2.3. Les phénomènes induisant une dégradation du roulement .....	66
2.3.1. Effets des contraintes mécaniques .....	67
2.3.2. Corrosion .....	68
2.3.3. Contamination du roulement.....	68
2.3.4. Défaut de lubrification .....	69

2.3.5. Température de fonctionnement.....	70
2.3.6. Autres effets possibles .....	70
2.3.7. Synthèse .....	70
2.4. Les méthodes de surveillance des roulements .....	70
2.5. Synthèse sur le contrôle de santé des roulements .....	71
Chapitre 3. Fonctions mécatroniques intégrées aux roulements .....	72
3.1. Les mesures actuellement disponibles .....	72
3.2. La mesure de vitesse .....	72
3.2.1. Mesure de vitesse à l'aide de champ magnétique.....	72
3.2.2. Mesure de vitesse à l'aide de capteurs optiques.....	73
3.2.3. Comparaison des deux méthodes.....	74
3.3. La mesure de position .....	74
3.3.1 Mesure de position ou d'angle à l'aide de champ magnétique.....	74
3.3.2 Mesure optique de position ou d'angle .....	75
3.3.3 Comparaison des deux méthodes.....	76
3.4. La mesure d'effort.....	76
3.4.1. Synthèse sur les mesures d'effort dans les roulements.....	79
3.5. Autres mesures.....	80
3.5.1 Mesure de température.....	80
3.5.2 Mesure de lubrification .....	81
3.5.3 Mesure de vibration .....	82
3.6. Synthèse sur l'ensemble des mesures effectuées par des roulements instrumentés.....	82
3.7. Les applications utilisant des capteurs instrumentés .....	82
Chapitre 4 Synthèse sur le roulement smart.....	86
4.1. PHM et roulement intelligent .....	86
4.2. Architecture du roulement intelligent .....	89
4.3. Analyse des contributions au développement de roulement intelligent.....	92
Références de la Partie I.....	93
Bibliographie.....	102
Partie II : Mise en œuvre de capteurs autonomes communiquant sans fil pour le PHM des composants critiques .....	104
Introduction.....	105
Chapitre 1 : Capteur de surveillance de charge autonome communicant sans fil.....	107
1.1 Contexte et objectifs .....	108
1.2. Cahier des charges.....	109
1.3. Choix technologiques et composants majeurs .....	111

1.3.1. Capteurs .....	111
1.3.2. Plateforme RFID à microcontrôleur .....	113
1.3.3. Besoins en énergie du tag RFID .....	115
1.3.4. Energies ambiantes .....	119
1.3.5. Architecture générique des microgénérateurs .....	125
1.3.6. Module de récupération d'énergie vibratoire.....	127
1.3.7. Architecture électronique du microgénérateur mécanique .....	138
1.3.7. Module de récupération thermoélectrique .....	141
1.3.8. Caractérisation de la transmission RFID à travers la nacelle.....	153
1.4. Intégration et essais de validation .....	155
1.4.1. Présentation du banc de caractérisation .....	155
1.4.3. Résultats et discussion .....	159
1.4.3. Synthèse des mesures .....	163
1.5. Essais au banc moteur au sol.....	163
1.5.1. Instrumentation de référence .....	164
1.5.2. Déroulement de l'essai.....	165
1.5.2. Résultats des essais sols .....	166
1.6 Essais en vol.....	172
1.6.1. Instrumentation de référence .....	172
1.6.2. Déroulement de l'essai vol .....	173
1.6.3 Résultats et analyse.....	174
1.7. Synthèse du projet et axe d'optimisation .....	175
Chapitre 2 : Capteur de température sans fil.....	176
3.1. Introduction.....	177
3.2. Principe de fonctionnement.....	179
3.3. Circuit de mesure au primaire.....	181
3.3.1. Architecture.....	181
3.3.1. Choix des composants .....	181
3.4. Circuit au secondaire .....	188
3.4.1. Architecture du capteur .....	188
3.4.2. Le choix des composants.....	189
3.3. Modélisation et validation .....	191
3.3.1. Schématisation de l'ensemble.....	191
3.3.2. Mise en équation.....	192
3.3.3. Ajout du coupleur.....	193
3.3.4. Recherche d'optimisation .....	194

3.4. Validation du modèle .....	195
3.4.1. Cas étudié .....	195
3.4.2. Résultats théoriques avec le modèle réalisé .....	196
3.4.3. Résultats théoriques sous P-Spice .....	197
3.4.4. Validation expérimentale .....	197
3.4.5. Conclusion .....	199
Chapitre 3 : Perspectives des travaux et futurs axes de développement .....	201
Références Partie II .....	203
Annexe 1. Etats de l'art sur les méthodes de surveillance .....	205
3.4.1. Source d'excitation vibratoire .....	209
3.4.2. Fonction de transfert de la source vibratoire au sein du roulement vers le capteur .....	213
3.4.3. Mesure .....	214
3.4.4. Traitement du signal .....	216
3.4.5. Identification des défauts à partir de l'analyse vibratoire .....	222
3.4.6. Techniques de surveillance par mesures thermiques .....	224
3.4.7. Techniques par onde de choc .....	225
3.4.8. Techniques par analyse chimique et visuelle .....	226
Annexe 2. Vers le roulement autonome .....	227
5.1. Les sources d'énergie possibles .....	227
5.1.1. La récupération d'énergie mécanique .....	227
5.1.2. La récupération d'énergie thermique .....	235
5.2. Les solutions envisageables pour la récupération d'énergie sur roulements .....	241
5.2.1. La récupération d'énergie par effet piézoélectrique .....	242
5.2.2. Architecture de micro-générateur pour des applications sur roulement .....	248
5.2.3. Intégration sur le carter .....	251
5.2.4. Architecture hybride .....	253
5.2.4. Intégration sur l'axe ou la partie en rotation .....	255
5.2.5. Comparaison des différentes solutions .....	256
5.2.6. Conclusion .....	259
Annexe 3 : Micro-générateurs tournants .....	261
2.1. Introduction .....	261
2.2. Reluctance variable .....	262
2.2. Piézoélectricité .....	266
2.3. Comparaison des concepts .....	271



## TABLE DES FIGURES

Figure 1. Espace transitionnel de la VAE [RFS 1] .....	1
Figure 2. Du monde clos à l'univers infini - Alexandre Koyré .....	2
Figure 3. Schéma et réalisation en bois d'un roulement à bille par Léonard de Vinci (15e) / SKF-insight roulement intelligent.....	3
Figure 4. Schéma fonctionnel pour un système de surveillance de santé .....	5
Figure 5. Architecture du microsystème autonome de surveillance .....	5
Figure 6. Démonstrateur technologique pour surveillance d'attache de moteur .....	6
Figure 7. Axes de collaboration INSA-LGEF et SKF-AEROSPACE.....	12
Figure 8. Déroulé de carrière vue générale.....	13
Figure 9. Covadis-démonstrateur actionneur de spoiler .....	14
Figure 10. Critère de fatigue multiaxiale pour vis à rouleaux .....	15
Figure 11. Essais de surveillance vibratoire sur vis à rouleaux.....	16
Figure 12. Système de surveillance attache de moteur d'avion (Démonstrateur) .....	16
Figure 13. Architecture autour d'un tag RFID .....	17
Figure 14. Position des roulements capteur dans le démonstrateur.....	18
Figure 15. Capteurs de position .....	18
Figure 16. Synoptique système .....	19
Figure 17. Approche de certification.....	20
Figure 18. Vis à billes pour EMA.....	20
Figure 19. Philosophie de la maintenance prédictive [PM-01] .....	22
Figure 20. SKF rotation for life.....	23
Figure 21. Internet industriel.....	24
Figure 22. Internet des objets autour du roulement intelligent (application ferroviaire) [FH-01] .....	24
Figure 23. Répartition du taux de panne dans les machines asynchrones [RHE-01] .....	25
Figure 24. Processus Bearing Health Monitoring system.....	26
Figure 25. Gain de la surveillance sur la durée de vie .....	27
Figure 26. Roulement instrumenté en jauges de contrainte .....	28
Figure 27. Mesure vibratoire sur banc essai roulement .....	29
Figure 28. Évolution du Kurtosis en fonction du stade de dégradation du roulement.....	31
Figure 29. Diagnostic basé sur la mesure des amplitudes vibratoires aux fréquences de défauts .....	32
Figure 30. Gestion de la santé roulement par surveillance des conditions d'utilisation .....	33
Figure 31. Répartition des coûts de maintenance-moteurs [SA-01].....	35
Figure 32. Plateforme de démonstration EPICE .....	37
Figure 33. Récupérateurs thermique et vibratoire sur attache moteur .....	37
Figure 34. Concept de récupérateur .....	38
Figure 35. Récupérateur piézoélectrique sur machine tournante.....	38
Figure 36. Récupérateur piezo-magnétique.....	38
Figure 37. Générateur électromagnétique intégré à une structure de roulement .....	39
Figure 38. Apparition des capteurs intégrés aux roulements .....	41
Figure 39. Le roulement intelligent .....	42
Figure 40. Architecture du roulement smart .....	43
Figure 41. Tag UHF à microcontrôleur .....	47
Figure 42. Inductive tag.....	49
Figure 43. SKF-Insight .....	53

Figure 44. Surveillance de santé des roulements – 1950.....	54
Figure 45. Relations entre CM, CBM, SHM et PHM.....	58
Figure 46. Relations entre usage d'un système et reste à vivre autour du mécanisme de défaillance	59
Figure 47. Alignement du CBM, SHM et PHM autour du mécanisme de défaillance .....	60
Figure 48. Architecture fonctionnelle du roulement smart .....	60
Figure 49. Types d'endommagements visés par le SHM (adapté de [2]).....	63
Figure 50. Rôle d'un système de SHM (adapté de [2]).....	63
Figure 51. Répartition du taux de panne dans les machines asynchrones (extrait de [2]) .....	65
Figure 52. Illustration des différents types de roulements (extrait de [11]).....	66
Figure 53. Répartition des contraintes mécaniques radiales et zones de charge au sein d'un roulement à bague externe fixe (extrait de [13]).....	67
Figure 54. Dégradations du chemin de roulement dues à des surcharges mécaniques (extrait de [14]) .....	68
Figure 55. Criques de corrosion sur une piste de roulement (extrait de [14]).....	68
Figure 56. Marques d'indentation d'un chemin de roulement dues à la présence de contaminant ...	69
Figure 57. Mécanismes généraux d'usure en présence de contaminant (adapté de [14]) .....	69
Figure 58. Dégradations provoquées par la détérioration du lubrifiant dans les roulements (a) écaillage d'un chemin de roulement, (b) éclatement de bille (extrait de [14]) .....	70
Figure 59. Apparition des capteurs intégrés aux roulements (extrait de [42]).....	72
Figure 60. Principe de fonctionnement des roulements avec capteur de vitesse (extrait de [47]).....	73
Figure 61. Deux méthodes de mesure disponibles chez NTN (extrait de [49]).....	73
Figure 62. Principe de fonctionnement du codeur optique (extrait de [51]).....	74
Figure 63. Roulement SKF avec capteur de position intégré, (a) vue en coupe, (b) vue d'ensemble (extrait de [47]) .....	74
Figure 64. Principe de la mesure d'angle (extrait de [47]) .....	75
Figure 65. Skidsteer A300 de Bobcat (extrait de [56]) .....	75
Figure 66. Illustration codeur optique (a) Schéma d'un réseau avec marques de référence à distances codées, (b) Divisions circulaires sur systèmes de mesure angulaire incrémentaux (extrait de [57]) ...	75
Figure 67. Classification des mesures au sein d'un roulement .....	77
Figure 68. Capteurs d'effort associés au montage du roulement.....	77
Figure 69. Mesure d'effort intégré au roulement .....	77
Figure 70. Visualisation de la déformation des bagues a) local b) global .....	77
Figure 71. Réponse d'un capteur (flèche rouge) de déformation au passage d'un élément roulant chargé.....	78
Figure 72. Chaîne de mesure d'un roulement capteur d'effort .....	78
Figure 73. Vue en coupe du capteur de température et de la transmission sans fil (extrait de [66]) ..	81
Figure 74. Capteur Schaeffler avec détection de présence d'huile (extrait de [70]) .....	81
Figure 75. Applications possibles des roulements instrumentés chez Schaeffler (extrait de [74]) .....	84
Figure 76. Application possible des roulements instrumentés chez SKF (extrait de [76]).....	84
Figure 77. Application possible des roulements instrumentés chez NTN (extrait de [77]) .....	85
Figure 78. Processus de PHM autour du roulement smart .....	86
Figure 79. Mécanismes d'endommagement et leur détection.....	87
Figure 80. Synoptique système d'un roulement intelligent.....	88
Figure 81. Méthodes d'extraction d'indicateur de dégradation .....	89
Figure 82. Architecture du roulement intelligent .....	89
Figure 83. Evolution de la RFID.....	91
Figure 84. Démonstrateur pour la surveillance autonome d'une attache moteur : installation sur banc moteur.....	104

Figure 85. Positionnement du concept sur la chaîne des Technology Readiness Level (TRL) .....	105
Figure 86. Programme de R&T autour du roulement smart .....	105
Figure 87. Principales étapes du projet CORALIE .....	107
Figure 88. Position du capteur (1) dans le système d'attache-moteur (CFM56) .....	108
Figure 89. Chaîne fonctionnelle du démonstrateur .....	109
Figure 90. Synoptique système fonctionnel du module de surveillance .....	110
Figure 91. Comptage de franchissement de seuils de déformation .....	110
Figure 92. Sollicitations mécaniques de l'attache .....	111
Figure 93. Jauge de contrainte du projet .....	111
Figure 94. Montage des capteurs .....	112
Figure 95. Zones d'instrumentation sur la bielle .....	112
Figure 96. Montage des jauges de contrainte .....	112
Figure 97. Plateforme RFID .....	113
Figure 98. Protocole RFID .....	113
Figure 99. Comparaison des protocoles radio .....	115
Figure 100. Mesure de consommation du tag RFID .....	116
Figure 101. Evolution du courant et de la puissance consommée en fonction de la tension d'alimentation lorsque le système est en veille .....	117
Figure 102. Puissance consommée en fonction de la tension en mode actif .....	118
Figure 103. Mesure de courant pendant une mesure sur le pont de jauges et une écriture en mémoire (tension d'alimentation en vert, courant en gris) .....	118
Figure 104. Profil de consommation typique du tag RFID (tension d'alimentation en vert) .....	119
Figure 105. Représentation schématique de vibration dans un avion et un hélicoptère .....	120
Figure 106. Enveloppe de vibration fournie au cahier de charges en amplitude normalisée .....	121
Figure 107. Représentation schématique des gradients thermique dans les structures de type avion et hélicoptère .....	121
Figure 108. Bielle de reprise de poussée, .....	122
Figure 109. Nacelle-moteur, vue schématique .....	122
Figure 110. Influence de la température ambiante sur le gradient de la bielle .....	123
Figure 111. Evolution de la température chaude du module en fonction de la température .....	123
Figure 112. Sources disponibles .....	124
Figure 113. Thermogénérateur intégré à la bielle .....	124
Figure 114. Exemple de réalisation récupérateur vibratoire .....	125
Figure 115. Architecture générique d'un système de récupération de l'énergie .....	126
Figure 116. Pertes sur une chaîne de conversion par thermogénération (a) et piézoélectricité (b) ..	127
Figure 117. Effet piézoélectrique direct .....	128
Figure 118. Couplage indirecte structure/transducteur piézoélectrique par oscillateur mécanique	129
Figure 119. Élément piézoélectrique soumis à une contrainte .....	130
Figure 120. Principe de la technologie Vulture (extrait de [5]) .....	132
Figure 121. Principe de la méthode de caractérisation .....	133
Figure 122. Principe de la caractérisation en température .....	133
Figure 123. (a) Tension circuit-ouvert et vitesse à l'extrémité libre en fonction de la fréquence à accélération constante (0.5g), (b) Evolution de la fréquence de résonance en fonction de la masse sismique (extrait de [5]) .....	134
Figure 124. (a) Puissance en fonction de la fréquence à accélération constante (0.5g), (b) Puissance en fonction de l'accélération à la fréquence de résonance de 140Hz .....	134
Figure 125. Tension circuit-ouvert et vitesse à l'extrémité libre en fonction de la fréquence à accélération constante (0.5g) .....	135

Figure 126. Schéma électrique équivalent au voisinage de la fréquence de résonance .....	135
Figure 127. (a) Puissance en fonction de fréquence à accélération constante (0.5g), (b) Puissance en fonction d'accélération à fréquence résonance de 140Hz .....	137
Figure 128. Module V20W avec et sans connecteur électrique .....	137
Figure 129. (a) Evolution du coefficient de couplage $k$ et de qualité $Q_m$ en fonction de la température, (b) Evolution du produit $k^2Q_m$ en fonction de la température pour le produit de chez Volture.....	138
Figure 130. Schéma bloc de la carte de conversion pour les éléments piézoélectrique .....	138
Figure 131. Schéma électronique de la carte de conversion développé par Oridao et le LGEF .....	139
Figure 132. Structure superposée de microgénérateurs piézoélectriques.....	140
Figure 133. Puissance en fonction de l'accélération pour un étage .....	140
Figure 134. (a) Puissance en fonction de l'accélération avec et sans technique SSHI pour un étage, (b) Evolution temporelle de la tension et de l'accélération avec la méthode SSHI .....	141
Figure 135. Principe de l'effet Seebeck.....	142
Figure 136. Illustration d'un générateur thermoélectrique formé de jonction p-n de semi-conducteur .....	142
Figure 137. Evolution du rendement en fonction de la température chaude et du coefficient $ZT$ pour une température froide de 25°C (a). Rendement de la conversion thermoélectrique (b). Rendement de Carnot.....	144
Figure 138. Configuration classique d'un générateur thermoélectrique.....	145
Figure 139. Schéma électrique équivalent d'un module thermoélectrique .....	146
Figure 140. Vue et propriétés du module thermoélectrique eTEG HV56 de chez Nextrem.....	147
Figure 141. Architecture du module de test .....	147
Figure 142. Principe de la mesure à l'aide d'une plaque chauffante.....	148
Figure 143. Tension en circuit ouvert en fonction du gradient thermique, mesure réalisée pour une température ambiante de 25°C .....	148
Figure 144. Données constructeur des propriétés thermoélectriques du module HV-56.....	149
Figure 145. Puissance et tension en fonction du gradient thermique pour une température ambiante de 25°C .....	150
Figure 146. Synoptique étage de conversion thermoélectrique.....	150
Figure 147. Schéma électronique de la partie conversion thermoélectrique.....	151
Figure 148. (a) Puissance en fonction du gradient thermique, (b) Photographie du module caractérisé .....	152
Figure 149. Structure du récupérateur thermoélectrique .....	153
Figure 150. Architecture du module de test .....	153
Figure 151. Chaîne de mesure puissance RF .....	154
Figure 152. Installation sur la nacelle.....	154
Figure 153. Installation et lecture avec une lectrice portable .....	155
Figure 154. Vue graphique du prototype de bielle instrumentée communicante .....	156
Figure 155. Carte de conversion du projet.....	157
Figure 156. Photographie de la presse manuelle carver.....	157
Figure 157. Photographie de la bielle instrumentée et du dispositif d'excitation mécanique.....	158
Figure 158. Photographie du l'ensemble de caractérisation .....	159
Figure 159. Validation de l'étage de récupération piézoélectrique : (a) allure temporelle de la tension en sortie du régulateur, (b) puissance en sortie de la carte de conversion (comparaison entre la technique classique et la méthode SSHI), (c) visualisation du signal échantillonné à 1 kHz, (d) visualisation de l'écriture en EPROM .....	160
Figure 160. Thermographe des modules piézoélectrique après 12 heures de fonctionnement.....	160

Figure 161. Evolution du gradient thermique et de la tension en circuit ouvert du module thermoélectrique en fonction du temps pour une température chaude de 120°C, une température froide de 80°C et une température ambiante de 25°C. ....	161
Figure 162. Evolution de la tension en circuit ouvert en fonction du gradient thermique .....	162
Figure 163. Thermographe du module thermoélectrique en régime permanent. ....	162
Figure 164. Bielle utilisée pour la caractérisation .....	163
Figure 165. Réponse du pont de jauge.....	163
Figure 166. Moteur utilisé pour les essais.....	164
Figure 167. Modules du système à vide .....	164
Figure 168. Intégration des prototypes sur le moteur .....	164
Figure 169. Instrumentation de référence : positions et type de capteurs .....	165
Figure 170. Cycle d'essais moteur .....	166
Figure 171. Interrogation RFID du système.....	166
Figure 172. Antenne du TAG lors de l'intégration.....	167
Figure 173. Réparation de l'antenne .....	168
Figure 174. Affichage valeur lectrice.....	168
Figure 175. Mesures de l'environnement thermique de la bielle.....	169
Figure 176. Puissance en sortie du microgénérateur thermoélectrique en fonction du temps.....	169
Figure 177. Mesures d'accélération et de déformation en fonction du temps .....	170
Figure 178. FFT du signal accélérométrique.....	171
Figure 179. Energie récupérable .....	172
Figure 180. Instrumentation pour les essais en vol .....	173
Figure 181. Instrumentation des essais vol.....	173
Figure 182. Mesures des essais en vol .....	174
Figure 183. FFT signal de vibration.....	175
Figure 184. Estimation des puissances récupérables.....	175
Figure 185. Bilan énergétique .....	176
Figure 186. Evolution des indices Ndm des roulements pour le secteur des moteurs d'avions .....	177
Figure 187. Principe de fonctionnement capteur de température sans fil.....	179
Figure 188. Circuit du capteur .....	180
Figure 189. Circuit secondaire sur la cage.....	180
Figure 190. Système de mesure .....	180
Figure 191. Architecture de la carte.....	181
Figure 192. Composants de la carte .....	181
Figure 193. Câblage du driver.....	182
Figure 194. DDS .....	184
Figure 195. Oscillateur à silicium.....	184
Figure 196. Coupleur .....	185
Figure 197. Circuit d'adaptation.....	187
Figure 198. Bobine au primaire .....	187
Figure 199. Module de mesure du VSWR .....	188
Figure 200. Architecture du circuit secondaire .....	188
Figure 201. Composants du capteur .....	189
Figure 202. Variation $\Delta C/C$ d'une capacité X7R .....	189
Figure 203. Capteur .....	190
Figure 204. Primaire et secondaire couplé.....	191
Figure 205. Schéma équivalent primaire et secondaire couplé.....	192
Figure 206. Coupleur .....	193

Figure 207. Simulation Matlab .....	196
Figure 208. Simulation P-Spice .....	197
Figure 209 Essai .....	198
Figure 210. Essai à 5 cm.....	198
Figure 211. Essais de validation du système .....	199
Figure 212. (a) intégration à la cage, (b) Validation de la mesure sur cage par capteur résonant .....	199
Figure 213. Résultats de mesure au banc roulement .....	200
Figure 214. Processus de CBM [22] .....	205
Figure 215. Processus automatique de CBM roulement [22] .....	206
Figure 216. Taille typique d'un écaillage [23].....	207
Figure 217. Mécanismes vibratoires dans les roulements .....	208
Figure 218. Mécanisme de transfert vibratoire .....	208
Figure 219. Schéma de la source de la vibration. a) élément roulant sur un défaut de surface ; b) Perturbation de la charge dans le temps en raison du passage du défaut (haut) et réponse fréquentielle de la perturbation de charge (en bas) ; c) réponse impulsionnelle typique dans le domaine temporel.....	209
Figure 220. Perturbation de l'effort de contact par le passage du défaut (étapes A à D) domaine temporel et fréquentiel.....	210
Figure 221. Réponses typiques dues à des défauts sur la bague extérieure, l'élément roulant et la bague intérieure, dans le cas de la bague extérieure fixe et du capteur monté sur le boîtier.....	211
Figure 222. Modèle cinématique roulement à contact oblique .....	212
Figure 223. Fonctions de transfert en fonction de la position du point de mesure .....	213
Figure 224. Influence de la fonction de transfert sur la réponse vibratoire excité par un défaut de roulement sous plusieurs vitesses de rotation .....	214
Figure 225. Accéléromètre SKF .....	215
Figure 226. Résumé sur les fréquences de vibration d'un roulement à billes (extrait de [23]).....	217
Figure 227. Nombre d'opérations élémentaires pour différents types d'algorithme d'analyse vibratoire, pour un nombre de points de 128 000.....	219
Figure 228. Représentation schématique du spectre enveloppe dans le cas de défauts sur la bague extérieure, intérieure et l'élément roulants .....	221
Figure 229. Traitement du signal pour l'obtention de l'enveloppe.....	222
Figure 230. Spectre enveloppe d'un roulement sain (en bleu) et après développement d'un défaut (en rouge) .....	222
Figure 231. Evolution du spectre enveloppe en fonction du temps a) signal brut b) signal moyenné .....	223
Figure 232. Indicateur de santé du roulement.....	223
Figure 233. Comportement thermique des roulements (extrait de [11]).....	224
Figure 234. Thermographe d'une installation industrielle (extrait de [35]) .....	225
Figure 235. Thermographe d'un roulement à 3000 tr/min, (a) fonctionnement normal, (b) problème de lubrification, (c) écaillage (extrait de [36]) .....	225
Figure 236. Projet WISD, (a) principe du projet, (b) micro-générateur développé (extrait de [79]) ..	228
Figure 237. Capteur autonome de chez Schaffler pour le projet TSS-F (extrait de [74]) .....	228
Figure 238. Système d'anti blocage des roues chez Volvo Truck (extrait de [87]).....	229
Figure 239. Générateur autoquartz (a) principe de fonctionnement, (b) éclaté de la génératrice (extrait de [89]) .....	230
Figure 240. Générateur faible coût, (a) principe de fonctionnement, (b) photographie des prototypes (extrait de [90]) .....	230

Figure 241. Télécommande autonome de chez Arveni alimenté par la technologie LGEF (extrait de [91]) .....	231
Figure 242. Interrupteur piézoélectrique de chez Algra (extrait de [92]) .....	231
Figure 243. Récupérateur d'énergie piézoélectrique à partir des mouvements de rotation humain, (a) principe de la structure, (b) photographie du démonstrateur (extrait de [93], [94]) .....	232
Figure 244. Vue schématique d'un générateur électrostatique appliqué aux roulements (extrait de [103]) .....	233
Figure 245. Moteur électrostatique de chez Shinsei (extrait de [104]) .....	233
Figure 246. Principe de conversion à l'aide d'éléments pyroélectrique. ....	235
Figure 247. Conversion à l'aide de bilame thermoélectrique réalisé par ST microélectronique et le LGEF (a) principe, (b) mise en application (extrait de [107], [108]) .....	236
Figure 248. Module thermoélectrique de chez Micropelt (extrait de [109]) .....	236
Figure 249. Micro-générateur TE-Power RING pour la récupération d'énergie sur roulement (adapté de [110]) .....	237
Figure 250. Circuit électronique de gestion de l'énergie (extrait de [111]) .....	237
Figure 251. Banc de test pour la mise en œuvre du TE-Power Ring (adapté de [110]) .....	238
Figure 252. Caractéristiques du TE-power RING, (a) puissance et tension de sortie en fonction de la température chaude pour le thermogénérateur MPG-D751, (b) température et tension en circuit ouvert en fonction de la vitesse (adapté de [110]) .....	238
Figure 253. Produit de chez NTN à base de module thermoélectrique, (a) principe du circuit de lubrification, (b) schéma de principe du système complet (extrait de [112]) .....	239
Figure 254. Temps de charge pour deux gradients de températures (extrait de [112]) .....	239
Figure 255. Structure de la récupération d'énergie sur le « housing » du roulement (extrait de [117]) .....	240
Figure 256. Principe du banc de test (adapté de [115]) .....	241
Figure 257. Processus d'extraction d'énergie d'une structure vibrante par élément piézoélectriques .....	243
Figure 258. Les deux types de générateur piézoélectrique (a) Couplage direct (b) Couplage indirect par l'intermédiaire d'un oscillateur mécanique .....	243
Figure 259. Modèle simplifié à constantes localisées. $M$ est la masse dynamique équivalente, $KE$ est la rigidité équivalente et $C$ l'amortissement équivalent. Élément piézoélectrique de capacité équivalente $C_0$ et facteur de couplage $a$ .....	244
Figure 260. Principe de la technique SSHI .....	246
Figure 261. Système de récupération standard. Synoptique et formes d'ondes résultantes. ....	247
Figure 262. Système de récupération SSHI série. Synoptique et formes d'ondes résultantes. ....	247
Figure 263. Système de récupération SSHI parallèle. Synoptique et formes d'ondes résultantes. ....	247
Figure 264. Comparaison des différentes méthodes. ....	248
Figure 265. Élément piézoélectrique longitudinal soumis à une contrainte uni-axiale $T_3$ . ....	250
Figure 266. Densité d'énergie $W_1$ en fonction de la contrainte uni-axiale $T_3$ .....	250
Figure 267. Implémentation possible de micro-générateur au sein d'un roulement .....	251
Figure 268. Configuration de micro-générateur monté sur housing (a) en couplage sismique, (b) en couplage direct .....	252
Figure 269. Exemple de micro-générateur sismique développé sur le projet EPICE .....	252
Figure 270. Exemple de spectre de vibration d'une machine tournante (extrait de [5]) .....	252
Figure 271. Gamme de vibration typique de machine tournante (extrait de [5]) .....	253
Figure 272. Architecture de micro-générateur combinant élément piézoélectrique et aimant (extrait de [6]) .....	253
Figure 273. Principe de fonctionnement de l'architecture proposé par Brusa (extrait de [6]) .....	254

Figure 274. Principe de fonctionnement de l'architecture à l'aide d'ergots .....	254
Figure 275. Récupérateur d'énergie piézoélectrique à partir des mouvements de rotation humains, (a) principe de la structure, (b) photographie du prototype (extrait de [7], [8]).....	255
Figure 276. Architecture de récupération d'énergie sur les mouvements de rotation (a) sur l'axe, (b) sur le roulement. ....	255
Figure 277. Principe de fonctionnement montre Autoquartz (extrait de [11]) .....	256
Figure 278. Principe de fonctionnement du micro-générateur piézoélectrique à masse oscillante (extrait de [9], [10]) .....	256
Figure 279. Preuves de concept de récupérateurs d'énergie sur structure tournante .....	260
Figure 280. Principe du microgénérateur à roue polaire. ....	262
Figure 281. Principe du microgénérateur à roue à matériau magnétique alterné.....	263
Figure 282. Principe du microgénérateur à variation de flux par fermeture d'entrefer à aimant : (a) par translation ; (b) par rotation. ....	263
Figure 283. Tension en sortie d'une génératrice électromagnétique.....	264
Figure 284. Intégration des microgénérateurs dans les systèmes en rotation : (a) roue polaire (sur roulement) ; (b) fermeture d'entrefer. ....	264
Figure 285. Schéma du concept et formes d'ondes associées.....	265
Figure 286. Dispositif et amélioration du récupérateur par ajout de la technique non linéaire .....	265
Figure 287. Générateur tournant utilisant la piézoélectricité.....	266
Figure 288. Schéma bloc récupérateur piézoélectrique en hélice .....	266
Figure 289. Diagramme interface du système .....	267
Figure 290. Modèle Simulink récupérateur piézoélectrique en hélice .....	267
Figure 291. Tension en sortie du modèle en circuit ouvert .....	268
Figure 292. Caractérisation expérimentale du générateur en hélice .....	269
Figure 293. Récupérateur piézoélectrique utilisant un aimant pour la déformation .....	269
Figure 294. Caractérisation en circuit ouvert.....	270
Figure 295. Tension en circuit ouvert, influence de la force d'attraction magnétique.....	270
Figure 296. Caractérisation en circuit ouvert pour un ou deux aimants .....	271



---

*Table des grandeurs et paramètres physique*

---

Symbole	Signification
Grandeurs et paramètres mécaniques	
F	Force appliquée au système
$F_M$	Amplitude de la force appliquée au système
S	Déformation
T	Contrainte
u	Déplacement
$u_M$	Amplitude du déplacement
C	Coefficient d'amortissement structural équivalent du système masse-ressort-amortisseur
$K_D$	Raideur équivalente en circuit ouvert du système masse-ressort-amortisseur
$K_E$	Raideur équivalente en court-circuit du système masse-ressort-amortisseur
M	Masse dynamique équivalente du système masse-ressort-amortisseur
S	Souplesse élastique
$\omega_D/f_D$	Pulsation/fréquence de résonance mécanique en circuit ouvert
$\omega_E/f_E$	Pulsation/fréquence de résonance mécanique en court-circuit
$\omega_n$	Pulsation naturelle
$\omega_{res}/f_{res}$	Pulsation/fréquence de résonance mécanique
$\omega_0/f_0$	Pulsation/fréquence de résonance mécanique
$Q_N$	Facteur de qualité mécanique
$K_n, K_p$	Conductances thermiques des matériaux n et p
$a_i$	Section du matériau thermoélectrique i
$\rho_i$	Conductivité thermique du matériau thermoélectrique i
$T_i$	Température du matériau thermoélectrique i
$\lambda_i$	Conductivité thermique du matériau thermoélectrique i
Grandeurs et paramètres électriques	
$R_n, R_p, R_c$	Résistances électriques des éléments thermoélectriques n, p et la résistance de charge du système

Symbole	Signification
$S_n, S_p$	Coefficients Seebeck des éléments n et p
$\sigma_i$	Conductivité électrique du matériau thermoélectrique i
$S_i$	Coefficient de Seebeck du matériau thermoélectrique i
D	Induction électrique / rapport cyclique
E	Champ électrique
I	Courant sortant de l'insert piézoélectrique
$V_{pz}$	Tension piézoélectrique
$V_D$	Tension de seuil d'une diode
$V_{DC}$	Tension sur la résistance de charge
$V_m$	Tension piézoélectrique à la fin de l'inversion
$V_M$	Tension piézoélectrique maximale
$V_{rect}$	Tension en sortie du pont redresseur
$V_{bat}$	Tension en sortie de l'adaptateur d'impédance
$i_M$	Courant du MOS de l'adaptateur d'impédance
$\langle i_m \rangle$	Courant moyen du MOS de l'adaptateur d'impédance
$i_{rect}$	Courant de l'entrée de l'adaptateur d'impédance
$\langle i_{rect} \rangle$	Courant moyen de l'entrée de l'adaptateur d'impédance
$i_L$	Courant d'impédance de l'adaptateur d'impédance
$i_{bat}$	Courant de la sortie de l'adaptateur d'impédance
$\gamma$	Facteur d'inversion
$\varepsilon$	Permittivité
$\omega_{SW}/f_{SW}$	Pulsation/fréquence/
$T_{SW}$	Période de commutation de l'adaptateur d'impédance
$C_0$	Capacité de stockage/lissage
L	Inductance d'inversion/ Inductance du buck-boost
$Q_i$	Facteur de qualité électrique
R	Résistance du circuit d'inversion
$R_L$	Résistance de charge
$R_{in}$	Résistance d'entrée de l'adaptateur d'impédance

Symbole	Signification
$t_i$	Temps d'inversion de la tension
Grandeurs et paramètres électromécaniques	
$\alpha/Alpha$	Facteur de force
d	Coefficient de charge (déformation/champ électrique)
k	Coefficient de couplage
Grandeurs énergétiques	
P	Puissance
$P_{lim}$	Puissance extraite/récupérée limite dans le cas de la récupération à force d'amplitude constante
$P_{standard}$	Puissance récupérée avec la technique classique à force d'amplitude constante
$P_{SSHIp}$	Puissance récupérée avec la technique SSHI parallèle à force d'amplitude constante
$P_{SSHIs}$	Puissance récupérée avec la technique SSHI série à force d'amplitude constante
W	Énergie
Autres	
$\eta$	Rendement
$[var]_{ref}$	Variable de référence pris à partir d'un article
$a[var]_{ref}$	Coefficient de proportionnalité de la variable par rapport à $\omega_{res}$

## Motivations à l'obtention d'un diplôme de doctorat par validation des acquis de l'expérience

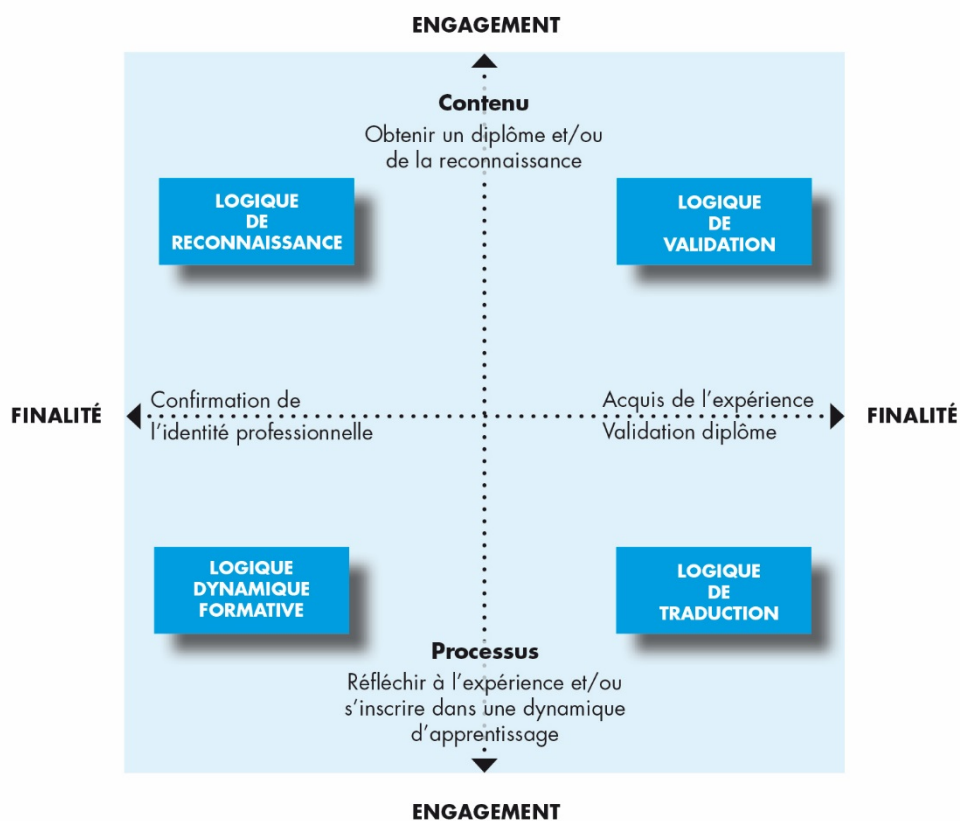


Figure 1. Espace transitionnel de la VAE [RFS 1]

*'Il n'est désir plus naturel que le désir de connaissance. Nous essayons tous les moyens qui nous y peuvent mener. Quand la raison nous manque, nous y employons l'expérience qui est un moyen plus faible et moins digne ; mais la vérité est chose si grande, que nous ne devons dédaigner aucune entremise qui nous y conduise. Essais III, XIII : De l'expérience – Montaigne*

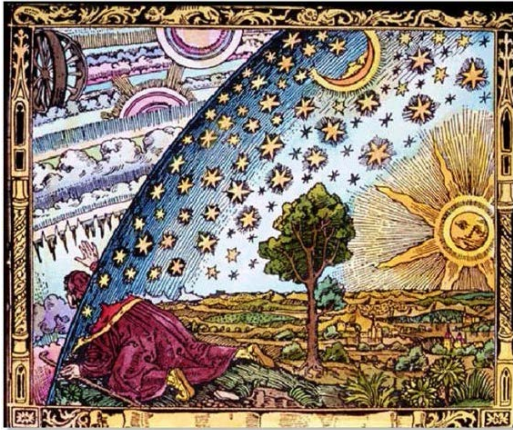


Figure 2. Du monde clos à l'univers infini - Alexandre Koyré

## Introduction

Cette partie a pour objectif d'attester de la cohérence entre mes dernières années d'expérience au sein de la société SKF-Aerospace et ma démarche d'obtention d'un diplôme de doctorat par validations des acquis de l'expérience (VAE).

La volonté d'entreprendre cette démarche a commencé en 2010 par une collaboration de recherche avec le LGEF autour de la récupération de l'énergie dans une application aéronautique. La possibilité de travailler avec des enseignants-chercheur motivés, en équipe, m'a permis d'appréhender le potentiel d'innovation au sein des laboratoires.

La démarche de recherche universitaire est fortement complémentaire des activités de recherche et développement en entreprise car elle permet :

- De développer le champ de connaissances du domaine et de démontrer sa validité et son applicabilité par l'expérimentation, réduisant fortement les risques techniques lors du transfert à l'Industriel pour le développement de l'application pour mise sur le marché,
- D'accélérer la vérification de concept par une mise en œuvre expérimentale autour d'un cadre applicatif proposé par l'industriel,
- Une meilleure définition des problématiques de l'industriel, associé à une identification plus immédiate des verrous technologiques nécessitant des actions de recherche.

Ce contexte m'a naturellement amené à proposer à mon employeur d'engager une démarche d'obtention d'un doctorat par VAE lors de mon entretien de professionnalisation en 2016. Les sections suivantes présentent ainsi le contexte de management de l'innovation en entreprise, mon rôle au sein de SKF-Aerospace ainsi que mes dernières années d'expérience et réalisations. Ensuite, seront détaillés la thématique centrale de recherche, le Prognostic Health Management autonome (PHM) autour des roulements à billes et sa contrepartie le roulement smart. Ce chapitre se termine par la présentation de mes activités pédagogiques et la liste de mes publications.

## 1. Le management de l'innovation dans les entreprises

Pour les entreprises historiques, grandes et reconnues de tout domaine, le renouvellement de l'offre avec des innovations majeures est presque toujours une question vitale. Cela remet souvent en question la préservation des parts de marché ou les positions de leader.

La différenciation, bien que la clé pour gagner face à la concurrence, est devenue une véritable lutte pour de nombreuses entreprises, pour des raisons qui peuvent être technologiques, organisationnelles, culturelles ou autres. Ceci est particulièrement vrai lorsque les produits ou les technologies qui ont fait le succès d'une entreprise deviennent accessibles par la concurrence.

L'innovation est plus que jamais le moteur de la croissance dans les pays développés. Mais les problèmes traditionnels de son management n'ont rien perdu de leur actualité. Ce qui a changé, c'est sa place dans l'entreprise : au-delà des seuls technologues, c'est l'ensemble des fonctions de l'entreprise qu'elle mobilise. C'est leur capacité à dialoguer et à travailler en réseau, en interne comme à l'externe, qui est désormais le gage d'une compétitivité durable.

Dans ce contexte, les départements de développement de produits liés à des lignes de produits spécifiques -- c'est le cas dans plusieurs sociétés dans lesquelles les unités d'affaires ont leur propre service de développement comme SKF-AEROSPACE-- ont certainement un rôle clé à jouer au sein de leur organisation. Leur capacité à renouveler les produits les rend critique pour la durabilité de l'entreprise.

La manière dont un service de développement parvient à faire ressortir des innovations pour son produit est étroitement lié à son approche de l'innovation. Pour des produits matures tels que des roulements à billes, cette approche doit être très pragmatique (Figure 3).

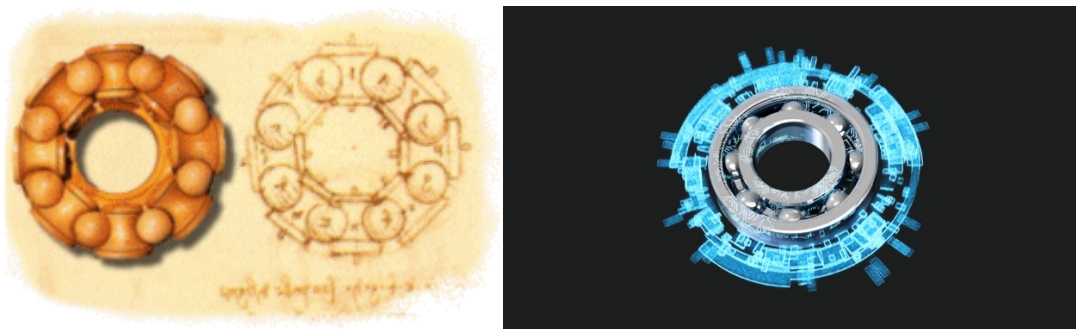


Figure 3. Schéma et réalisation en bois d'un roulement à bille par Léonard de Vinci (15e) / SKF-insight roulement intelligent

Acteurs majeurs de l'innovation et piliers de la compétitivité des produits, les ingénieurs au sein du service doivent être capables de développer des idées originales et de les mettre en œuvre sur le marché. Or la course effrénée à l'innovation impose que la recherche fondamentale soit réellement au cœur des activités de développement.

Les économies de la connaissance sont désormais fondées sur l'innovation et les ruptures technologiques. L'émergence d'idées nouvelles est un processus décentralisé, collaboratif et instantané. Elles ne viennent plus « d'en haut », ni d'une seule personne ou d'une seule entreprise. Les entreprises qui réussissent sont celles qui sont parvenues à développer la compétence de leurs employés, et donc de leurs ingénieurs, à innover et à favoriser les démarches collaboratives. Cette compétence est non seulement vitale pour la survie des entreprises mais elle présente également l'intérêt de ne pas être périssable, contrairement à d'autres formations 'hyper-spécialisantes'.

La nature du métier de l'ingénieur en fait un acteur central de l'innovation, à condition d'être formé pour innover, développer et mettre en œuvre des idées au cours d'un processus créatif collaboratif qu'il est capable de maîtriser. Mettre en pratique des idées est à la fois socialement efficace et personnellement épanouissant. Le doctorat permet d'acquérir la compétence 'recherche' en l'appliquant à des domaines déterminants pour une carrière dans l'industrie.

La possibilité de travailler au sein d'un laboratoire, en équipe, constitue également un atout important. Elle favorise un échange fort entre le monde de l'entreprise et celui de la recherche, permettant d'établir le chaînon manquant entre sciences et technologies. Il ne s'agit pas ici pour l'industriel de contrôler la recherche du laboratoire mais de faire émerger l'innovation par la rencontre de problématiques industrielles avec la recherche permettant d'identifier les sauts technologiques nécessaires pour une mise sur le marché maîtrisée. C'est cette philosophie qui a été mise en œuvre dans le cadre de mes travaux de recherche.

L'Industriel peut par la réalisation avec le Laboratoire d'une preuve de concept applicative ainsi fournir un cadre permettant par l'expérimentation d'accélérer le transfert de la recherche vers l'application. La mise en pratique et l'expérimentation restent également une excellente formation permettant d'affiner la connaissance.

## 2. Activités et rôle au sein du service développement produit de SKF-AEROSPACE

Mon activité est centrée sur le développement d'un microsystème intégré à un roulement à billes à des fins d'autodiagnostic, appelé roulement intelligent ou « smart bearing ».

Les microsystèmes autonomes en énergie sont une nouvelle catégorie de systèmes permettant des mesures intelligentes et un transfert de données d'une manière distribuée, sans aucune aide externe. Cette approche se situe dans le prolongement direct de la miniaturisation des microsystèmes. Cependant, l'importante diversité des capteurs, les récents développements dans le domaine des nanotechnologies et les avancées techniques dans la récupération d'énergie, ont clairement démontré que l'intégration hétérogène des micros et nano systèmes est la clé pour réussir à obtenir des systèmes autonomes en énergie.

Les futures applications pour des systèmes autonomes en énergie en aéronautique peuvent être subdivisées en trois groupes principaux :

- Aide à la maintenance,
- Aide au personnel navigant,
- Instrumentation d'essais lors des essais d'intégration au système ou essais en vol.

L'aide à la maintenance concerne l'amélioration de l'efficacité de toutes les activités de maintenance tout au long de la vie de l'avion. De nos jours, l'entretien d'un avion est programmé et réalisé selon un protocole précis.

Les systèmes autonomes en énergie pour l'aide à la maintenance peuvent être doublement utiles : un premier pas consisterait à fournir un outil pour une meilleure efficacité des activités de maintenance, et un second pourrait être la transition d'une maintenance programmée à une maintenance prédictive. La finalité est à la fois d'augmenter le temps de service de l'avion et de diminuer les coûts de maintenance.

L'apport de tels systèmes sur la maintenance est la possibilité de réaliser des mesures autonomes dans des zones distantes ou inaccessibles sans avoir à démonter le composant. La mesure de données de contexte ou de paramètres de santé permettent également de rendre possible la maintenance prédictive (Figure 4).

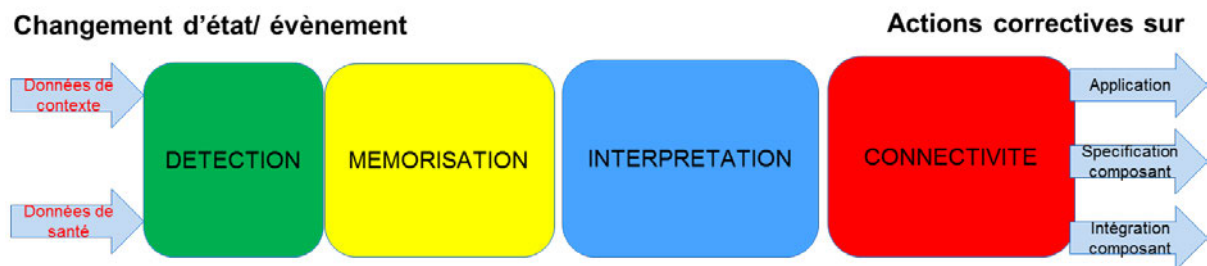


Figure 4. Schéma fonctionnel pour un système de surveillance de santé

L'application de la mesure autonome pour l'aide au personnel naviguant est utile pour soulager le personnel des compagnies aériennes de charges de travail qui pourraient être ainsi automatisées.

Enfin un autre objectif des systèmes autonomes en énergie pourrait être l'instrumentation des composants lors des essais d'intégration au système ou lors des essais en vol. Ce domaine d'application nécessite des capteurs flexibles qui varient considérablement en quantité et en type de mesure.

Ces systèmes nécessitent d'intégrer plusieurs technologies présentées dans le synoptique suivant (Figure 5).

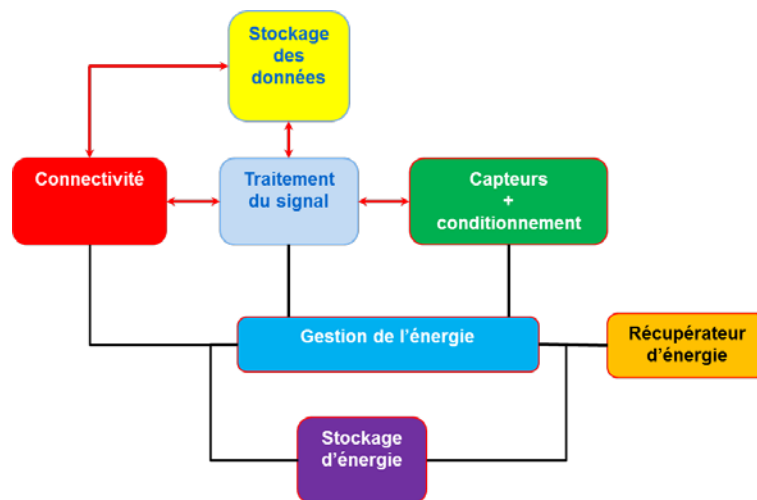


Figure 5. Architecture du microsysteme autonome de surveillance

Les besoins en énergie de tels systèmes dépendent des exigences de l'application. Ainsi les technologies de mesure doivent être précises et faiblement intrusives. La fonction de connectivité doit permettre de communiquer avec des utilisateurs ou pousser les données vers le système d'avionique de l'avion. En cas d'utilisation d'un protocole radio, ce dernier doit être basse consommation et d'avoir une portée maximale dans un environnement fermé comportant des masses métalliques. Ces systèmes doivent de plus être sans maintenance (10 ans), et très fiables. Enfin, les systèmes doivent être modulaires, évolutifs, reconfigurables et faciles à installer.

L'avantage d'une approche modulaire dans la conception permet de répondre aux multiples tâches de mesure, d'adapter le système aux besoins des applications, d'identifier les performances requises et développer la maturité des composants du système avant son intégration dans l'application.



Les travaux de développement autour du roulement intelligent ont démarré lors de la sélection de SKF-AEROSPACE pour un projet de démonstration technologique d'un système de mesure de charge autonome, capable de communiquer sans fil, intégré à une attache de moteur d'avion. Ce projet a été proposé par SAFRAN Aircraft Engine dans le cadre de la plateforme de projet EPICE, visant à développer des démonstrateurs technologiques autour du propulseur du futur. Le but du projet vise à surveiller les niveaux de charge vus par l'attache du moteur afin de détecter son niveau de chargement en utilisation, ainsi que d'éventuelles surcharges consécutives à des atterrissages durs pouvant donner lieu à de l'endommagement.

Ce projet de démonstrateur technologique d'une durée de 5 ans a été l'occasion de mener des travaux de recherche sur le système et ces constituants avec une validation dans l'environnement de l'application, sur banc moteur ainsi que des essais en vol (Figure 6).

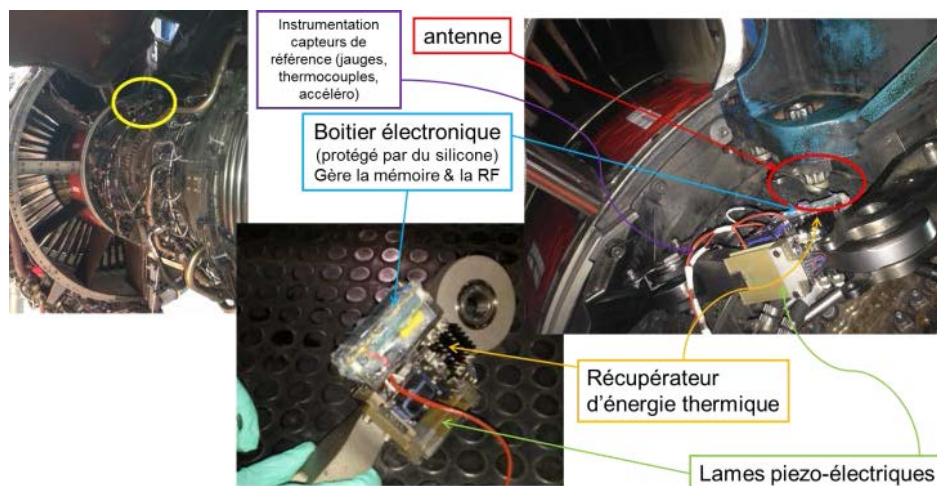


Figure 6. Démonstrateur technologique pour surveillance d'attache de moteur

Les modules technologiques ont été développés pour la réalisation du démonstrateur du projet, mais aussi pour la réalisation d'un roulement intelligent capable d'autodiagnostic. Les constituants nécessaires au système sont exactement les mêmes pour ces deux applications, le projet d'attache ayant permis d'assurer l'identification des technologies, et leur maturation en environnement extrême.

L'ensemble des travaux ont les objectifs suivants :

Objectifs	Maturité	Validation
Identification et développement des technologies clés : capteurs, génération, gestion et stockage de l'énergie, communication sans fil, traitement de l'information	TRL3 à TRL6	Réalisation de preuves de concept, validation par rapport à une technologie de référence sur banc d'essais composant
Développer un microsystème embarqué pour de la surveillance de santé de composants mécaniques	TRL3 à TRL6	Essais de validation d'un démonstrateur pour attache validé à 150°C, capable de produire son énergie par récupération vibratoire et thermique
Transferts technologiques du démonstrateur d'attache vers le roulement intelligent	TRL3 à TRL6	Identification et caractérisation des concepts applicables aux machines tournantes

Au sein du service SKF, j'assure le rôle de Responsable Programme avec les missions suivantes :

- Constituer un portefeuille de projets dans des programmes de développement technologique (capteurs, mesure, système embarqué).
- Fournir une perspective de programme, permettant de fédérer les acteurs SKF et les partenaires externes autour des besoins de développement de la Business Unit et de ses clients, et de développer les sources de financement.
- Identifier et gérer les dépendances inter-projets, fournir une vision adaptée des risques et des opportunités, des points durs techniques, des besoins et de la conception des solutions pour les gérer efficacement.

Dans ce cadre, j'ai choisi de renforcer ma maîtrise de la gestion de programme (environnement, acteurs, organisation) couplée à de l'expertise technique sur la surveillance de santé et la mécatronique technique exploitables dans divers domaines par l'obtention d'un diplôme de doctorat par validation des acquis de l'expérience. Mon savoir-faire et mon niveau d'expertise sont renforcés par mes expériences antérieures au sein de SKF (commande de vol, actionneur, surveillance de santé).

En particulier, j'ai fait le choix d'une démarche d'obtention d'un diplôme de doctorat par validation des acquis de l'expérience afin de pouvoir :

- Continuer à développer les aspects de mon métier (la maintenance prédictive des composants mécanique, la mécatronique) et valoriser mes acquis par l'expérience en réalisant une synthèse des différents travaux réalisés sur mes dernières années au sein de SKF-AEROSPACE.
- Développer mon expertise métier par l'obtention du diplôme de doctorat.
- Identifier les problématiques autour de la maintenance prédictive dans le secteur aéronautique et ainsi sauter le pas de l'innovation autour du roulement smart par une démarche unique décrite dans le présent mémoire.
- Valoriser mon savoir-faire de transfert du laboratoire à l'application par le biais de la réalisation de preuves de concept.
- Développer ma capacité à formuler les besoins de sauts technologiques sur les briques nécessaires à la réalisation d'un roulement smart, à partir desquels les laboratoires pourront proposer des innovations ou identifier les sauts nécessaires par rapport à l'état de l'art actuel.
- Faire reconnaître mes années de pratique

Après avoir « trouvé la bonne idée », la réussite d'une innovation dépend de l'envie et de la capacité du détenteur de cette idée à la vendre et à entreprendre autour d'elle. Parmi tous les diplômes portés par les universités et autres établissements de l'enseignement supérieur, le doctorat est emblématique par sa capacité à porter au plus haut le lien entre formation et recherche. La rédaction du mémoire me permet de mettre en lumière les compétences, la méthodologie de travail, les capacités à conceptualiser, l'aisance rédactionnelle sur mes années de travaux avec le monde de la recherche.

### 3. Curriculum vitae

#### ETAT CIVIL

Nom patronymique : HEBRARD Prénom 1 : YOANN  
Nom d'usage ou marital : ..... Prénom 2 : FERNAND  
Date de naissance : 24 MAI 1976 Commune de naissance NICE  
Département ou Pays de naissance (Voir rubrique Pays de naissance) 06 (ALPES-MARITIME)  
Sexe  Masculin  Féminin NATIONALITE FRANCAISE

#### SITUATION FAMILIALE

1 - Seul(e) sans enfant  2 - En couple sans enfant  3 - Seul(e) avec enfant(s)  
 4 - En couple avec enfant(s)

#### SITUATION MILITAIRE

Exempté de 18 ans) en règle  Service accompli  Sans objet  Recensé (moins de 18 ans) en règle  
 APD (plus de 18 ans) en règle  En Attente = non en règle

#### ADRESSE PROFESSIONNELLE

Organisme : SKF-AEROSPACE  
Laboratoire, Département, Service : Technologie et développement produit  
Numéro - Rue - Bâtiment –etc : 22 Rue BRILLAT SAVARIN  
Code Postal 26958 Commune VALENCE  
☎ : 04.28.08.00.30 ✉ yoann.hebrard@skf.com.....

#### CURRICULUM-VITAE

##### Compétences - Clés

Technique	Compétences en mathématiques et en mécanique Compréhension et application des normes aéronautiques (DO254/178/160/ARP) Compétences en ingénierie des systèmes (commandes de vol) Compétences en conception mécanique Compétences en mécatronique (actionneurs/capteurs/traitement du signal/récupération d'énergie)
Communication en français	Organisation et animation de réunions

	Rédaction de modèles de document Participation à des groupes de travail interprofessionnel (AFIS/PMI/ARTEMA)
Communication en anglais	Participation à des groupes de travail européens Pilotage de projet avec un client international (Brésil)
Projet	Gestion de projet et d'équipes  Planification, suivi budget études et réalisation. Management des activités d'approvisionnement, sourcing produits et services techniques

### Expérience professionnelle

Depuis 2011	Responsable programme au sein du département Business & développement produit <ul style="list-style-type: none"> <li>• Projet EPICE : capteur autonome de surveillance attache moteur (SNECMA)</li> <li>• Projet NEXGED : roulement capteur porte du futur (LATECOERE)</li> <li>• Actuation 2015 : <b>projet Européen</b> composants clés pour actionneur électromécanique de commande de vol (UTAS)</li> <li>• Projet INTEGER : surveillance roulement boîte de transmission principale d'hélicoptère</li> <li>• Management de portefeuille de projets</li> <li>• Pilotage équipes transversales</li> </ul>
2006-2011 :	Chef de projet au sein de la MU Fly-by-Wire <ul style="list-style-type: none"> <li>• Projet COVADIS : actionneur électromécanique de commande de vol (AIRBUS)</li> <li>• Projet RPA : commande de vol électrique programme LEGACY (EMBRAER)</li> </ul>
2003-2006 :	Chef de projet à la Direction de la Recherche et du développement industriel (GILSON) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement et conception d'une ligne de produit pipettes</li> <li>• Management d'une équipe projet transversale</li> </ul>
1999-2003 :	Ingénieur conception mécanique à la division défense et sécurité (SAGEM) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement et conception imageurs thermiques</li> <li>• Pilotage équipe de conception</li> </ul>

### Formations (initiale et professionnelle)

1999 :	Ingénieur de l'École CENTRALE de LILLE
	<i>Généraliste avec orientation mécanique des solides et des fluides</i>

### Compétences linguistiques et informatiques

Anglais :	Courant
-----------	---------

Allemand :	Lu/écrit
Portugais :	Notions

Informatique :	Suite bureautique, logiciels métier (MS Project), Matlab-Simulink, CREO, MINITAB, PSPICE, EAGLE
----------------	---

### Autres activités et centres d'intérêt (Hobbies)

Loisirs :	Lecture, nouvelles technologies, randonnées
-----------	---

## EXPERIENCES SALARIEES

<b>Dates de début et de fin : depuis 10/2006, toujours en poste</b>	<b>Intitulé du poste et niveau de responsabilité : ingénieur étude</b>	<b>Entreprise (Nom, effectif, situation géo) – Domaine d'activité : SKF-AEROSPACE, Rhône-Alpes, Aéronautique</b>
% du temps de travail accordé à la mission 1  80%	Mission 1 : <i>Réalisation de projet de maturation de technologies dans le cadre de la mécanique intelligente</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyser les besoins fonctionnels produits/application vs technologies</li> <li>• Rédaction de cahier des charges systèmes, modules électroniques</li> <li>• Réaliser des synthèses d'état de l'art</li> <li>• Modélisation de phénomènes dynamique sous Matlab Simulink</li> <li>• Modélisation de circuit sous LT Spice</li> <li>• Rédaction de rapports (analyse technique, rapport de validation, note technique, publication)</li> <li>• Modélisation et simulation du comportement électromécanique</li> <li>• Réalisation de preuves de concept et caractérisation.</li> <li>• Gestion de projet</li> <li>• Etablissement rapport d'analyse d'essais</li> <li>• Réalisation d'instrumentation de banc d'essai (température, vitesse, force, vibration...)</li> </ul>	
% du temps de travail accordé à la mission 2 20%	Mission 2 : <i>Participation à un projet de recherche ANR (BESTMEMS)</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rédaction du cahier des charges pour le démonstrateur technique mettant en œuvre les technologies</li> <li>• Participation au comité de pilotage</li> </ul>	
% du temps de travail accordé à la mission 2 10%	Mission 3 : <i>établissement de la feuille de route des technologies</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identification des jalons de validations</li> <li>• Définition des critères de validation</li> <li>• Rapport d'avancement maturité technologique (passage de TRL)</li> </ul>	

<b>Dates de début et de fin : depuis 2014</b>	<b>Intitulé du poste et niveau de responsabilité : Vacataire</b>	<b>Entreprise (Nom, effectif, situation géo) – Domaine d'activité : INSA</b>
% du temps de travail accordé à la mission 1 100	Mission 1 : <i>intervention en option Génie électrique, Insa Lyon, dernière année</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Séminaire surveillance de santé des machines et des roulements</li> </ul>	

<b>Dates de début et de fin : depuis 2016</b>	<b>Intitulé du poste et niveau de responsabilité : expert indépendant pour la commission Européenne, Cleansky, coordinateur projets de recherche européen</b>	<b>Entreprise (Nom, effectif, situation géo) – Domaine d'activité :</b>
% du temps de travail accordé à la mission 1  100	<p>Mission 1 : Expert indépendant pour l'évaluation d'appel à projet Cleansky 2 (H2020-CS2-CFP03-2016-01)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Evaluation des offres suite à l'appel à projet, rapporteur pour la réunion de consensus du comité d'expert</li> </ul> <p>Mission 2 : Coordinateur projets Européen Cleansky 2 : Développement de vis à billes et vis à rouleaux pour les actionneurs électromécaniques de commande de vol, projet ACTUATION 2015</p> <p>Réponses à appels à projets Cleansky 2</p>	

<b>Dates de début et de fin : depuis 2010</b>	<b>Intitulé du poste et niveau de responsabilité : Expertise</b>	<b>Entreprise (Nom, effectif, situation géo) – Domaine d'activité : SKF</b>
% du temps de travail accordé à la mission 1  100	<p>Mission 1 : Encadrement d'étudiant niveau Master</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Encadrement d'élèves ingénieurs en fin d'année (stage long) pour diverses écoles (Ensieg, EMMB, UTBM, Grenoble-INP...)</li> </ul> <p>Mission 2 : Invité au jury de Thèse de Folly ABEVI 'Développement d'un outil d'assistance pour le pré dimensionnement d'une vis à rouleaux satellites soumise à des sollicitations complexes', 2013</p> <p>Mission 3 : Représentant SKF-France au syndicat de la mécatronique (ARTEMA)</p> <p>Mission 4 : Encadrement de projets industriels à l'ESISAR (Grenoble-INP)</p>	

#### 4. Vue d'ensemble des activités

Ma formation initiale est un diplôme d'ingénieur obtenu au sein de l'Ecole Centrale de Lille (promotion 1999). Le déroulement global de ma carrière, incluant les domaines de recherche, responsabilités (dont notamment les projets), encadrement et les enseignements, est représenté en Figure 8.

Mon expérience de la pratique de recherche a commencé par le suivi d'un contrat de recherche entre SKF-Aerospace et le LGEF à partir de 2010 encore en cours. Ce contrat de recherche porte sur les thématiques suivantes :

- Technologies autour du roulement intelligent,
- Récupération d'énergie,
- Matériaux avancés.

Les travaux sont menés autour de la réalisation d'une preuve de concept de roulement intelligent visant une application aéronautique.

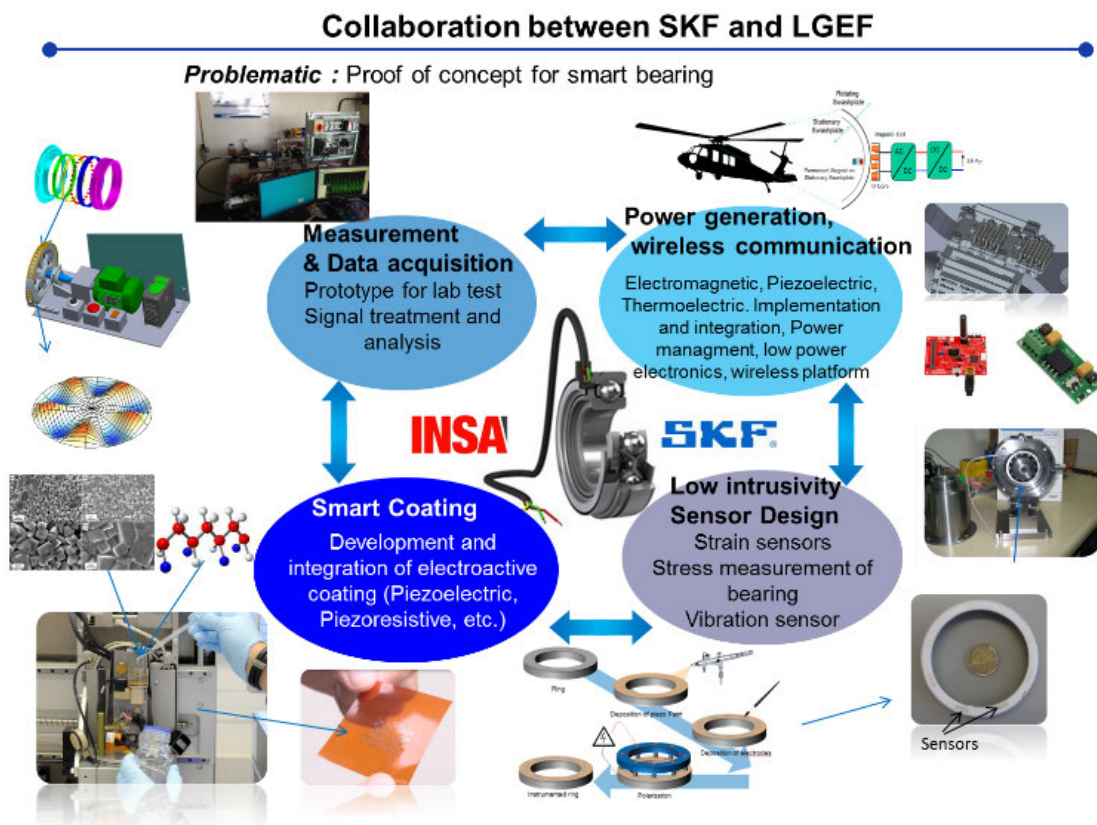


Figure 7. Axes de collaboration INSA-LGEF et SKF-AEROSPACE

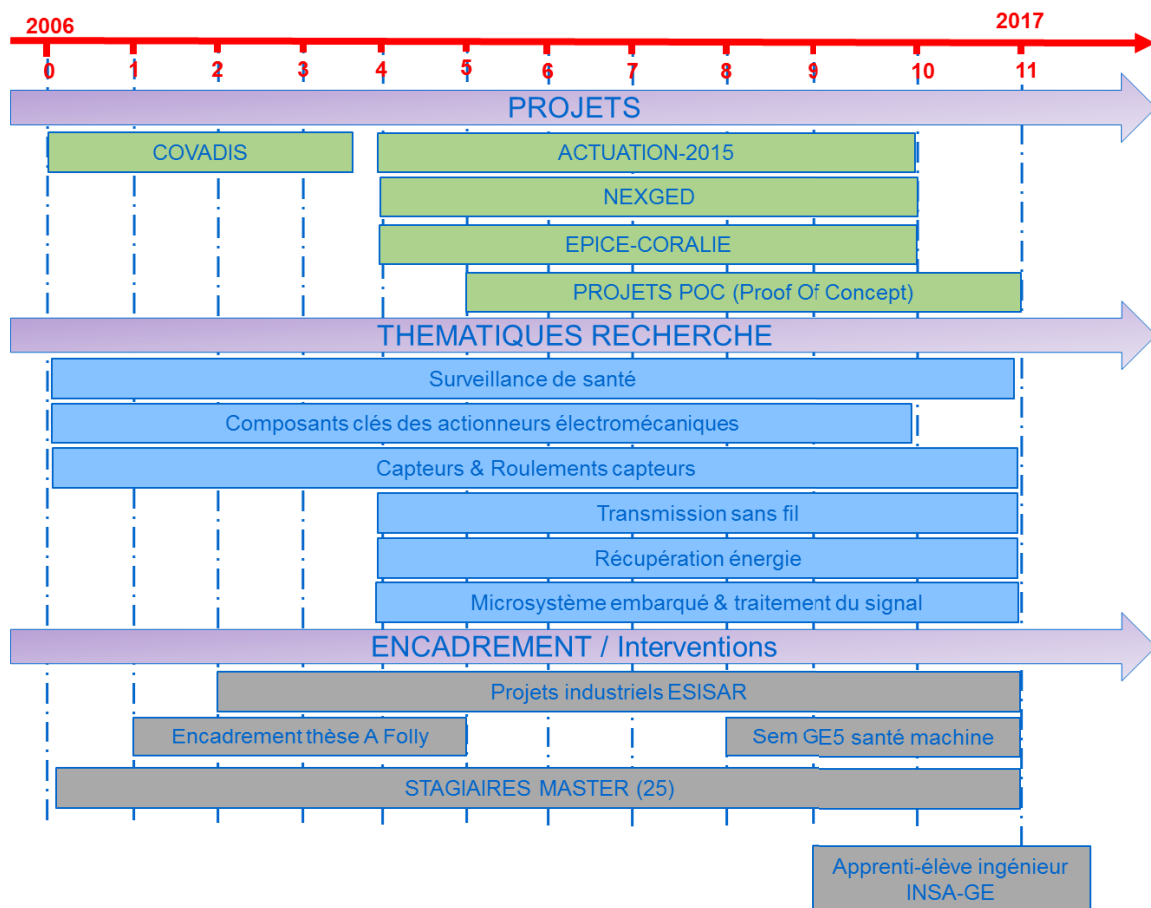


Figure 8. Déroulé de carrière vue générale

La thématique générale de mon domaine de recherche est la surveillance de santé des composants mécaniques au sein des transmissions mécaniques. Cette thématique nécessite également de réaliser des activités sur les briques technologiques du roulement intelligent, ce qui explique l'extension à la récupération d'énergie, les capteurs et leur intégration aux roulements, la transmission sans fil et les microsystèmes embarqués, et enfin le traitement du signal. Ces briques ont été mises en œuvre autour de projets de démonstrateurs technologiques ou de preuves de concept.



## 5. Présentation des projets

Sur l'ensemble de ces projets, j'ai assuré la coordination des différents partenaires avec une responsabilité sur les aspects techniques, coûts et délais.

### 5.1. COVADIS (2006-2009)

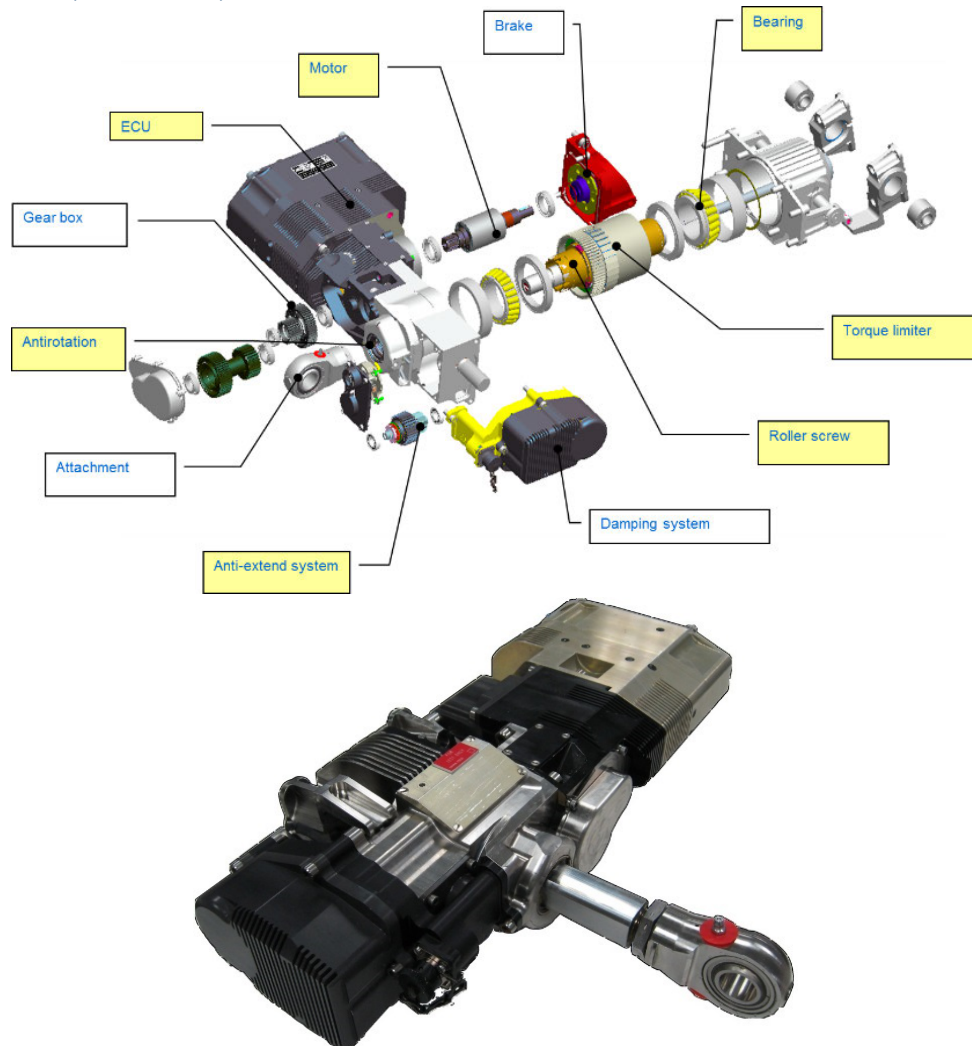


Figure 9. Covadis-démonstrateur actionneur de spoiler

Lancé en 2007, le projet Covadis (COMmande de Vol avec Distribution de l'Intelligence et intégration du Système) avait pour objectif de faire voler un EMA (EMA pour Electro Mechanical Actuator) linéaire à électronique intégrée et de démontrer son niveau de maturité TRL6. SKF-AEROSPACE a développé la version Spoiler qui a été évaluée sur le banc d'essais Iron Bird au sein du laboratoire d'AIRBUS en 2010.

Il s'agissait de démontrer la faisabilité d'un actuateur électromécanique pouvant atteindre les niveaux de performances de l'hydraulique avec les critères techniques suivants :

- 4 à 5 KW / 5 tonnes de poussée – utilisation dynamique ponctuelle ou sous charge continue,
- 30000 h de durée de vie avec une maintenance limitée.

Incluant les fonctions secondaires indispensables :

- Sécurité – protection de la structure avion contre les sur-efforts,

- Anti extension – blocage en position neutre en cas de perte de fonction,
- Transparence vis à vis des actionneurs redondants (lois d’amortissement, inertie limitée, etc.)

Avec un taux de fiabilité acceptable :

- 10e-9 sur les cas critiques,
- Pas de cas de blocage,
- Fonctionnement « fail-safe ».

L’architecture avion étant orientée sur l’hydraulique, un point particulièrement critique est intrinsèque à la technologie électromécanique :

- Inertie importante liée aux machines tournantes (moteur, engrenage, etc.), inexistante en hydraulique,
- Asservissement en position/vitesse, et non en force.

Les travaux et essais réalisés ont permis de converger sur une définition qui en théorie, simule le comportement d’un système hydraulique afin de garantir la compatibilité de l’EMA avec les systèmes de bord d’un avion existant.

Les résultats suivants ont été obtenus :

1. Lancement de travaux de thèse avec l’INSA de Toulouse en vue de créer un outil de simulation théorique de la fatigue mécanique des vis à rouleaux : ce composant essentiel des actionneurs électromécaniques linéaire n’était jusqu’à présent dimensionné qu’à partir d’un modèle industriel issu du roulement à billes.

Les travaux portaient sur un modèle de dimensionnement en fatigue multiaxial des vis à rouleaux en fonction du cycle d’endurance de l’avion, intégré à des outils de calculs analytiques et éléments finis à destination des bureaux d’étude. Ils ont donné lieu à plusieurs publications et à la soutenance de la thèse [FOL1]

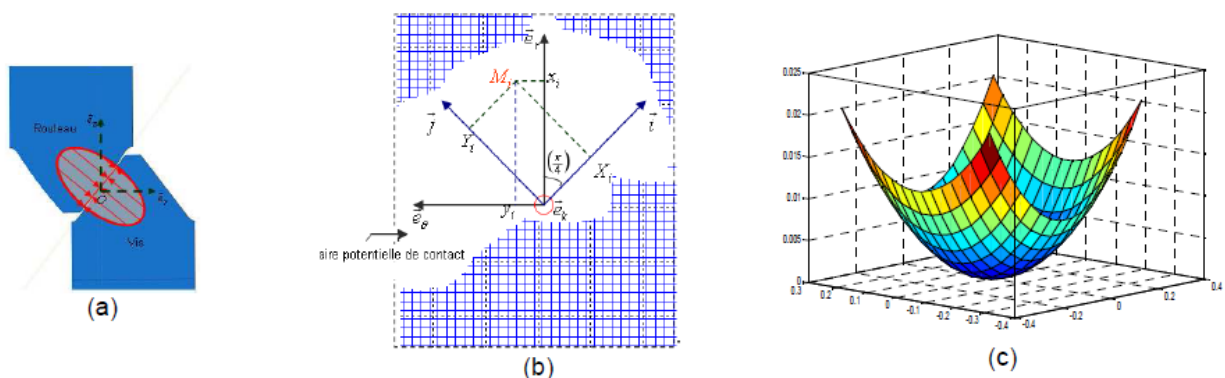


Figure 10. Critère de fatigue multiaxiale pour vis à rouleaux

2. Travaux d’études sur la surveillance de santé des composants des EMA, avec un focus sur la vis à rouleaux. Plusieurs méthodes de surveillance ont été évaluées à partir de mesures vibratoires réalisées sur des vis à rouleaux en essai de durée de vie :
  - Indicateurs scalaires,
  - Analyse d’ordre,

- Méthode des résidus.

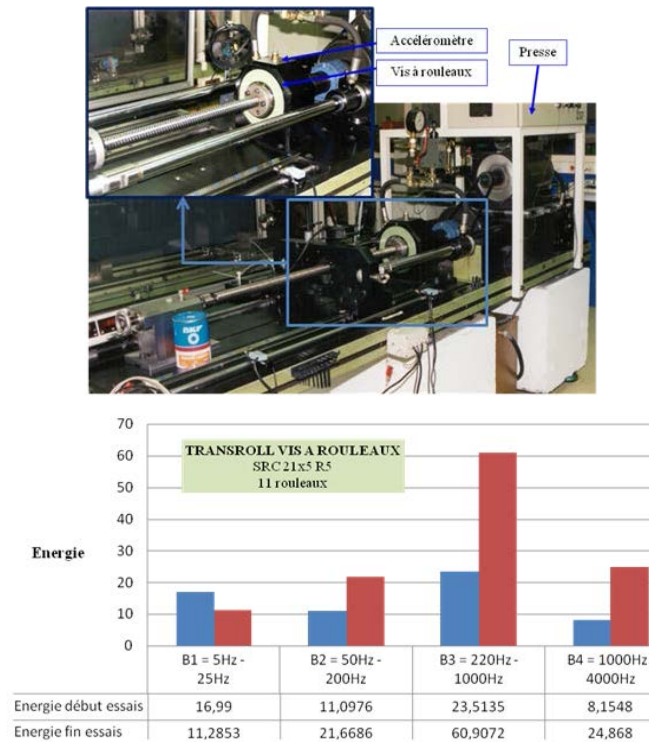


Figure 11. Essais de surveillance vibratoire sur vis à rouleaux

## 5.2. EPICE-CORALIE (2010-2015)

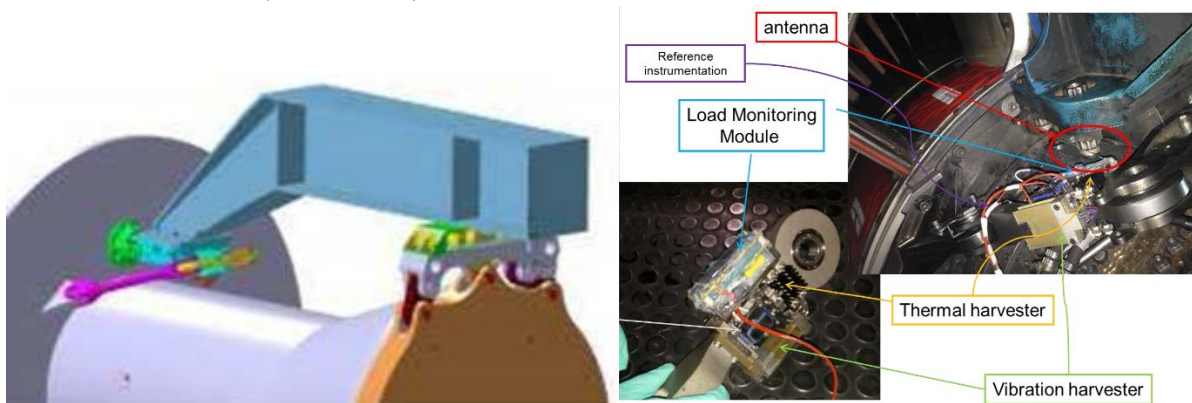


Figure 12. Système de surveillance attache de moteur d'avion (Démonstrateur)

Lancé en 2010 (COMité pour la Recherche en Aéronautique Civile), ce projet du CORAC avait pour objectif le développement d'une surveillance de la santé structurelle des attaches de la suspension du moteur à l'aile de l'avion.

Les niveaux d'effort réels de la suspension sont en effet mal connus. En cas d'atterrissage dur, il n'est actuellement pas possible de déterminer si la suspension a été endommagée par le choc. Cette situation amène un changement systématique des pièces de la suspension, immobilisant l'avion pendant la maintenance. Afin de répondre à ce besoin, SKF-Aerospace, en partenariat avec le LGEF- INSA Lyon et la société ORIDAO, a développé un démonstrateur technologique de capteur de surveillance de la charge d'une attache moteur, autonome, communiquant sans fil.

Ce projet est innovant pour SKF et intègre plusieurs technologies (Figure 13) :

- Un module de communication sans fil basé sur la technologie RFID permettant à l'utilisateur de récupérer les données de charge vue par la pièce durant les phases de vol.
- Un système de récupération d'énergie rendant le système totalement autonome durant les phases de vol, et assurant une surveillance en temps réel de l'attache.

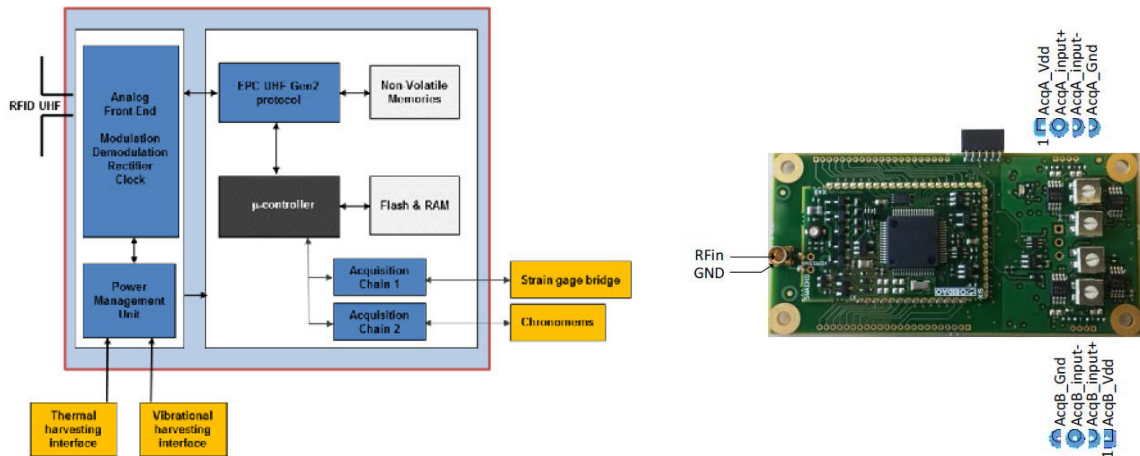


Figure 13. Architecture autour d'un tag RFID

Ce développement a permis à SKF de développer des briques technologiques élémentaires intégrables à tout système de surveillance de santé de composants, avec des applications possibles sur les roulements. Il a permis de réfléchir aux évolutions du business des composants de suspension moteur vers un marché de service basé sur l'échange des données de surveillance afin de pouvoir exploiter la suspension en service avec les responsables de la maintenance de l'appareil.

### 5.3. NEXGED (2010-2015)

Dans une démarche d'anticipation des besoins du marché, la société LATECOERE a élaboré et lancé en 2010 le programme NEXGED portant sur des architectures et équipements mécatroniques innovantes sur un "système porte". En partenariat avec SKF, entre autres, NEXGED a permis au consortium de continuer à offrir des solutions industrielles innovantes et compétitives sur les futurs avions. Cette porte du futur intégrant les nouvelles technologies des partenaires a été présentée au Salon du Bourget en 2017.

Par rapport aux solutions traditionnelles pour l'aéronautique de capteurs d'asservissement type RVDT, le roulement instrumenté automobile est une solution simplifiant l'intégration du capteur au sein du système d'actionnement à condition que l'architecture de l'électronique intègre les redondances adéquates (Figure 14). L'obligation sécuritaire de doubler le signal peut amener un design de recopie d'axe à plusieurs RVDT ou un capteur à double bobinage au prix plus important.

Si la fiabilité est avérée sur les applications automobiles avec des plages environnementales de sévérité proche, elle reste à démontrer pour la certification au regard de la durée de vie de l'avion (supérieure à celle d'une automobile) et des conditions d'environnement les plus sévères. Le transfert d'un produit existant venant de l'automobile offre, de plus, des perspectives intéressantes en termes de coût (Figure 15).

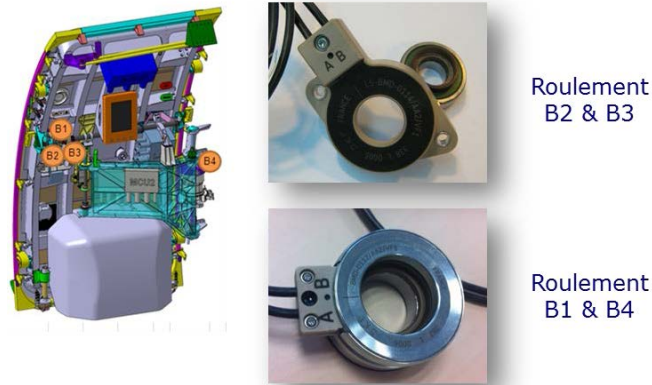


Figure 14. Position des roulements capteur dans le démonstrateur

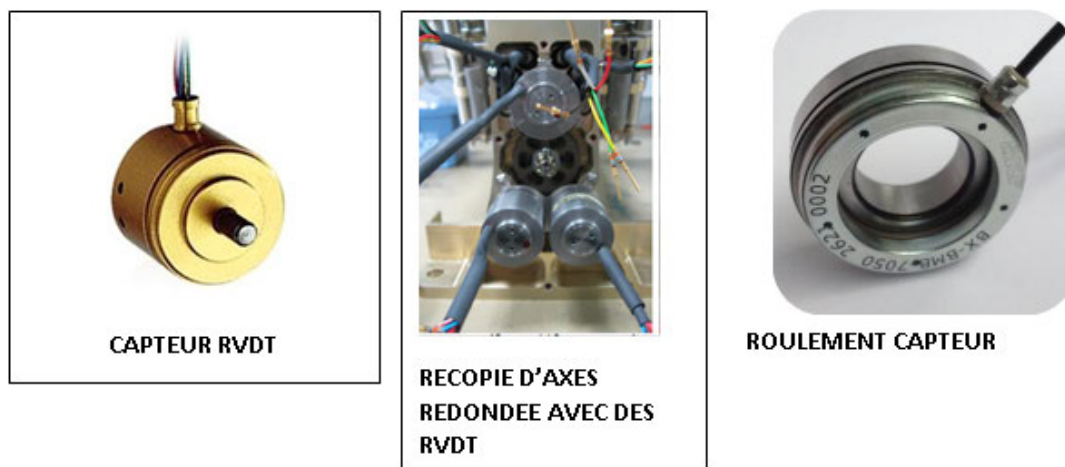


Figure 15. Capteurs de position

Le cahier des charges résumé pour le roulement ainsi que le fonctionnement du système présenté en Figure 16, est le suivant:

- Un capteur analogique de position absolue sur une amplitude de 360° ou 120° avec une précision de 0,4°.
- L'intégration à un roulement à une rangée de billes sans cage réalisé à partir d'inox aéronautique haute performance, associé à de fortes exigences de compacité
- Un MTBF souhaité de 200000 heures de vol, associé à une redondance obligatoire sur la génération du signal lié à l'application très critique (DAL A).
- Une plage de température de fonctionnement de -55°C à 80°C.

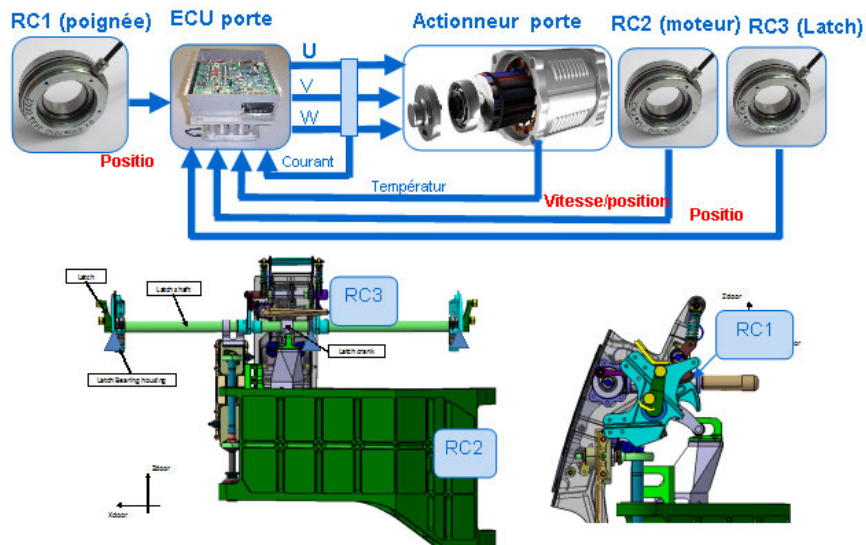


Figure 16. Synoptique système

Le projet a surmonté ces difficultés par la démarche innovante suivante :

- Intégration d'une électronique de mesure à un roulement aéronautique sans cage sur plusieurs localisations du mécanisme d'ouverture (arbre de latch assurant le verrouillage de la porte, roulement de la poignée d'ouverture, roulement du rotor moteur brushless de l'actionneur).
- Utilisation de méthodes optimisées d'analyse de sûreté de fonctionnement afin de définir les niveaux de redondance adéquat pour l'électronique du roulement.
- Utilisation d'une plateforme virtuelle d'intégration pour évaluer les modèles du roulement au regard des performances dynamiques visées, des architectures système et du réseau d'alimentation.
- Démonstration de la fiabilité sur la durée de vie par essais accélérés combinant plusieurs variables d'accélération (tension d'alimentation, température, cinématique et charge du roulement) grâce à la réalisation d'un banc d'essais permettant de mettre en œuvre 6 roulements capteurs et de surveiller la dégradation des caractéristiques lors d'essais d'endurance. Ces essais permettent d'améliorer la connaissance des modes de défaillance du roulement capteur, de caractériser la relation entre sa durée de vie et les facteurs de stress, et de le qualifier. La distribution des durées de vie ainsi observées est analysée par des outils statiques afin de pouvoir conclure quant à l'influence des paramètres d'accélération sur les mécanismes de dégradation et de pouvoir extrapoler un taux de défaillance pour les conditions d'application aéronautiques.
- Identification d'une méthode simplifiée de certification pour des composants standards provenant de l'industrie par une approche modulaire au lieu d'une approche de qualification d'un sous-système. Cette démarche permet d'obtenir un module qualifié qui peut également être proposé sur une autre application. Cette approche favorise la maturation des technologies en réalisant au plus tôt une qualification sur un composant ce qui permet d'anticiper les problèmes susceptibles d'apparaître sinon lors de la qualification de l'équipement (Figure 17).

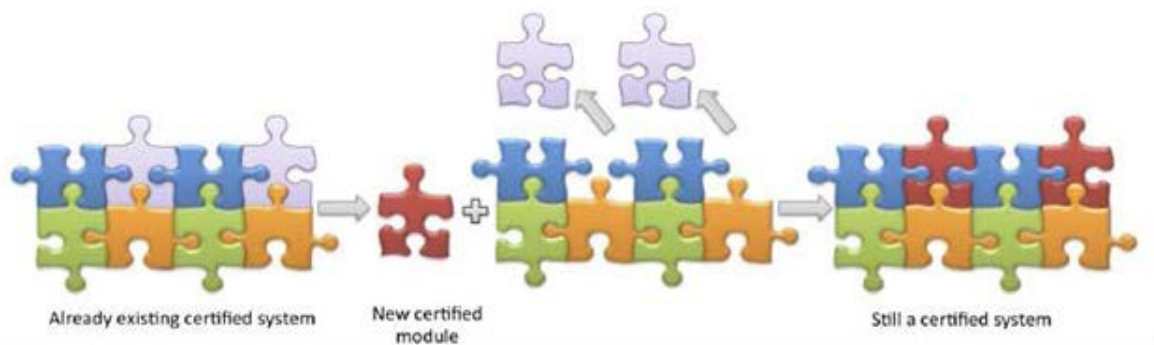


Figure 17. Approche de certification

Les bénéfices de ce projet ont été principalement une contribution au développement de solutions mécatroniques modulaires et abordables permettant à l'équipementier des architectures innovantes compétitives et compactes, la mise en valeur du savoir-faire de SKF autour d'un projet collaboratif associant ses filiales et un grand donneur d'ordre aéronautique, ainsi qu'une contribution aux méthodes de qualification lors du transfert d'une technologie industrielle vers une application aéronautique.

#### 5.4. ACTUATION 2015 (2010-2015)

De 2011 à 2016, le projet Actuation 2015 a été dédié à la modularisation et la standardisation des éléments des EMA en vue de réduire les coûts. Le projet a commencé par une analyse des besoins en matière d'actionnement pour des fonctions critiques sur les avions (commerciaux, privés et régionaux) et les hélicoptères. Cela a permis de définir les éléments et des interfaces standard (électronique de puissance, vis à rouleaux, moteurs, capteurs) et de démontrer la modularité : par exemple, les moteurs et les électroniques de commande issus de deux partenaires industriels, les vis à éléments roulants de trois partenaires industriels (dont SKF) pouvaient être interchangeables. En matière de commande moteur, la standardisation a couvert aussi bien les modules physiques et leurs interfaces (par exemple, PCM (Power Core Module) et CMM (Control and Monitoring Module)) que le logiciel et les protocoles (par exemple, système d'exploitation ou commande de l'onduleur).

SKF a contribué au projet en travaillant sur la standardisation des vis à rouleaux et des vis à billes (Figure 18).

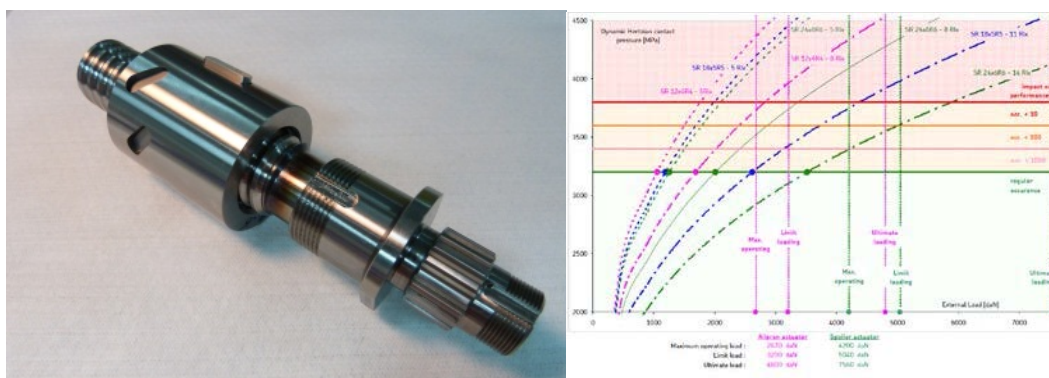


Figure 18. Vis à billes pour EMA

Cette contrainte de standardisation forte s'ajoute aux contraintes de performance recherchée sur ces composants :

- Fiabilité, notamment par rapport au phénomène de grippage,
- Compacité (rapport volume/densité de puissance mécanique),

- Sans maintenance (lubrification à vie ou surveillance de santé du composant).

Une gamme de vis à billes et de vis à rouleaux adaptées aux cas d'application, dont la capacité de charge dynamique et statique pourra être choisie en jouant sur le nombre d'éléments roulants, le nombre de départs de filet..., a été définie.



## 6. Thématiques et activités de recherche

### 6.1. Surveillance de santé, récupération d'énergie, système embarqué

#### 6.1.1. Contexte et motivations

La thématique de recherche principale porte sur la surveillance de santé des composants mécaniques au sein des transmissions à des fins de maintenance prédictive. Il s'agit de détecter les endommagements ou mode de défaillance au plus tôt afin de pouvoir optimiser les actions de maintenance. La maintenance présente des enjeux organisationnel, économique, techniques multiples. La surveillance de santé et la maintenance prédictive font d'ailleurs partie intégrante des items répondant aux enjeux de l'industrie du futur (Figure 19).

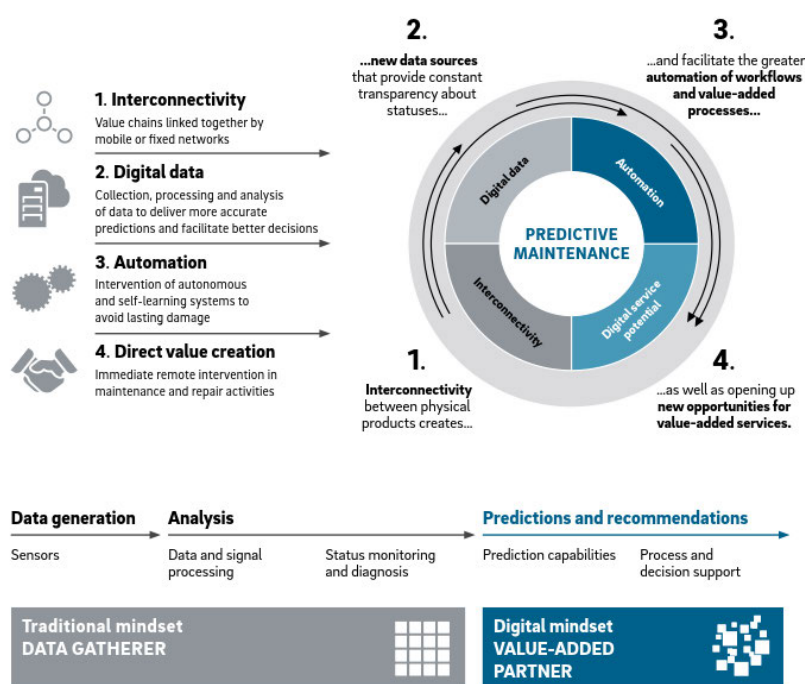


Figure 19. Philosophie de la maintenance prédictive [PM-01]

Pour cela, une mutation des maintenances traditionnelles de type corrective et préventive systématique vers des politiques de maintenances intelligentes, dont notamment la maintenance basée sur l'état (Condition-Based Maintenance : CBM) et la maintenance prédictive, est plus que nécessaire. En effet, contrairement aux maintenances traditionnelles pour lesquelles les interventions sont réalisées après l'apparition de la défaillance ou indépendamment de l'état du système, la CBM s'appuie sur l'état courant, estimé ou réel, du système pour décider des interventions. Dans le cas d'une maintenance prédictive, l'état courant est projeté dans le futur pour prévoir les futures actions de maintenance. Ces deux politiques « intelligentes » permettent ainsi d'augmenter la disponibilité, la fiabilité et la sécurité du système tout en réduisant les coûts d'exploitation en jouant sur ceux de la maintenance. La mise en œuvre de ces nouvelles maintenances requiert une démarche technique impliquant différentes tâches telles que la surveillance, la modélisation, l'analyse et l'aide à la décision. Ces tâches font partie du concept de PHM : Prognostics and Health Management que l'on peut traduire en pronostic et gestion de l'état de santé de systèmes industriels.

La différence entre CBM et PHM n'est pas aisée à établir. La CBM est un concept de maintenance. Elle a été la première à être développée et utilisée notamment par l'aéronautique au moment où le pronostic n'était pas encore introduit. Elle était alors associée aux tâches de surveillance, de détection et de diagnostic. Ce concept a ensuite évolué vers la CBM+ avec l'intégration de tâches de prédiction de l'état de santé du système. Avec l'introduction et le développement du pronostic, ce dernier a été utilisé pour compléter les tâches de surveillance, de détection et de diagnostic. Ces tâches, ainsi que les données qui y sont issues, sont utilisées pour gérer l'état de santé du système. On parle alors de PHM. Ce dernier comporte les mêmes fonctionnalités que la CBM et CBM+, mais avec le pronostic en plus pour anticiper la défaillance et décider en conséquence.

Un système de surveillance dans un équipement ou un processus peut apporter une très forte valeur ajoutée pour l'exploitant comme pour le constructeur. C'est une source de compétitivité accrue et l'opportunité de nouveaux services. Des constructeurs d'équipements proposent des contrats de maintenance incluant la surveillance du parc et des services spécialisés, comme SKF avec l'offre "Rotation For Life" (fourniture de roulements, gestion de lubrification, diagnostic à distance et analyse des causes de défaillance), définie pour répondre à des objectifs de performance convenus avec le client (Figure 20).

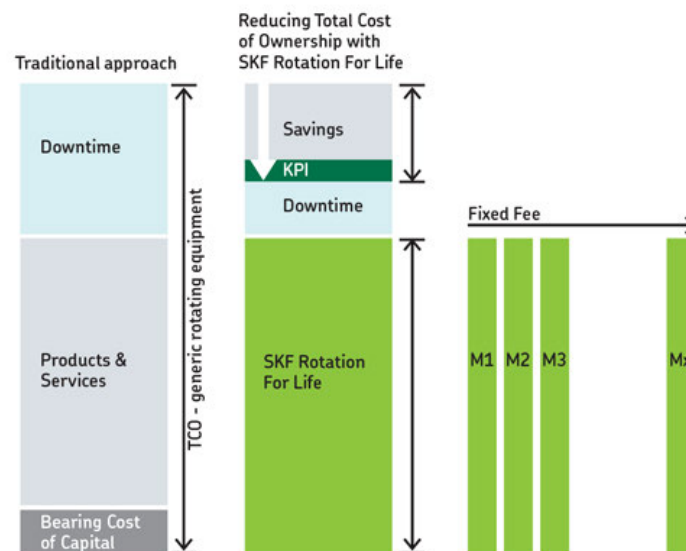


Figure 20. SKF rotation for life

La surveillance permet, en appui à la maintenance, d'assurer la disponibilité des équipements de production et donc d'augmenter la productivité. Elle permet de réduire les coûts de maintenance, mais aussi de protéger les biens et les personnes. Enfin, cette surveillance permet de contrôler en ligne la qualité des pièces produites et de viser une production 'zéro-défaut'. Cette mise sous surveillance et le développement d'équipements « connectés » ouvrent aussi la porte à de nouveaux services pour les fournisseurs d'équipements qui peuvent proposer un suivi de leur produit en exploitation, une maintenance adaptée et finalement s'engager sur une disponibilité. À terme, en disposant d'un réseau d'équipements connectés, il sera possible de disposer d'une base de données et d'un retour d'expérience sur les sollicitations vues par l'équipement. Cela permettra d'améliorer la conception de l'équipement, ceci au bénéfice de tous (constructeurs, exploitants).

L'émergence de l'Internet des objets fait évoluer la donne très vite (Figure 21). D'ici peu, les installations industrielles intégreront des équipements de détection capables de reconnaître les signes

annonceurs de défaillances et permettant la programmation « automatique » d'interventions de maintenance.

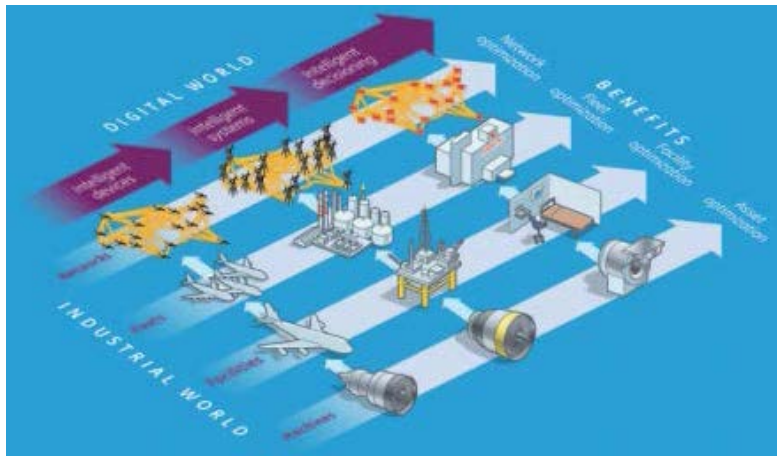


Figure 21. Internet industriel

Le constructeur pourra alors s'engager sur un taux de disponibilité de l'équipement. Mais le domaine regroupe plusieurs briques technologiques nécessitant encore des développements :

- Capteurs communicants autonomes,
- Algorithmes d'identification des défaillances (diagnostic),
- Outils de traitement des données à des fins de pronostic.

C'est dans de ce contexte que s'organise l'état de l'art et des perspectives dans le domaine du PHM autonome, plus précisément des roulements à billes, correspondant au cœur du métier de la société SKF (Figure 22).

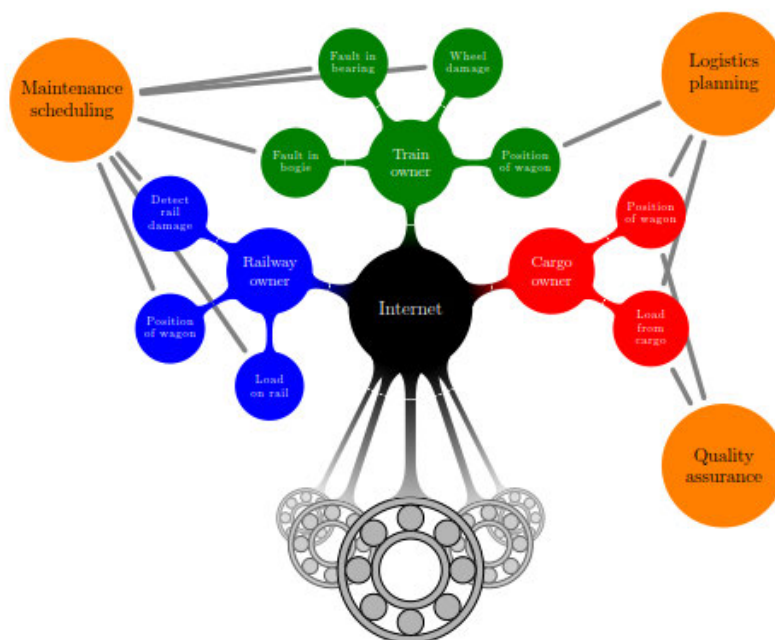


Figure 22. Internet des objets autour du roulement intelligent (application ferroviaire) [FH-01]

Des roulements, il y en a partout, des robots ménagers, en passant par les compresseurs ou les roues de véhicules : un très grand nombre de systèmes en rotation en sont équipés. Ce sont des composants stratégiques des machines tournantes : situés entre les parties fixes et les parties mobiles de la structure, ils assurent la transmission des efforts et la rotation de l'arbre.

Mais s'ils sont très courants, ces composants sont aussi fragiles. A titre d'exemple, des études statistiques ont montré que les pannes imputables aux roulements à billes sont prépondérantes quelle que soit la gamme de puissance des machines asynchrones [RLM-01] – [03]. Selon les différentes sources citées, les pannes dues aux roulements représentent ainsi entre 40 et 50% des pannes totales, devant les défauts statoriques et rotoriques, comme l'illustre la Figure 23.

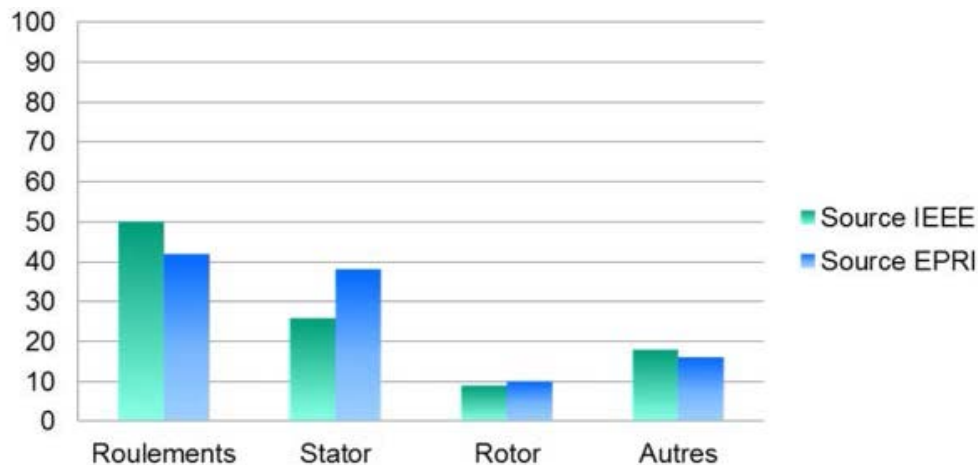


Figure 23. Répartition du taux de panne dans les machines asynchrones [RHE-01]

Il est donc logique, d'un point de vue industriel et scientifique, de concentrer les efforts de détection des pannes et de diagnostic sur les roulements à billes.

#### 6.1.2. Etat de l'art

Le PHM (Prognostic Health Management) est une discipline des sciences de l'ingénieur focalisée sur la détection, la prédiction et le management de l'état de santé des systèmes complexes. Cette discipline est transverse aux domaines de l'instrumentation, du traitement de données et des signaux, de la surveillance des systèmes jusqu'au développement d'un processus d'aide à la décision. L'objectif de cette discipline est d'optimiser le compromis de disponibilité d'un système tout en assurant la sécurité des biens et des personnes par une utilisation de la maintenance industrielle de manière adéquate.

Ce processus est applicable et standardisable soit à des types de machines (turbine à gaz, transmission à engrenage), ou à des classes de composants parmi les plus critiques au sein d'une transmission ou d'un système, comme les roulements ou les systèmes de stockage d'énergie. La surveillance de leur état de santé permet une prise en compte plus proactive de leurs défaillances. La finalité reste d'évoluer de la maintenance corrective vers la maintenance prévisionnelle (couramment appelée maintenance prédictive) pour répondre aux enjeux de compétitivité. Il s'agit non seulement de ne plus subir les défaillances non prévues des équipements, mais aussi de les anticiper et de s'organiser pour que l'impact soit minimum (Figure 24).

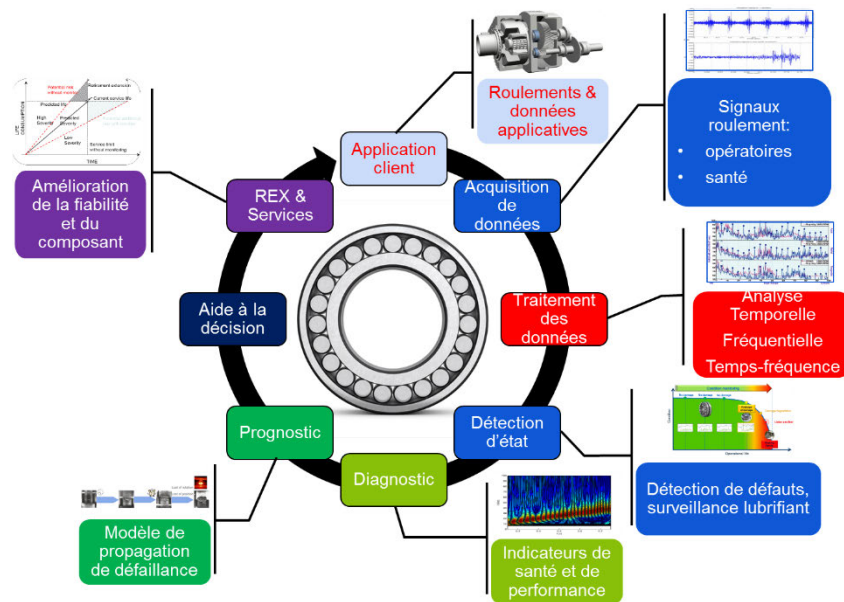


Figure 24. Processus Bearing Health Monitoring system

Pour les roulements, le PHM est réalisé par la surveillance des positions les plus critiques au sein de la transmission (ceux dont la défaillance présente l'impact le plus important) pour observer l'évolution de leur état de santé principalement grâce à la mise en œuvre de fonctions supplémentaires de mesures de grandeurs (opératoires, de santé).

Préalablement à la méthode, la connaissance à priori des relations de cause à effet de la dégradation doit être regroupée sous la forme de modèles causaux qualitatifs décrivant l'influence de la dégradation sur l'apparition de défaillances sur un système. La construction de ces modèles est basée sur des méthodes d'analyses fonctionnelles et structurelles. Certaines méthodes d'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC), fournissent une compréhension structurée des modes de défaillances, en analysant et en isolant les effets de chaque mode de défaillance, en se basant sur une logique inductive. D'autres méthodes à logique inductive, comme l'arbre d'évènements, permettent, à partir d'une séquence logique d'occurrences d'évènements ou d'états, d'identifier les conséquences et potentiellement la probabilité d'occurrence d'une défaillance. Enfin, un arbre de défaillance détaille les relations d'interactions entre chaque élément d'un système afin de mettre en évidence l'apparition d'une défaillance sur la base d'une logique déductive.

### Acquisition des données du roulement

Cette mise en œuvre nécessite d'abord une bonne connaissance du roulement au sein de son application et des défaillances associées. Il faut ensuite choisir et intégrer des capteurs pertinents pour l'application donnée (température, vitesses, chargement mécanique, vibrations...).

Les capteurs vont permettre de recueillir une image de l'état de santé du roulement associée à des conditions opératoires dans l'équipement.

Les mesures des conditions opératoires sont relatives aux conditions de fonctionnement du roulement comme la charge mécanique, la température et la vitesse de rotation. Les grandeurs relatives à l'état de santé de la pièce telles que celles indiquant l'intégrité fonctionnelle des éléments constituant le roulement comme la vibration émise par ce dernier ou son niveau de température.

L'établissement de profil de mission et l'identification des conditions opératoires pour les roulements sont portés par le développement des démarches de conception fiabilistes, pour lesquelles les critères

de dimensionnement des équipements industriels s'expriment en termes de fiabilité, de probabilité de non-défaillance ou de durée de vie prévisionnelle. La fiabilité d'un roulement ne peut être évaluée de façon absolue, mais relativement à une mission donnée caractérisée par des conditions de réalisation et une durée donnée. Ces caractéristiques sont en général assez mal connues des constructeurs de machines. Seule, l'observation en continu, pendant une certaine durée, d'un échantillon représentatif de machines instrumentées, utilisées normalement par leurs opérateurs habituels, permet de rendre compte des conditions et durées d'utilisation réelles et variées de ces machines. La collecte de données à bord des machines permet ainsi de caractériser la mission de façon objective à partir de l'évolution temporelle des grandeurs mécaniques d'intérêt et de leurs paramètres d'influence : déplacements, vitesses, accélérations, contraintes mécaniques, vibrations, chocs, températures, état de santé du lubrifiant... Leur connaissance permet alors de gérer la vie du composant de manière optimale allant de l'extension de durée de vie lorsque ces dernières sont moins sévères que prévues ou à l'opposé de la nécessité d'une surveillance accrue (Figure 25).

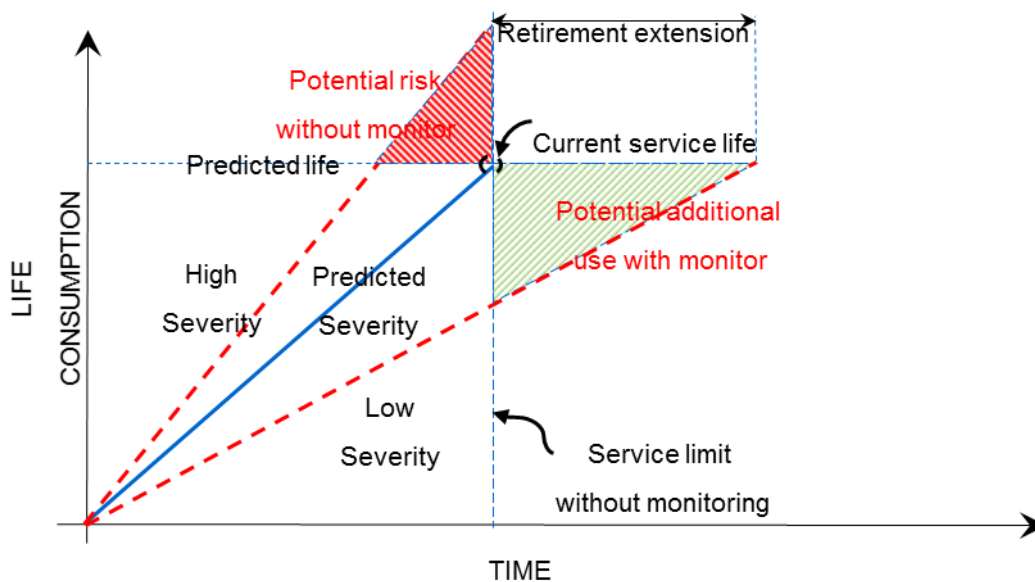


Figure 25. Gain de la surveillance sur la durée de vie

En pratique, la collecte de données peut être opérée selon deux approches complémentaires :

- Sur flotte de machines, ce qui privilégie une observation étendue des missions en s'appuyant sur des moyens d'instrumentation minimalistes. Cette approche nécessite de développer la capacité à spécifier, développer, qualifier et mettre en œuvre des capteurs sur mesure et fiabilisés sur des pièces d'essais ou de disposer d'un composant intégrant un système de mesure.
- Sur banc ou véhicule d'essai instrumenté en laboratoire, ce qui privilégie l'observation détaillée des conditions de fonctionnement des machines pour des missions connues a priori. Les points clés de la démarche de mise en œuvre des moyens de collecte de données peuvent être résumés comme suit : définition des grandeurs physiques à mesurer, définition des capteurs et de l'instrumentation nécessaires aux essais, étude d'implantation des capteurs et systèmes de mesure, définition des protocoles de mesures, réalisation des capteurs spécifiques, mise en place et contrôle de l'instrumentation et du matériel d'acquisition sur le moyen d'essai, réalisation des enregistrements, traitement de données, et analyse des

données vis-à-vis de la fatigue ou de la durée de vie. La Figure 26 donne un exemple de roulement instrumenté.



Figure 26. Roulement instrumenté en jauges de contrainte

Ces données opératoires doivent être exploitables, d'une part par les bureaux d'études pour conduire une démarche de conception fiable et représentative des conditions d'utilisation réelles et variées des machines et, d'autre part, par les laboratoires d'essais pour établir la fiabilité expérimentale et la représentativité des conditions d'essais sur les bancs de test.

De plus avec le rôle sans cesse croissant joué par la simulation numérique dans les processus de développement des composants mécaniques, les essais physiques tendent progressivement à changer de finalité. Les démonstrations de conformité aux exigences qui s'appuyaient hier uniquement sur des essais physiques reposent à présent en partie sur des essais virtuels. Les essais physiques viennent ainsi de plus en plus en appui de la simulation numérique pour produire les données nécessaires à la maîtrise des incertitudes liées à l'exploitation des modèles numériques dans les processus de conception et de décision. Par conséquent, une part de plus en plus importante de l'effort de développement de moyens d'essais est désormais consacrée aux chaînes de mesure. Elles forment, par les données qu'elles permettent de générer, la part essentielle de la valeur ajoutée du moyen d'essais, sur laquelle se concentrent de nouvelles exigences industrielles. Elles doivent permettre d'observer sur toute la durée de l'essai, en environnement représentatif, les comportements et endommagements en service des équipements mécaniques, au plus près des organes concernés.

Toutefois, Ces instrumentations doivent être intégrées au cœur des équipements mécaniques et ne doivent pas en altérer le comportement, tout en résistant à des conditions de fonctionnement parfois extrêmement sévères. Lors d'une étude d'instrumentation, trois types de contraintes sont à considérer :

- La nature des grandeurs à mesurer,
- Les contraintes environnementales,
- Les contraintes d'encombrement.

Au sein de l'environnement métallique, confiné et lubrifié des transmissions mécaniques (boîte de vitesse, réducteurs, multiplicateurs), les grandeurs à mesurer sont multiples. Il s'agit par exemple des couples de transmission, des contraintes appliquées sur des bagues de roulement ou en pied de dent d'engrenage, des températures de lubrifiant ou de bague de roulement, des déplacements (épaisseur de film lubrifiant, mouvement de cage de roulements) sur des organes mécaniques parfois en rotation.

Ce dernier cas nécessite ainsi une transmission sans fil des signaux avec la mise en œuvre de télémesures.

Il est également nécessaire de prendre en compte les contraintes d'environnement sur la tenue des capteurs et les performances de mesures : température, présence d'huile (projections, barbotage ou sous-pression), accélérations liées à la rotation. Les contraintes liées à l'encombrement disponible sont primordiales dans l'étude d'intégration des capteurs et un élément important est le cheminement des câbles du point de mesure au système d'acquisition ou de transmission sans fil.

Les contraintes d'intégration et de résistance mécaniques à satisfaire dans de tels environnements, sont extrêmement élevées. Elles imposent un effort de miniaturisation important et génèrent le plus souvent le développement de solutions d'instrumentation sur mesure. Ces systèmes de mesure nécessitent impérativement d'être fiables et qualifiés avant toute exploitation pour atteindre une justesse de mesure toujours plus petite dans des applications en environnement sévère. La quantification des incertitudes liées aux chaînes de mesure, au moyen d'essai et à son pilotage, est primordiale et doit être parfaitement maîtrisée.

### Analyse des signaux vibratoires

L'image de santé des roulements est établie principalement sur la base de l'analyse du signal vibratoire émis par la transmission, comme l'illustre la Figure 27, présentant un banc de mesure et des résultats d'analyse.

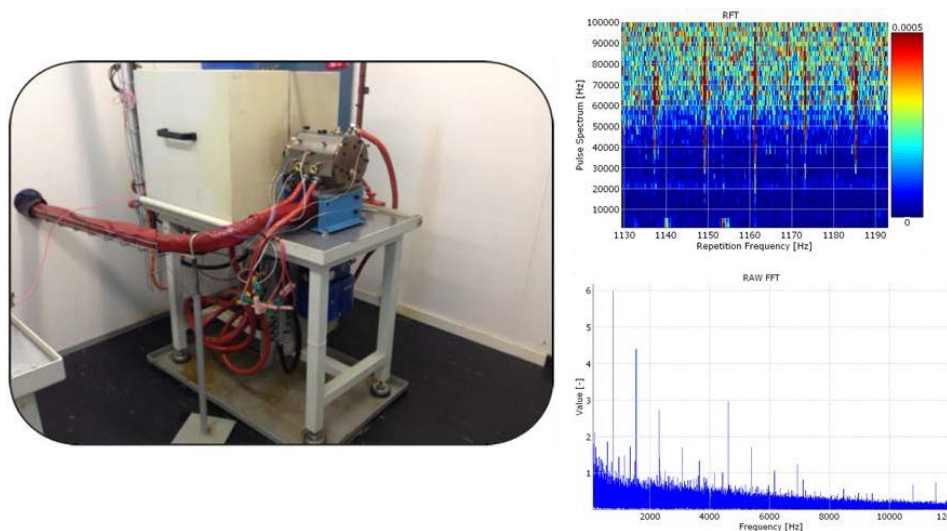


Figure 27. Mesure vibratoire sur banc essai roulement

En effet, tout composant mécanique répond à une excitation par une réponse vibratoire liée aux caractéristiques mécaniques intrinsèques de ce composant. À partir de ce fondement de la mécanique, l'analyse de la réponse vibratoire des roulements en fonctionnement permet d'extraire des signatures ou des indicateurs qui reflètent leur état de santé et de détecter l'apparition de défauts.

SKF dispose de différentes méthodes d'analyse des signaux vibratoires (ou d'autres grandeurs physiques), que l'on peut exploiter selon le type du signal à analyser. Liés à l'application et les conditions d'exploitation, les outils à utiliser seront différents. Ainsi pour les signaux stationnaires (vitesse et charge constante), les méthodes statistiques ou fréquentielles seront utilisées pour l'analyse. Ces méthodes usuelles permettent de calculer soit des niveaux globaux de vibration pouvant alerter sur l'état global du roulement, soit des énergies dans des bandes fréquentielles pouvant donner la possibilité de remonter aux sources des vibrations. Dans le cas où le fonctionnement de l'application



est caractérisé par une vitesse et/ou une charge non constante, les signaux de vibration sont dits « non-stationnaires ». Les méthodes mises en œuvre dans ce cas sont spécifiques. S'il existe une périodicité dans ces signaux, relative à un cycle de la machine (souvent un tour d'un arbre tournant), l'analyse d'enveloppe ou des méthodes angulaires cyclostationnaires, appelées aussi analyse synchrone, seront choisies. S'il n'existe pas de périodicité, des méthodes adaptées comme les spectrogrammes temps-fréquences ou angle-ordre seront alors utilisées.

### **Traitement des données**

Une fois les données collectées, il est nécessaire d'en extraire des indicateurs (features) pertinents soit directement à partir des données brutes pré-traitées, soit en calculant d'autres indicateurs de l'état de santé. Le pré-traitement est en général considéré afin de mettre en forme les données acquises (data cleaning) en diminuant l'effet du bruit, en corrigeant les inconsistances et en réduisant leur taille, etc. Puis, les indicateurs représentant l'état de santé sont extraits des signaux.

Dans le cas de données de type valeurs, l'extraction d'indicateurs consiste à traduire les données constituant l'espace d'observation, dans d'autres espaces possédant des propriétés mathématiques spécifiques recherchées. Le but de cette traduction est de faciliter la détection et l'isolation de nouveaux indicateurs plus spécifiques de l'état de santé. Parmi les approches existantes dans la littérature pour les données, on peut citer l'analyse du domaine temporel et/ou du domaine fréquentiel d'un signal. Chaque type d'analyse est présenté dans les sections suivantes.

L'analyse au travers du domaine temporel permet d'extraire, à partir des données ou des indicateurs statistiques. Pour ce faire, des algorithmes de lissage de données, de calculs d'indicateurs de statistiques descriptives peuvent être utilisés. D'autres algorithmes de calculs comme des distributions, des mesures temporelles, ou des moyennes à temps synchronisé, sont également couramment considérés.

L'analyse au travers du domaine fréquentiel possède l'avantage d'extraire des indicateurs présents dans les composantes fréquentielles de certaines données. Pour ce faire, la transformée de Fourier rapide, bien que couramment appliquée, ne permet pas de traiter des signaux de type impulsions, caractéristiques de l'évolution de défauts. Dans ce cas, certains algorithmes d'analyses du spectre de puissance, d'enveloppe, ou à structures de bandes sont couramment utilisés. D'autres formes d'analyse comme la transformation Hilbert-Huang ou encore la décomposition en modes empiriques peuvent être aussi considérées.

L'analyse au travers du domaine temporel-fréquentiel permet de traiter les cas de signaux non stationnaires, caractérisant l'évolution de défauts dans le temps. Les indicateurs spécifiques d'un défaut sont localisés sur certaines composantes fréquentielles particulières évoluant dans le temps. Pour cela, des algorithmes de calculs de la transformée de Fourier courte, de spectrogramme, de distributions sont utilisés. La transformation en ondelette peut également être considérée. Elle est basée sur le principe d'analyse multi-échelles d'un signal. Différentes formes de transformations par ondelettes permettent d'extraire ces indicateurs par une mesure de similarité entre le signal et la forme de transformation par ondelette considérée.

Dans le cas de données multi-dimensionnelles [86], l'extraction d'indicateurs sera réalisée par une analyse en composantes principales. Cette analyse est basée sur une transformation orthogonale permettant de réduire la dimension d'un ensemble de signaux mesurés par un nouvel espace réduit de dimension inférieure, orientée par des composantes principales. Plusieurs transformations sont utilisées afin de maximiser les variances pour chacune des composantes principales.

Ainsi, l'information fournie par le capteur peut être simple à exploiter (ex. : une évolution de température comme indicateur de défauts). Les données acquises peuvent aussi être traitées pour extraire des informations pertinentes pouvant renseigner sur le comportement du système, la présence d'anomalies, l'initiation et la propagation de dégradations. Les informations extraites servent aussi à caractériser et modéliser les phénomènes d'intérêt qui se déroulent au sein du système.

### Détection d'état

Les sorties des capteurs et les observations des opérateurs sont continuellement comparées aux sorties des modèles des comportements nominaux préalablement construits pour détecter d'éventuelles anomalies sur le système. La détection des anomalies nécessite différents seuils définis en fonction de critères (performance, sécurité, etc.) établis par l'exploitant de la machine sous surveillance (Figure 28).

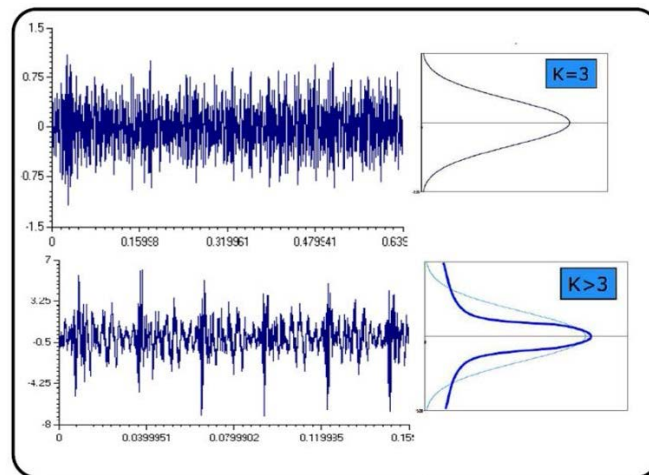


Figure 28. Évolution du Kurtosis en fonction du stade de dégradation du roulement

### Diagnostic

Il correspond à la localisation et l'identification des causes des anomalies ou défaillances constatées sur le roulement. Il s'appuie sur une connaissance poussée des roulements dans l'application, des interactions entre les composants, des conditions de fonctionnement et environnementales et du contexte dans lequel évolue le système. La Figure 29 illustre le principe du diagnostic.

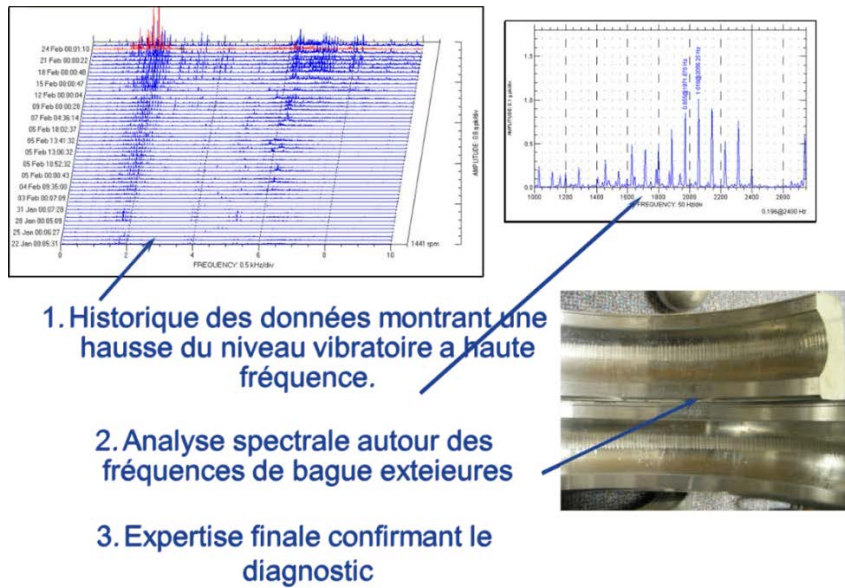


Figure 29. Diagnostic basé sur la mesure des amplitudes vibratoires aux fréquences de défauts

### Pronostic

Ce module s'appuie sur les résultats de la détection et éventuellement sur ceux du diagnostic pour prédire la durée de fonctionnement avant défaillance du système. Cette prédiction nécessite de connaître l'état actuel du système et ses futures conditions d'utilisation. Comparé au diagnostic, qui intervient a posteriori suite à une défaillance pour rechercher les causes, le pronostic a pour but d'anticiper la défaillance et permet ainsi à l'exploitant de ne pas subir les conséquences des défaillances, d'augmenter la disponibilité de ses systèmes, d'améliorer leur sécurité et de réduire les coûts de maintenance, car les interventions ne sont pas réalisées dans l'urgence.

### Aide à la décision

Les informations et les connaissances capitalisées à partir des étapes précédentes sont exploitées pour définir les actions à mettre en place pour permettre de continuer l'exploitation de la machine et assurer la continuité de ses fonctions attendues. Les actions recommandées peuvent être d'adapter le régime de fonctionnement suite à la détection d'anomalie sur les conditions opératoires des roulements ou d'accommodation de la situation courante lors de la détection d'un défaut ou l'arrêt pour maintenance voire l'arrêt d'urgence (Figure 30).

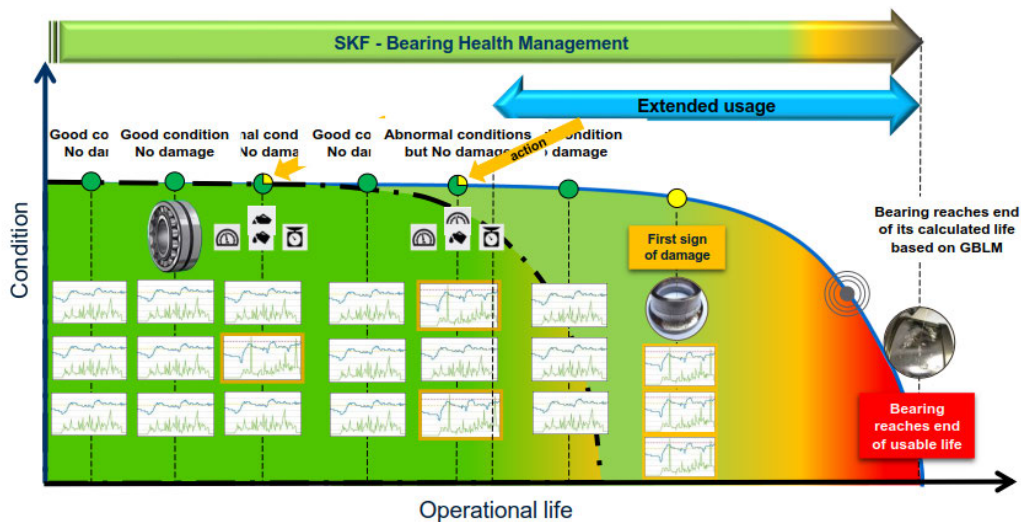


Figure 30. Gestion de la santé roulement par surveillance des conditions d'utilisation

Même si chacune des étapes présentées précédemment a son importance dans la réalisation d'un processus PHM pertinent, les travaux de recherche sont focalisés sur l'acquisition et le traitement de données par l'utilisation d'un système embarqué sur le roulement (roulement smart). Ce choix est principalement motivé par le fait que la réalisation d'une étape de pronostic fiable nécessite des données consistantes. Le diagnostic des roulements est bien établi dans le domaine industriel et nécessite un transfert vers les applications aéronautiques de SKF-Aerospace.

L'acquisition et le traitement des données pour le diagnostic et le pronostic soulève plusieurs problématiques :

- Comment sélectionner les indicateurs pertinents ?
- Comment combiner l'information de plusieurs capteurs ?
- Comment prendre en compte l'évolution des conditions de fonctionnement ou l'environnement ?
- Comment détecter une dérive et prévoir son évolution ?

La connaissance des modes de défaillance et la disponibilité d'un modèle physique associé ainsi que les récents progrès des outils de traitement des données et de leur exploitation permettent de répondre à ces questions. La combinaison de ces trois briques (capteurs, traitement du signal, analyse de données) permet de définir la fonction de surveillance puis de l'intégrer dans un équipement, de le rendre « intelligent » et si besoin communicant. Pour pouvoir être utilisé en exploitation, l'objectif est de doter le système de surveillance d'une capacité d'auto-apprentissage (apprentissage d'un état initial de référence, puis apprentissage des défaillances qui seront observées) ou de développer des modèles de pronostic basés sur les données ou sur un modèle physique ou une combinaison des deux.

### 6.1.3. La maintenance industrielle et aéronautique

Selon la norme NF EN 13306, la maintenance peut être définie comme l'ensemble de toutes les actions techniques administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Elle comprend ainsi un ensemble d'actions de dépannage, de réparation, de contrôle et de vérification des équipements matériels, et doit contribuer à l'amélioration des processus industriels. Selon la vision traditionnelle, la fonction de maintenance permet de garantir les caractéristiques de sûreté de fonctionnement des matériels, notamment la disponibilité. Elle vise donc globalement à appréhender

les phénomènes de défaillance et à agir en conséquence, afin d'assurer que le système (le bien) soit à même de remplir la fonction pour laquelle il a été conçu (maintien en condition opérationnelle, MCO). Mais les missions de la fonction de maintenance ne se limitent plus à la mise en œuvre de moyens permettant d'assurer le service des biens. Des exigences de qualité, de sécurité et de coût sont apparues, et les enjeux et prérogatives de la fonction maintenance ont évolué ces vingt dernières années.

Dans le secteur aéronautique, cette activité est désignée par le sigle « MRO », « Maintenance, Repair and Overhaul », qui est l'activité de maintenance, réparation et refonte des avions. Cette activité est vitale pour la sécurité du transport aérien. C'est grâce aux soins constants apportés aux avions que ce mode de transport demeure le moins dangereux qui soit.

La MRO met en jeu plusieurs acteurs. Les compagnies ont, outre la responsabilité du service aérien, celle de la maintenance et des réparations de leurs appareils. Les constructeurs aéronautiques leur fournissent avec leurs produits un jeu complet d'informations, de méthodes de maintenance et de réparation desdits produits. Les deux principaux constructeurs aéronautiques, Boeing et Airbus, et leurs concurrents, soumettent leur production à un certain nombre de tests réguliers obligatoires réalisés lors de visites de maintenance des appareils baptisées habituellement A, B, C et D.

#### **Maintenance de niveau A**

Cette opération se fait environ tous les mois ou de 300 à 700 heures de vol. Elle est effectuée généralement en une nuit dans une enceinte de l'aéroport. L'occurrence de ce type de maintenance varie selon le type d'aéronef, le nombre de cycles (1 décollage et 1 atterrissage), ou le nombre d'heures de vol depuis la dernière vérification.

#### **Maintenance de niveau B**

Cette opération se fait environ tous les 3 mois. Ce contrôle est aussi généralement effectué durant la nuit dans une enceinte de l'aéroport.

#### **Maintenance de niveau C**

Cette opération se fait environ tous les 12-18 mois ou pour un nombre précis d'heures de vol effectives tel que défini par le constructeur. Cette vérification d'entretien met l'appareil hors service et exige beaucoup d'espace - le plus souvent dans un hangar de maintenance.

#### **Maintenance de niveau D**

Cette phase est également connue sous le nom de visite de maintenance lourde. Elle s'effectue environ tous les 4-5 ans. Elle nécessite plus de temps et d'espace que les autres types de maintenance et doit être exécutée dans un hangar de maintenance. Elle dure au minimum deux semaines, parfois jusqu'à 2 ou 3 mois en fonction du type d'appareil, de son âge et du nombre d'heures de vol. Les compagnies en profitent en général pour installer les dernières améliorations apportées par les constructeurs.

Les contrôles de catégorie D sont des contrôles lourds appelés « refontes » (overhaul). L'appareil est alors immobilisé au sol pour une longue période, au cours de laquelle tous ses composants sont inspectés et réparés si nécessaire. Une refonte de gros porteur comprend généralement l'exécution de quelque 10 à 15 000 tâches complexes, précises, et rigoureusement réglementées. La maintenance s'effectue selon un rythme déterminé par les constructeurs, de façon stricte. Les phases de maintenance proprement dites et de réparation varient selon les modèles ou les familles de modèles. Les tests que les constructeurs imposent correspondent à un nombre donné d'heures de vol ou à une durée de vie estimée d'un appareil donné (celle des deux qui arrive en premier).

Les compagnies, pour assurer la maintenance et les réparations de leurs appareils, tiennent compte des consignes des constructeurs ainsi que des normes des organisations internationales, visant à améliorer la qualité de vol, augmenter la sécurité en vol et veiller à l'emploi correct des produits livrés aux utilisateurs qui obéissent eux-mêmes à des normes sévères. La fonction de maintenance est assurée par des entreprises d'ingénierie en maintenance et réparation pouvant appartenir à une compagnie aérienne comme Lufthansa Technique et Air-France, ou bien constituer une société indépendante comme Fars Co. et GAMCO, entreprises chargées d'exécuter la maintenance périodique définie par les constructeurs.

On distingue 5 types principaux d'activités de maintenance aéronautique (MRO) ou branches :

- Ligne (ou « maintenance en piste »)
- Structure principale
- Moteurs
- Composants / équipements
- Modifications

Ces branches diffèrent les unes des autres en fonction de l'importance relative de paramètres comme la main-d'œuvre, la réparation des composants, les matières, les pièces détachées, etc. Par exemple, la réparation des moteurs, qui occupe la plus grosse part du marché MRO, dépend fortement du paramètre composants/matière, tandis que la main-d'œuvre intervient peu. C'est exactement le contraire pour la maintenance de ligne : les matières ont une influence extrêmement faible, et la main-d'œuvre influe au maximum (Figure 31).

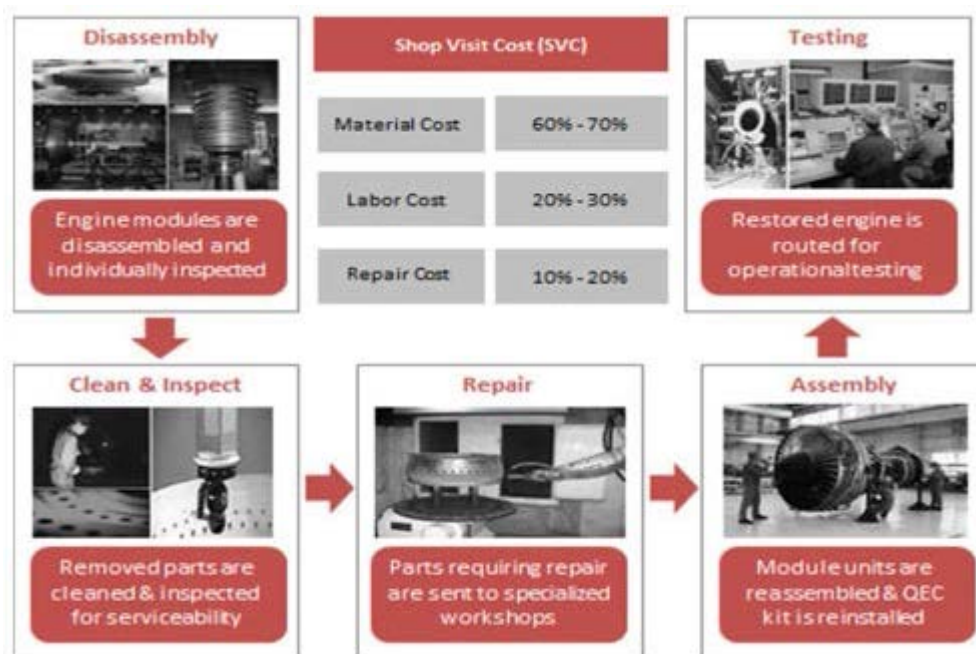


Figure 31. Répartition des coûts de maintenance-moteurs [SA-01]

### 6.1.3. Enjeux et prérogatives de la fonction maintenance

Les enjeux de la maintenance peuvent être discutés suivant plusieurs points de vue.

D'abord quel que soit le secteur, les équipements industriels sont de plus en plus complexes. Ils exigent donc une compétence en maintenance accrue. Ensuite, l'entreprise évolue dans un environnement

concurrentiel fort et les préoccupations financières sont très prononcées. La maintenance n'échappe ainsi pas à la règle de réduction des coûts. A un autre niveau, depuis quelques années, les responsables industriels font face à des exigences environnementales et sociétales plus marquées. Il n'est plus suffisant de se satisfaire d'une performance technique et économique, mais il devient nécessaire, voire obligatoire de prendre en compte les contraintes environnementales. A ceci s'ajoute le respect de la dignité humaine qui constitue une contrainte sociale. Ces derniers aspects ont récemment conduit à l'élaboration de textes de loi qui incitent fortement les entreprises à intégrer la notion de développement durable dans leur stratégie. Cela se traduit concrètement par la recherche d'une triple performance : certes le rendement de l'entreprise reste indispensable, mais s'ajoutent de nouvelles exigences sur le plan humain/social et environnemental. Les prérogatives de la fonction de maintenance se sont ainsi étendues et elle a dû évoluer au regard des enjeux croissants :

- Elle vise à augmenter la disponibilité des équipements tout en réduisant les coûts directs d'exploitation (technique et économique)
- Elle doit assurer un fonctionnement sûr des équipements, c'est-à-dire permettre d'éviter les accidents jugés néfastes pour l'environnement (environnemental)
- Elle est garante de conditions de travail satisfaisantes et de la sécurité des hommes (social)

Compte tenu des exigences toujours accrues, les coûts de maintenance ont augmenté rapidement au cours des dernières années. A titre d'exemple, on estime que les coûts de maintenance aux Etats-Unis étaient de 200 milliards de dollars en 1979 et qu'ils ont subi une croissance de l'ordre de 10 à 15% dans les années qui suivirent. Une partie importante de ce coût de maintenance pourrait pourtant être évitée : une mauvaise planification se traduit par du gaspillage en heures supplémentaires de maintenance et cela potentiellement sur des équipements qui n'ont pas un grand rôle dans la continuité de la production. Cependant, cette augmentation des coûts ne justifie pas à elle seule le besoin de remettre en cause les approches traditionnelles de maintenance.

D'abord, les systèmes de production évoluent en permanence et de nouvelles technologies sont apparues notamment du fait de l'automatisation (les machines pouvant assurer la production sans intervention humaine). Ensuite, les entreprises cherchent davantage à adapter rapidement la quantité et la qualité de la production en fonction de la variation de la demande des clients, ce qui nécessite un haut niveau de flexibilité des équipements industriels. Par conséquent, même si l'activité de maintenance est aujourd'hui considérée comme une activité à part entière, les entreprises n'hésitent plus à l'externaliser afin de bénéficier des compétences métiers fortes de prestataires de service. Cette évolution est en grande partie due au développement des sciences et technologies de l'information et de la communication.

Les activités de maintenance dans le secteur aéronautique font face à ces mêmes enjeux. Dans le domaine de la propulsion, les nouvelles générations de moteurs sont développées en recherchant :

- Une plus faible consommation de carburant,
- Une réduction du bruit et des émissions,
- Des coûts de maintenance moins élevés,
- Une fiabilité accrue,
- Une maturité plus rapide,

Ces nouvelles générations nécessitent le développement de systèmes de pronostics avancés et de supervision de leur santé, associés à des outils avancés de management de la prévision et de gestion de la supply chain, ainsi que des systèmes de management amélioratif du cycle de vie du produit. C'est sur cet axe que mes travaux se sont orientés.

#### 6.1.4. Activités de recherche et réalisations

En France, ces besoins autour de la propulsion du futur ont par exemple été déclinés par le Conseil Orientation de la Recherche en Aéronautique (CORAC) autour de la plateforme de Démonstration EPICE (Ensemble Propulsif Intégré avec Composite pour l'Environnement), comme l'illustre la Figure 32.

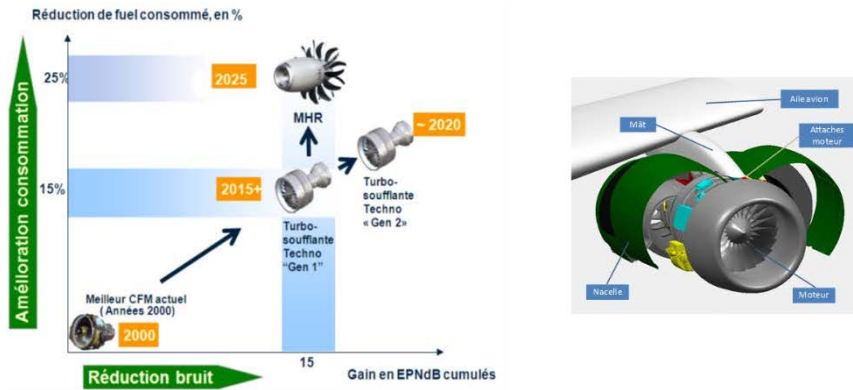


Figure 32. Plateforme de démonstration EPICE

EPICE a permis la maturation plus rapide de plusieurs technologies autour du système propulsif, dont la récupération d'énergie et l'introduction d'un système de surveillance de santé Nacelle et système d'attache. Ce projet m'a permis de mener des actions de recherche en collaboration avec le LGEF (PJ Cottinet) sur la récupération d'énergie ambiante. Ces actions ont cherché à utiliser des matériaux électroactifs afin de pouvoir convertir l'énergie ambiante (vibrations, chaleur...) sous forme électrique, permettant de disposer d'un microgénérateur apte à alimenter des dispositifs électroniques. L'optimisation de ces microgénérateurs, que ce soit en termes de puissance récupérée ou d'indépendance à la charge ou à la fréquence, a également été abordée lors du projet par l'utilisation de techniques non-linéaires simples issues des travaux de recherche du LGEF. Le projet a fait l'objet de deux présentations lors de conférences internationales [CIA-1], [CEA-4].



Figure 33. Récupérateurs thermique et vibratoire sur attache moteur

Les microgénérateurs devaient être capables d'alimenter un module de contrôle de santé (TAG RFID). Plusieurs modules ont été réalisés :

- Microgénérateur piézoélectrique pour la conversion des vibrations du système d'attache moteur,
- Microgénérateur thermoélectrique pour la conversion des gradients de température du système d'attache moteur,
- Micro-générateurs pour structure tournante piézoélectrique, et/ou magnétique pour intégration au roulement. De par sa nature le mouvement à bille est sujet à des mouvements de rotation qu'il est possible de convertir en une énergie électrique. Pour cela différentes



stratégies peuvent être envisagées. Les micro-générateurs peuvent être implémentés sur l'axe ou sur la bague en rotation.

La Figure 34 illustre de façon schématique une structure de micro-générateur. Le principe consiste à exploiter les accélérations subies par des poutres piézoélectriques lorsque l'ensemble est soumis à un mouvement de rotation. Cela engendre une résonance des poutres sur leur mode propre. Les masses sismiques permettent d'augmenter les déflexions de la structure.

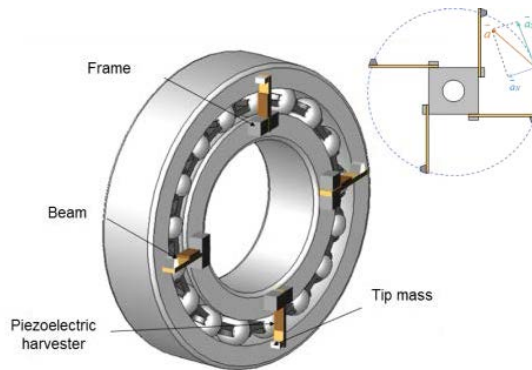


Figure 34. Concept de récupérateur

Un prototype de preuve de concept a été réalisé et évalué.

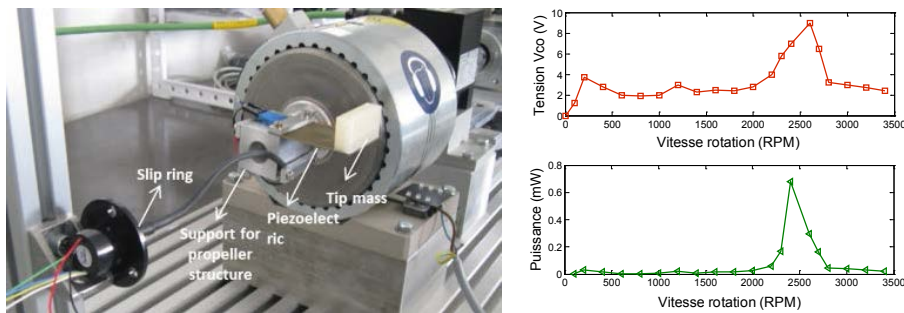


Figure 35. Récupérateur piézoélectrique sur machine tournante

Un autre démonstrateur a été réalisé. Un aimant est placé sur la partie tournante. Il exerce un effort magnétique sur l'élément piézoélectrique lorsqu'il passe en vis-à-vis en sollicitant les modes propres de cette dernière (Figure 35, Figure 36).

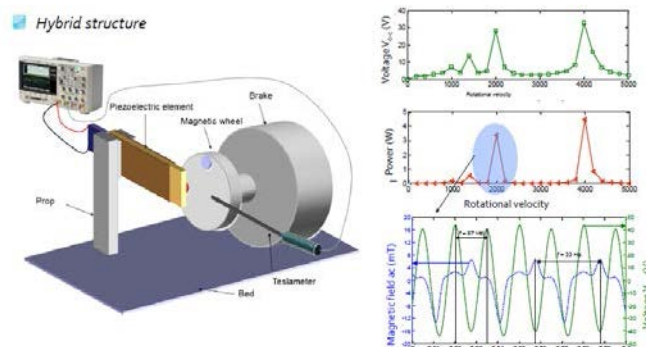


Figure 36. Récupérateur piezo-magnétique

Ces générateurs ont fait l'objet d'une évaluation complète par rapport à la puissance disponible en sortie et à la vitesse de rotation.

Initialement appliqué aux matériaux piézoélectriques, cette thématique a été élargie aux systèmes électromagnétiques et a fait l'objet de la réalisation d'un démonstrateur en collaboration avec M Lallart (Figure 37).

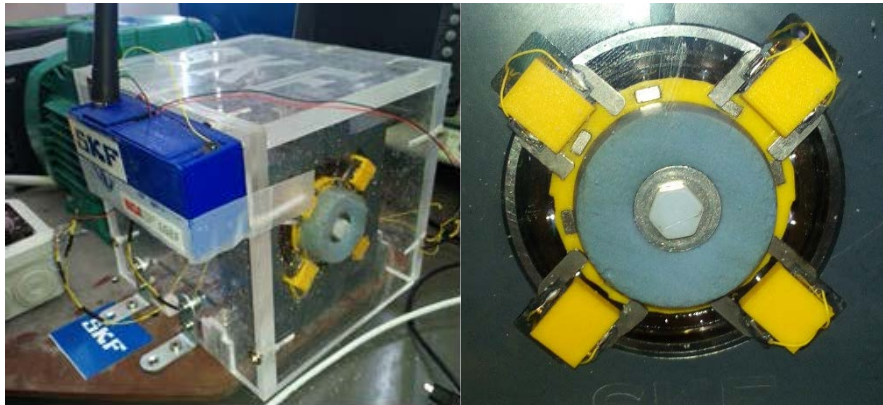


Figure 37. Générateur électromagnétique intégré à une structure de roulement

Ce partenariat de recherche entre SKF et le LGEF a également débouché sur un projet commun dans le cadre d'un appel de l'ANR, pour lequel le LGEF est porteur côté français (partenaires : LGEF (académique - France), NTU (académique - Taïwan), LTDS (académique - France), NTHU (académique - Taïwan), SimTrans (industriel-Taïwan), SKF (industriel - France)). Ce dernier projet vise en l'élaboration d'un microgénérateur complet, incluant une optimisation globale du système allant de l'aspect matériaux (fabrication d'un transducteur millimétrique performant à partir de techniques MEMS) à l'aspect électronique (interface de récupération non-linéaire), en passant par le domaine mécanique, pour lequel l'inclusion et l'étude de non-linéarités dans l'optique d'augmenter la bande passante du système sont envisagés. Le projet inclut également une démonstration de dispositif autoalimenté, avec le développement d'un capteur de pression autoalimenté et de roulements intelligents.

#### 6.1.5. Problématiques du processus de PHM autour du roulement intelligent

La réalisation d'un processus complet de PHM autonome précis et à horizon temporel significatif nécessite de relever différents défis scientifiques et technologiques. Ces défis sont liés aux cas considérés d'application ou à la position du roulement dans la transmission, à la qualité des données à acquérir et traiter et à la granularité de la modélisation de l'état de santé du roulement concerné. Quelques-uns de ces défis sont décrits dans la littérature scientifique [AHSZ-01], [AKSJ-01], [JZS-01], [AFN-01] ils sont résumés ci-dessous.

1. Prise en compte des données de fiabilité prévisionnelle et du retour d'expérience : lors de l'exploitation d'une machine, une quantité importante de données est enregistrée par des systèmes de surveillance dédiés, des opérateurs et du personnel de maintenance. Ces données peuvent être utilisées pour améliorer la connaissance a priori de la machine et pour corriger ou affiner les modèles de comportement établis. Elles permettent également de mieux comprendre le comportement du système et ses interactions avec l'environnement dans lequel il évolue et enfin, de connaître ses limites.
2. Pertinence des données : la qualité des résultats du processus de PHM dépend fortement de la qualité des données utilisées à l'entrée des algorithmes développés. Les données, qu'elles soient issues de capteurs ou enregistrées par des opérateurs, doivent être sélectionnées pour être représentatives de la dynamique de la machine et permettre le suivi de son état de santé tout au long de sa durée de

vie. Les données doivent également être complètes, exemptes de toutes altérations et prêtes au traitement. L'intégration d'un système de mesure au composant présente de nombreux avantages garantissant la consistance des données.

3. Prise en compte de conditions de fonctionnement variables : dans la pratique, il n'est pas rare qu'une machine tournante, par exemple, change de vitesse, de couple, d'environnement ou de contexte d'utilisation pendant son fonctionnement. Ainsi, le passage d'une vitesse à une autre entraîne des variations de charge sur le rotor, des variations de charge sur les roulements, de la surchauffe et d'autres phénomènes qui, s'ils ne sont pas pris en compte, peuvent compromettre la précision du diagnostic et du pronostic. La surveillance des conditions opératoires est par conséquent vitale

4. Prise en compte des interventions de maintenance : lors d'une intervention de maintenance ou d'une inspection, les systèmes industriels peuvent subir des réparations ou être remis dans un état de fonctionnement qui n'est ni dégradé ni défaillant. Or, ce nouvel état est différent de l'état du système au moment de son acquisition (mode de fonctionnement nominal). L'intervention, ou l'inspection, modifie l'état du système, mais de quelle façon ? Il faut donc élaborer un modèle de diagnostic et de pronostic qui prenne en compte les interventions subies par le système afin d'avoir une prédiction actualisée et précise de la durée de fonctionnement avant défaillance.

5. Modélisation du comportement du système : pour détecter à temps les premiers signes précurseurs d'une dégradation, localiser le ou les composants responsables et réaliser un pronostic précis, il est indispensable de construire des modèles de comportement du système et de sa dégradation les plus fidèles possibles.

6. Prédiction précise de durées de fonctionnement avant défaillance et à horizons temporels significatifs : pour réaliser un bon pronostic, le modèle de comportement à lui seul ne suffit pas. Il doit être complété par deux aspects : le premier concerne la mise en place de méthodes de détection de l'initiation des dégradations (chaîne de mesure et diagnostic) et le second est lié à la définition de seuils d'alarme. Ces seuils peuvent être de différents niveaux correspondant à différentes amplitudes de la dégradation (en allant des modes dégradés aux modes défaillants). Une fois ces deux aspects traités, la prédiction de la durée de fonctionnement peut être estimée en faisant des simulations du modèle et en comparant sa sortie aux seuils définis. Un défaut en surface sur une piste n'ira pas forcément jusqu'à un écaillage.

## 6.2. Capteurs et roulements capteur, transmission sans fil et traitement du signal : vers le roulement smart

### 6.2.1. Contexte

La mise en place d'une surveillance sur une machine nécessite la constitution d'une chaîne de mesure intégrant un ou plusieurs capteurs. Le capteur occupe donc une place importante dans le processus de surveillance de santé et nécessite donc de réaliser également des travaux de recherche. Le capteur a désormais un rôle étendu dans l'Industrie du Futur portée par la transition numérique et l'internet des objets. Il collecte, au cœur des équipements mécaniques, les données nécessaires à la surveillance des processus industriels et au développement d'une offre de services numériques dans la production industrielle. Les capteurs doivent être appréhendés à travers les usages qui sont faits des données qu'ils permettent de produire, car seul l'usage produit une valeur économique. Les nouveaux usages des capteurs structurent et orientent les nouveaux besoins industriels vers une plus grande coopération entre collecte, analyse et traitement des données et vers une plus grande connectivité. Cette dernière est désormais accessible grâce au développement combiné des technologies de

communication, des équipements intelligents fixes ou mobiles et des plateformes numériques. Elle conserve un haut niveau d'exigences en matière d'industrialisation, de fiabilité, de disponibilité et de durabilité s'agissant d'équipements dont la durée de vie est en général supérieure à 15 ans.

On observe une croissance très importante du marché des capteurs, notamment dans l'automobile et l'aéronautique. Le développement de machines mobiles autonomes (voitures sans conducteurs, drones, robots d'assistance, ...) et la nécessité d'avoir des machines flexibles et adaptatives (aux productions, aux opérateurs...) génèrent une demande et donc une offre croissantes en capteurs.

Sur le plan technologique, les derniers grands progrès dans les capteurs (miniaturisation, intelligence, communication, réduction de la consommation d'énergie/autonomie) grâce aux technologies de la microélectronique augmentent les possibilités d'application. La multiplication des capteurs dans tous les secteurs génère un besoin d'autonomie de ces capteurs, qui doivent puiser leur énergie dans leur environnement, et nécessite d'importants moyens de traitement, stockage et sécurisation des données.

Les capteurs virtuels permettent d'optimiser le nombre d'informations extraites d'un réseau de capteurs donné. Les données manquantes nécessaires à l'établissement de conditions opératoires sont reconstruites hors ligne à l'aide de techniques de reconstruction d'états (observateurs, filtres de Kalman...) issues du domaine de l'automatique, et parfois désignées sous le terme générique de capteurs virtuels.

Des capteurs communicants commencent à être intégrés d'origine dans des composants (roulements) et le sont toujours plus sur machines. Il s'agit de la première étape pour intégrer une fonction surveillance et évoluer vers la maintenance conditionnée à l'état de la machine (Figure 38).

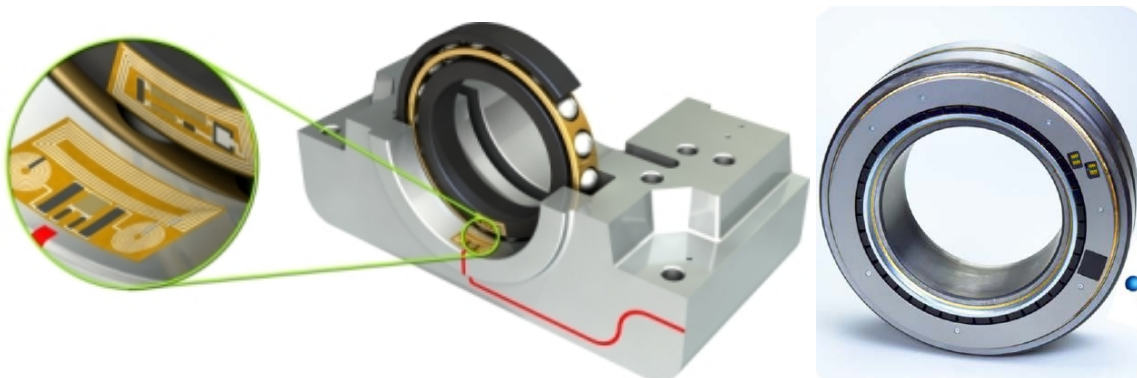


Figure 38. Apparition des capteurs intégrés aux roulements

Dans ces cas, les buts recherchés par l'intégration de capteurs sur composants sont :

- D'instrumenter afin d'établir les conditions opératoires ou profil de mission du composant dans la transmission et de définir des cas spécifiques,
- De doter les dispositifs à embarquer sur les roulement d'un niveau d'intelligence à l'aide de transducteur fortement intégré.

Les défis autour du développement du roulement intelligent s'articulent autour du triptyque performance-fiabilité-intégration. A plus long terme, l'objectif est de parvenir à s'affranchir également de l'aspect « liaison filaire ». Dans ce cadre, les technologies à développer et toujours à intégrer dans

un environnement mécanique sévère tout en conservant un fort degré de fiabilité, sont liées à l'autonomie en alimentation (génération et éventuellement stockage), ainsi qu'à la communication des données mesurées (Figure 39).

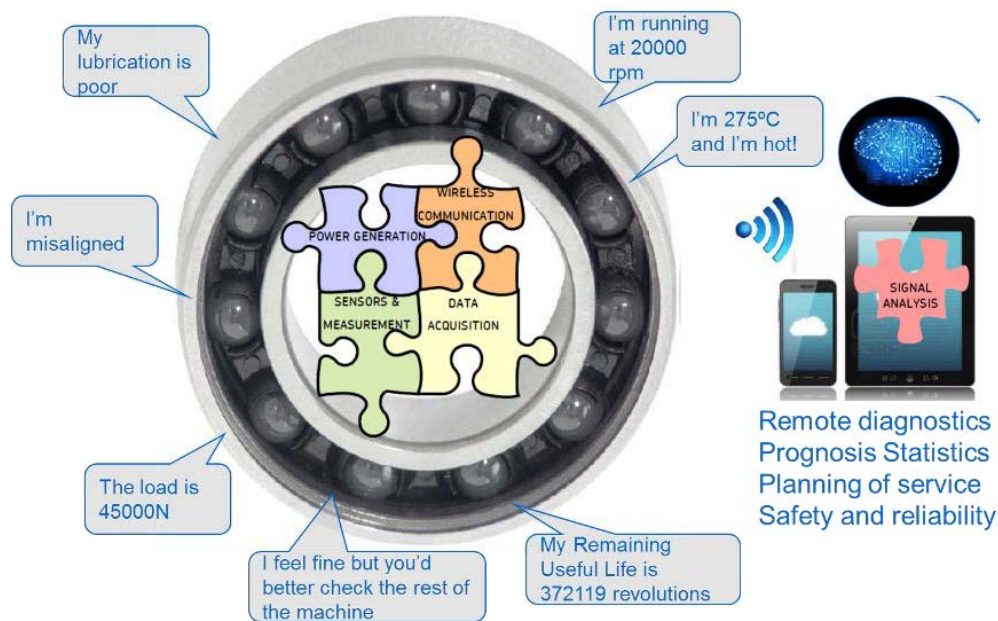


Figure 39. Le roulement intelligent

La table suivante établit la distinction entre composant instrumenté, composant smart et composant intelligent par le contenu fonctionnel intégré.

	Focus Recherche		
	instrumenté	Smart	Intelligent
Capteurs et mesures	Oui	Oui	Oui
Génération et gestion autonome de l'énergie	Pas autonome	Autonome	Autonome
Traitement du signal/ algorithmes embarqués	Basique	Avancé	Auto-apprentissage
Connectivité/ sans fil	Non	Oui	Oui
Auto-Adaptatif	Non	Non	Oui

Tableau 1. Contenu fonctionnel des capteurs sur composants

Le roulement intelligent intègre plusieurs briques technologiques (Figure 40) :

1. Chaines de mesure,
2. Production, gestion et stockage de l'énergie,
3. Traitement du signal et algorithme.

#### 4. Connectiv /transmission sans fil

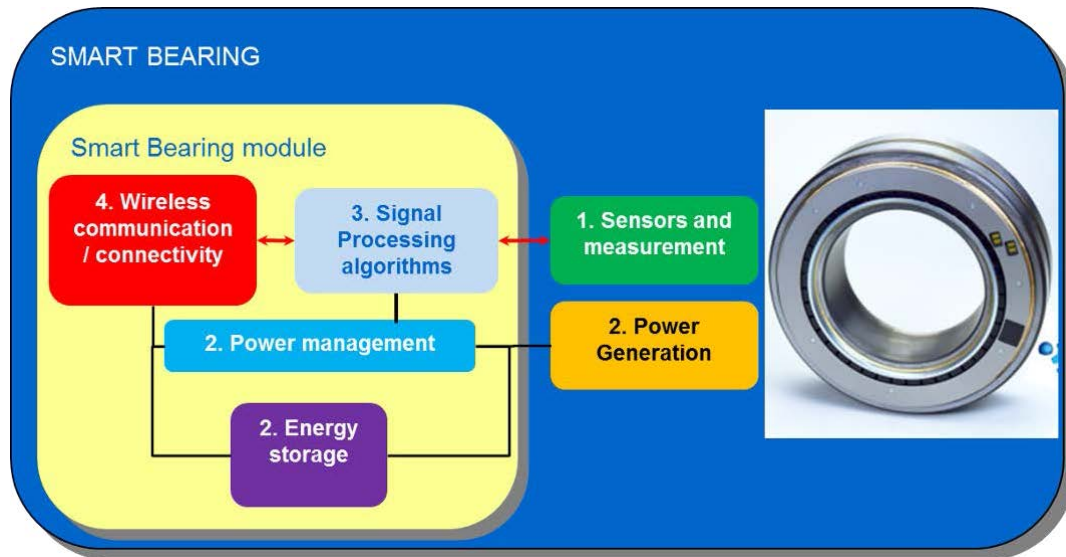


Figure 40. Architecture du roulement smart

Le détail de l'état de l'art sur chaque sous-fonction du système sera détaillé en partie 2.

### 6.2.2. Problématiques autour du roulement intelligent

La finalité du roulement smart est d'optimiser la maintenance de systèmes aéronautiques, mettant en œuvre de très nombreux objets hétérogènes. Parmi les challenges identifiés, il s'agit :

- 1./ D'équiper, dans des conditions économiques acceptables, le plus grand nombre possible de roulements dont on souhaite relever les grandeurs mécaniques (vibration, effort) ;
- 2./ De doter les objets d'une capacité à transmettre les données dans des situations variées d'enclavement, et de couverture ;
- 3./ De doter les composants mécaniques d'une fonction propre de collecte d'énergie destinée à alimenter la capacité de communiquer ainsi que le traitement local de l'information ;
- 4./ D'assurer un fonctionnement fiable, notamment au niveau énergétique, par une cohérence entre l'énergie disponible et celle nécessaire à l'accomplissement de la fonction désirée.

Pour y parvenir, l'association du LGEF (Laboratoire) et de SKF-Aerospace permet de disposer d'approches croisées entre disciplines permettant successivement :

- d'instrumenter des environnements et de définir des cas spécifiques (SKF-Aerospace, LGEF)
- de doter les dispositifs à embarquer sur les roulement d'un niveau d'intelligence à l'aide de transducteur fortement intégré (LGEF) ;
- de doter les dispositifs à embarquer sur les objets d'une capacité à produire de l'énergie à partir des sources placées dans leur environnement (LGEF) ;
- de trouver le moyen de produire cette énergie dans un encombrement réduit, selon des modalités adaptables à des environnements variables (LGEF, SKF-Aerospace) ;
- d'harmoniser l'activité de calcul et de radiocommunication avec l'énergie produite de sorte que, continûment ou périodiquement, les dispositifs puissent fonctionner en autarcie (LGEF) ;
- de doter les dispositifs d'une capacité d'auto-organisation pour former un réseau local ad hoc le plus efficace possible (acheminement des informations à moindre coût énergétique) (SKF-Aerospace).

#### **Capacité à produire de l'énergie**

Au vu des applications roulements il est possible d'utiliser pour rendre énergétiquement indépendant les systèmes deux types de gisements :

- vibratoire
- thermique

Dans le cas de l'énergie vibratoire, la réalisation de micro-générateurs à l'aide de mini machines à courant continu est la plus répandue. L'avantage certain de cette solution est la maturité technologique éprouvée depuis plus de 40 ans. Par contre, cela pose des problèmes en termes d'intégration de compatibilité électromagnétique sans oublier de vieillissement accéléré du roulement dans certains cas. En effet, pour certaines applications, les roulements sont disposés dans des systèmes lubrifiés où des particules magnétiques peuvent être présentes. Or, le champ magnétique créé par les « dynamos » risque de provoquer un agglomérat des particules magnétiques près du roulement d'où une usure prématurée. Les travaux s'orienteront autour de la conception d'architectures nécessitant un couplage magnétique faible tout en garantissant un niveau de conversion importante sur une large

gamme de vitesse. Un autre challenge est de disposer de micro-générateurs pouvant délivrer un niveau de puissance suffisant pour alimenter la future électronique développée sur une large gamme de vitesse. Pour cela, différents designs seront simulés et caractérisés grâce à la réalisation de prototype.

Dans le but de chercher des micro-générateurs complémentaires, les matériaux piézoélectriques seront étudiés, avec un travail amont concernant le développement d'architectures capables de convertir les mouvements de rotation en électricité. La technologie piézoélectrique semble intéresser les acteurs du marché avec un certain nombre d'actions en cours autour de cette thématique. Elle dispose d'avantages comme : une bonne tenue des matériaux de conversion, une intégration facile, et un certain retour d'expérience depuis les dix dernières années. Des travaux préliminaires ont déjà été lancés sur cet axe avec le développement d'architectures spécifiques permettant de délivrer 3mW pour certaines conditions d'utilisation.

Pour l'énergie thermique, les systèmes fonctionnant sur le principe de l'effet Seebeck sont actuellement les plus aboutis avec la réalisation de démonstrateurs fonctionnels. Le challenge principal consiste à intégrer le module thermoélectrique en limitant le plus possible la surface du dissipateur. En effet, actuellement, le volume du dissipateur pour maintenir un gradient thermique est 100 fois plus important que le volume du module thermoélectrique. Pour répondre à cette problématique, de la modélisation par éléments finis couplée à la mise en œuvre de prototypes sera effectuée. D'un point de vue plus prospectif, il semble intéressant d'étudier la possibilité d'imprimer un module thermoélectrique directement sur le roulement, permettant un couplage direct avec la structure. Si les propriétés énergétiques ne correspondent aux besoins applicatifs, les travaux permettront de prouver le concept et de disposer de capteurs de température intégrés.

De façon générale, le développement et la conception de systèmes autonomes pour les roulements sont très récents, mais beaucoup de points restent à éclaircir. Cela passera par une recherche en amont (recherche de nouveaux procédés de conversion, développement d'une électronique dédiée, etc.) sans oublier la partie applicative pour montrer la rupture technologique qu'apportent ces nouveaux systèmes.

Enfin, les considérations du microgénérateur seul ne sont pas suffisantes. En effet, la connaissance des contraintes énergétiques, notamment en termes de bilan énergétiques entre l'énergie récupéré est nécessaire à l'accomplissement de la fonction. Ainsi, il convient de repenser totalement l'application et l'implémentation des fonctions désirées, afin d'avoir un système autoalimenté viable. Une telle nécessité impose donc de réelles synergies et harmonies entre les différents acteurs du marché, chacun ayant son domaine d'expertise propre.

### **Connectivité et communication sans fil**

La transition numérique portée par l'internet des objets offre l'opportunité inédite aux fabricants de produits industriels de rééquilibrer leur modèle économique vers les services.

L'objet connecté crée un lien direct avec l'utilisateur final qui permet de mieux connaître ses besoins, l'usage fait des produits, et constitue une source d'apprentissage essentielle pour innover dans les services. L'objet connecté produit des données qui font sa valeur ajoutée, mais la valeur économique de ces données réside uniquement dans la façon dont on les utilise. Par conséquent, dans l'internet des objets, les fabricants d'équipements industriels sont incités à exploiter eux-mêmes les données que leurs produits permettent de générer, sous forme de services numériques rendus à l'utilisateur final. De là, ils pourront se repositionner dans la chaîne de valeur face aux offreurs de service et prendre une part de la valeur économique produite par les objets connectés. Les deux cas d'usage de l'internet des objets les plus prometteurs pour les entreprises industrielles en termes de perspectives



de croissance sont la maintenance prévisionnelle et l'optimisation de l'efficacité des systèmes de production industriels. Les technologies de l'internet des objets permettront ainsi demain de collecter, d'analyser et de traiter avec rapidité et efficacité les masses de données générées par les applications de surveillance, dans une logique de services. Le développement des services dans l'internet des objets est porté par les plateformes numériques, ou cloud, dédiées au stockage, à l'analyse et au traitement des données massives produites par les objets connectés. Le cloud est double. C'est à la fois une plateforme de développement d'applications numériques pour les entreprises industrielles souhaitant proposer des services. C'est aussi une plateforme de services en ligne accessible à l'utilisateur final depuis un simple navigateur internet, un poste de supervision ou un terminal mobile. Les technologies de l'internet des objets vont impacter considérablement l'architecture des systèmes de surveillance dans les années à venir. Les objets connectés auront pour rôle de collecter des données en continu et de les acheminer, via des réseaux de télécommunications, vers les plateformes numériques où elles seront traitées en temps différé. Des moyens dématérialisés d'analyse et de traitement de ces données, aux capacités inédites, accessibles en ligne par l'utilisateur final via un service individualisé de surveillance, auront pour rôle d'anticiper les besoins de ce dernier et de l'accompagner dans sa prise de décision.

La plupart des systèmes industriels de surveillance, qu'ils soient déployés à l'échelle d'un équipement, d'une installation industrielle complète ou de flotte d'équipements multi sites, sont potentiellement concernés par cette mutation à venir. Les systèmes de contrôle en continu pour lesquels la prise de décision doit suivre de façon quasi instantanée la détection du défaut constituent la seule exception.

Les moyens de collecte de données connectés utilisés pour la surveillance sont constitués de capteurs et systèmes d'acquisition, de traitement et d'enregistrement des signaux de mesure, reliés aux plateformes numériques via des réseaux de télécommunications. Les besoins de connectivité découlent de plusieurs critères.

- La stratégie de surveillance à mettre en œuvre,
- Les grandeurs physiques à suivre au cours du temps,
- Les contraintes d'acquisition des signaux de mesure (fréquence, synchronisation de voies de mesure, latence dans les échanges de données),
- Le volume de données échangées par jour,
- Les caractéristiques des roulements à surveiller, leurs conditions de fonctionnement et l'environnement dans lequel ils sont exploités.

Il existe par conséquent une multitude de besoins de connectivité à satisfaire dans l'industrie et un foisonnement de technologies pour répondre aux exigences industrielles (fiabilité, disponibilité, protection des données échangées...).

Les réseaux de communication filaires demeurent les solutions de connectivité les plus sûres et les plus aptes à véhiculer de très gros volumes de données. Un fort engouement est néanmoins observé dans l'industrie pour les technologies de connectivité sans fil à travers les réseaux LAN (Local Area Network) et LPWAN (Low-Power Wide Area Network). Ces derniers sont pensés pour les objets connectés qui échangent de très petits volumes de données par jour, requièrent de faibles débits de transmission, sont alimentés par une pile ou batterie et qui doivent par conséquent consommer très peu d'énergie pour disposer de la plus grande autonomie de fonctionnement possible. Le déploiement de capteurs autonomes communicants reste néanmoins limité à ce stade à des expérimentations industrielles menées à petite échelle.

Malgré tout, la croissance de l'internet des objets dans l'industrie devrait majoritairement être portée dans les années à venir par l'utilisation de technologies sans fil, mobiles, à faible consommation d'énergie. Cette dernière est obtenue grâce à la mise en œuvre de technologies à très faible consommation d'énergie : un réseau de télécommunication LPWAN (LORA) à longue portée ou technologie de communication RFID.

### 6.2.3. Activités de recherche et réalisations

L'intégration de fonctions de mesure et de communication à l'intérieur des produits industriels a amené SKF à développer également des solutions de mesure sans pile et sans fils basées sur des architectures minimalistes et peu intrusives, permettant de suivre l'évolution en continu in situ des paramètres mécaniques tels que la déformation. Le développement de capteurs sans fil et sans pile est désormais accessible grâce au développement des télémesures RFID. La RFID à 13,56 MHz utilise le couplage inductif pour alimenter la télémesure RFID et véhiculer les informations échangées entre l'interrogateur et le transpondeur, selon des protocoles de communication normalisés. La télémesure RFID se présente sous la forme d'un circuit intégré en technologie CMS, doté de fonctions d'alimentation, de conditionnement de capteur résistif, d'acquisition et conversion numérique du signal de mesure.

Les télémesures RFID sont compatibles avec la plupart des capteurs résistifs du commerce, sous réserve que leur consommation soit compatible avec la puissance de télé alimentation disponible. Les capteurs peuvent être conditionnés de différentes façons, du montage potentiométrique au montage en pont complet, avec un câblage en 2, 3 ou 4 fils.

Le tag RFID à circuits intégrés est le système le plus utilisé sur le marché actuel. Il se compose d'une antenne et d'un circuit intégré plus ou moins complexe (simple machine d'état ou véritable microcontrôleur).

Deux systèmes passifs ont fait l'objet de développement :

- Un TAG à microcontrôleur en UHF, plateforme de monitoring du projet EPICE
- Un TAG en couplage électromagnétique, intégré à une cage de roulement pour des mesures de température par télémétrie

#### TAG à microcontrôleur en UHF [CIA-4]

L'architecture du TAG proposé pour l'application est la suivante (Figure 41) :

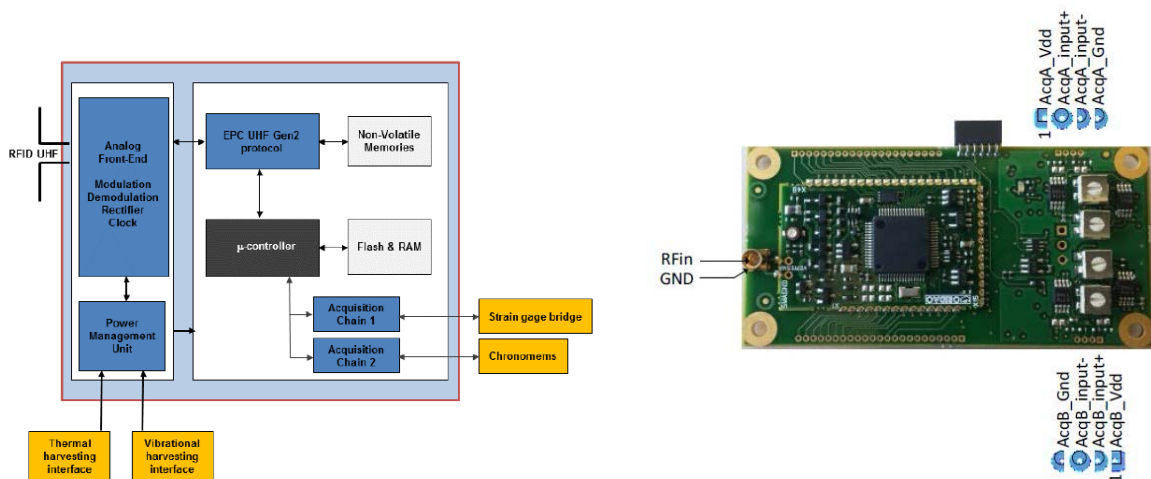


Figure 41. Tag UHF à microcontrôleur

- Analog front-end :

Ce bloc démodule le signal radio fourni par la lectrice, module le signal de backscattering du tag, rectifie le signal RF de l'antenne pour alimenter la puce en mode autonome.

Il fournit également des informations sur le signal au microcontrôleur telles que :

- La puissance RF disponible, ce qui permet d'informer le microcontrôleur qu'il est possible de s'alimenter sur la liaison radio.
- Les données issues de la démodulation, conformément au protocole EPC UHF gen2.

- Microcontrôleur :

Il décode les données RF suivant la norme EPC UHF et dialogue avec la lectrice. Il gère le protocole de mesure des convertisseurs, l'état du système en fonction de l'alimentation, le filtrage et le traitement du signal.

- Acquisition :

Le TAG embarque deux chaînes de mesure intégrant un amplificateur d'instrumentation. Elles s'interfacent sur des capteurs résistifs. Ces chaînes ont été optimisées afin d'offrir la consommation la plus basse possible, 12 bits de résolution, et une bonne stabilité de la mesure sur la plage de température.

- Gestion de l'énergie :

Ce bloc fournit l'indication de puissance disponible au microcontrôleur. Il génère l'ensemble des tensions nécessaires au système.

Les blocs ont fait l'objet d'essais de validation du laboratoire jusqu'à l'application finale, les résultats sont présentés au chapitre 4.

### **TAG en couplage électromagnétique [CIA-5]**

Les pertes de puissance liées aux effets de traîne du lubrifiant sur les éléments roulants au sein d'un roulement sont difficiles à prédire du fait de la complexité du phénomène de lubrification dans le roulement. Ces pertes sont en général mesurées par expérimentation, ce qui rend l'extrapolation vers d'autre application difficile. Les flux de chaleurs au sein d'un roulement monté comportent plusieurs interfaces. Les mesures de températures peuvent être améliorées par une mesure sur les bagues du roulement ou plus directement sur la cage, en contact avec les éléments roulants générant la chaleur par friction.

Le système de détection fonctionne sur la base d'un oscillateur électrique et de ses chutes de fréquence. Un oscillateur électrique en fonctionnement libre émet de l'énergie à travers une bobine (circuit primaire). Quand une autre bobine et circuit de condensateur (circuit secondaire) est placé à côté du primaire, le circuit secondaire commence à puiser de l'énergie à partir du primaire à une certaine fréquence, qui dépend de la valeur du condensateur du circuit secondaire. Le détail sera présenté au chapitre 4 du présent document. En sélectionnant un condensateur sensible à la température, la température du circuit secondaire peut être mesurée à partir du circuit primaire. Un prototype a été réalisé avec le circuit secondaire et intégré dans la cage, tandis que la flasque du roulement est utilisée comme bobine du circuit primaire (Figure 42).



Figure 42. Inductive tag

Le prototype a été évalué et sa fonctionnalité a été démontrée par essais. L'ensemble des paramètres de design ont été identifiés dans cette étude, à savoir, influence des diamètres des circuits, nombre de tours bobine, valeur de capacité, fréquence d'interrogation du circuit secondaire.

## 7. Activités pédagogiques et autres

Je réalise une intervention en 5<sup>e</sup> année du Département de Génie Electrique (niveau M2) autour de la surveillance de santé des machines depuis 2015. Cette intervention d'une durée de 6 heures présente les applications industrielles de SKF sur la surveillance vibratoire des roulements à partir d'exemples réels d'installation, ainsi qu'une synthèse des activités de recherche autour du roulement intelligent.

### Autres activités et activités administratives

J'ai pu mettre à profit mon expérience dans d'autres activités. En addition aux actions de recherche et d'enseignements, d'autres activités faisant appel à mon expertise ont également été exercées lors de ma carrière. Dans un premier temps, relectures de manuscrits soumis à des Revues Internationales à Comité de Lecture ont été faites. J'ai aussi participé à l'évaluation de propositions dans le cadre de l'appel à projet du programme Européen Cleansky 2. Enfin, j'ai également présenté des publications lors de trois conférences (deux internationales et une nationales).

Je suis également membre industriel du conseil d'administration de l'ESISAR (groupe Grenoble-INP) et représentant de SKF lors des sessions du syndicat de la mécatronique ARTEMA.

## 8. Liste des publications

### Revue Internationales à Comité de Lecture

[RICL-1] Progress in Aerospace Sciences Volume 79, November 2015, Pages 147–157, Review on energy harvesting for structural health monitoring in aeronautical applications (doi: 10.1016/j.paerosci.2015.10.001)

[RICL-2] Characterization and modeling of magnetic domain wall dynamics using reconstituted hysteresis loops from Barkhausen noise /Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 432 (2017)

### Conférences Internationales avec Actes

[CIA-1] 5th international conference on Recent Advances in Aerospace Actuation system (R3ASC12) EMA KEY COMPONENTS AND ASSOCIATED MONITORING

[CIA-2] 6th international conference on Recent Advances in Aerospace Actuation system (R3ASC14) The Internet of Things and the Future of Condition Monitoring: Mechatronic Technology Development for Aerospace and Industry Bearing Solutions

[CIA-3] 7th international conference on Recent Advances in Aerospace Actuation system (R3ASC16), A wireless rolling bearing cage temperature sensor for aerospace transmission diagnostic application (Poster Session)

[CIA-4] World Congress Condition Monitoring 2017 Energy harvesting for wireless and autonomous load monitoring sensors

[CIA-5] World Congress Condition Monitoring 2017 A wireless rolling bearing cage temperature sensor for aerospace transmission diagnostic application

[CIA-6] World Congress Condition Monitoring 2017 Characterisation and modelling of magnetic domain wall dynamics using reconstituted hysteresis loops from Barkhausen noise

#### **Conférences Européennes avec Actes**

[CEA-1] 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM14) Wireless and Autonomous Sensor for Strut Load Monitoring (HAL Id: hal-01021202)

[CEA-2] 2nd EUROPEAN CONFERENCE ON: IMPROVEMENT IN BEARING TECHNOLOGY THROUGH EUROPEAN RESEARCH COLLABORATION (iBETTER) A wireless rolling bearing cage temperature sensor for aerospace transmission diagnostic application

#### **Conférences Nationales sans Actes**

[CN-1] 7èmes Journées Nationales sur la Récupération et le Stockage d'Énergie (conférencier invité) IoT and future of conference monitoring : enabling Energy Harvesting for Intelligent Bearing solutions

#### **Brevets**

[Bre-1] DEVICE FOR MEASURING THE WEAR OF A BALL-AND-SOCKET JOINT, BALL-AND-SOCKET JOINT INCORPORATING SAID DEVICE AND METHOD FOR MEASURING THE WEAR OF SUCH A BALL-AND-SOCKET Publication number: 20150176638

[Bre-2] INDUCTOR BEARING Publication number: 20140333164

[Bre-3] BEARING, HOUSING INCLUDING A SET OF BEARINGS, ASSOCIATED METHOD AND COMPUTER PROGRAM Publication number: 20140169715

[Bre-4] BEARING CAGE WITH ANTENNA AND METHOD FOR DETECTING FAILURE OF A BEARING CAGE publication number: 1659434

## AVANT-PROPOS

A l'heure où la transformation digitale est au cœur des bouleversements qui touchent la plupart des secteurs industriels traditionnels, il est bon de reposer les problématiques récurrentes associées à l'observation et à la transmission de l'information. Avant de devenir virtuelle, toute information émane de la combinaison de phénomènes physiques concrets et connus, que les capteurs permettent de capturer en temps réel et de transmettre à d'autres systèmes capables d'analyser cette information.

Les capteurs permettent ainsi de faire parler des objets, des matériaux, des structures qui étaient jusqu'alors autant d'éléments passifs. Le développement exponentiel de l'internet des objets (IoT, Internet of Things) et la prolifération de ces objets passifs désormais connectés se traduisent par un marché des applications que permettent ces capteurs en pleine croissance. Logistique, maintenance aéronautique, voiture autonome, contrôle d'intégrité des aérostructures, médical... sont quelques exemples où la mise en œuvre de capteurs est la base de nouvelles offres de service, de solutions ou de modèles économiques. Toutefois, les systèmes existants sont confrontés à deux contraintes majeures pour permettre leurs applications industrielles : l'autonomie énergétique et les moyens de transmission de l'information captée. De plus, pour l'industrie aéronautique, s'ajoute une troisième contrainte : celle du poids. Plusieurs enjeux sont à considérer :

- Tout d'abord l'ubiquité. Les capteurs autonomes n'ont pas besoin d'être accessibles pour être maintenus ou réalimentés. Ainsi, ils peuvent être répartis dans les endroits les plus sensibles, même inaccessibles. Cela permet une meilleure couverture en capteurs de la structure à contrôler.
- Ensuite la permanence temporelle. Les capteurs autonomes sont actifs en permanence. Ceci permet d'imaginer de nouveaux scénarii d'applications où l'intégration de ces capteurs se fera au moment de la conception d'un programme (avion ou autre), car ces capteurs pourront avoir une durée de vie qui sera proche de celle de la plateforme.
- Les enjeux de sécurité. Plus de capteurs permettent une meilleure supervision des systèmes et ainsi une meilleure prévention des risques. Les plateformes augmentent donc leur capacité propre d'alerte en cas de défaillance.
- Enfin les nouveaux modèles économiques. Dès lors que ces capteurs autonomes peuvent être intégrés industriellement aux plateformes, la réduction des coûts de maintenance est une première avancée. En fonction des industries, de nouveaux modèles pourront être développés à base du suivi des états transmis par ces capteurs.

Afin de multiplier les champs d'applications pour les capteurs autonomes en énergie dans le domaine aéronautique, la recherche devra se poursuivre afin de pouvoir réduire le facteur poids des systèmes de récupération d'énergie à partir de l'environnement ambiant. Ceux-ci, en effet, doivent pouvoir apporter des rendements énergie produite/masse permettant leur prise en compte industrielle pour des coûts d'exploitation abordables.

Le travail décrit dans ce mémoire s'inscrit dans une démarche d'obtention d'un diplôme de Doctorat par validation des acquis de l'expérience. Il présente plusieurs années de travaux de recherche et développement autour de la réalisation d'un démonstrateur de roulement intelligent devant permettre la réalisation d'un processus de PHM autonome à partir de données issues de mesures embarquées.

Le mémoire est structuré en deux grandes parties. La première partie, appelée le roulement smart, présente une synthèse de la surveillance de santé des roulements à partir de la construction d'un

processus de PHM et les points technologiques clés associés. La deuxième partie présente des réalisations de démonstrateurs technologiques à partir de solutions qu'il est possible d'exploiter pour concevoir des capteurs autonomes communicant sans fil intégré à une structure de roulements à billes ou de composants mécaniques.

Le plan détaillé est le suivant :

## **Partie I : Le roulement smart**

**Le chapitre 1 : « Du condition monitoring vers le PHM des roulements »** adresse une comparaison entre les processus de Condition Based Maintenance (CBM), Structural health monitoring et Prognostic Health Monitoring (PHM). Un alignement entre ces processus permet de définir ensuite l'architecture fonctionnelle du roulement smart.

**Le chapitre 2 : « Application au contrôle de santé des roulements à billes »** réalise une synthèse sur la surveillance des roulements.

**Le chapitre 3 : « Fonctions mécatroniques intégrées aux roulements »** présente un état de l'art des différentes mesures existantes intégrés sur des roulements. Un focus sur la mesure d'effort est réalisé.

**Le chapitre 4 : « Vers le roulement autonome »** donne des exemples de récupérateurs d'énergie intégré aux structures de roulement à billes.

**Le chapitre 5 : « Synthèse sur le roulement smart »** conclut cette partie et présente les perspectives.

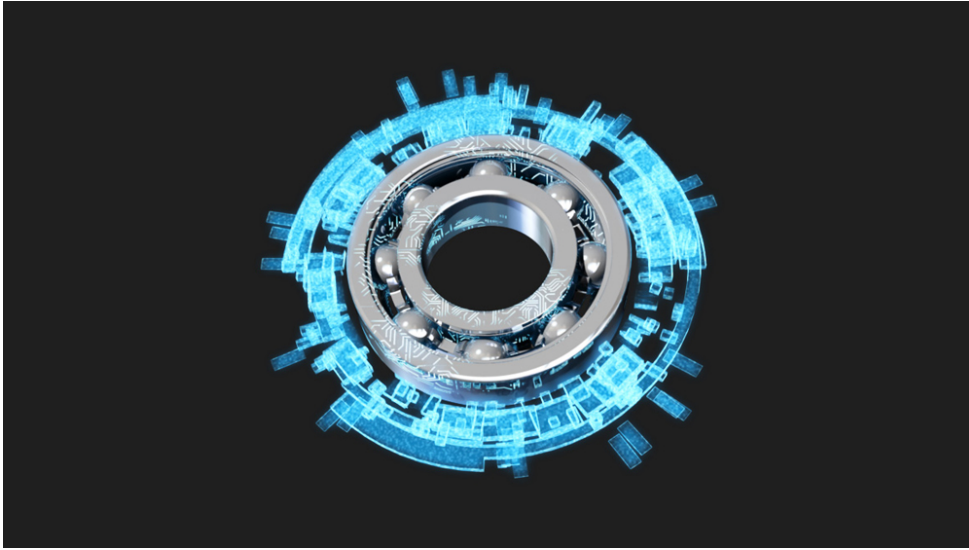
## **Partie II : Mise en œuvre de capteurs autonome communicant sans fils pour le PHM des composants critiques**

**Le chapitre 1 : « Capteur de surveillance de charge autonome communicant sans fil »** présente le projet EPICE, développement d'un démonstrateur d'un système de surveillance d'une attache de moteur d'avion.

**Le Chapitre 2 : « Capteur de température sans fil »** réalise une étude de preuve de concept d'un capteur de température résonant intégré à la cage d'un roulement.

**Le Chapitre 3 : « Perspectives des travaux et futurs axes de développement »** met en perspective ces travaux, et conclut le présent mémoire

## PARTIE I. Le roulement smart



*Figure 43. SKF-Insight*



« Si vous souhaitez comprendre l'univers, pensez à l'énergie, à la fréquence et aux vibrations (**N. Tesla**) ». Appliqué à l'industrie, nous nous efforçons de comprendre le fonctionnement d'une machine tournante grâce aux vibrations qu'elle émet !



Figure 44. Surveillance de santé des roulements – 1950.

## Introduction

Ce chapitre met à jour, complète et développe le rapport de P.-J. Cottinet et al. « Contrôle de santé des structures autonome. Etat de l'Art sur le contrôle de santé des structures, application aux roulements à billes », rapport de collaboration SKF-LGEF, Décembre 2013.

Les informations présentées dans cette partie sont le fruit d'une recherche bibliographique autour des thématiques du roulement, mais aussi des contributions sur le sujet. Afin de comprendre les enjeux attachés à ses développements, le manuscrit est découpé sous forme de chapitres de la façon suivante :

Le Chapitre 1 : « Du condition monitoring vers le PHM des roulements » adresse une comparaison entre les processus de Condition Based Maintenance (CBM), Structural Health Monitoring (SHM) et Prognostic Health Monitoring (PHM). Un alignement entre ces processus permet de définir ensuite l'architecture fonctionnelle du roulement smart.

Le Chapitre 2 : « Application au contrôle de santé des roulements à billes » réalise une synthèse sur la surveillance des roulements.

Le Chapitre 3 : « Fonctions mécatroniques intégrées aux roulements » présente un état de l'art des différentes mesures existantes intégrés sur des roulements. Un focus sur la mesure d'effort est réalisé.

Le Chapitre 4 : « Vers le roulement autonome » donne des exemples de récupérateurs d'énergie intégré aux structures de roulement à billes

Le Chapitre 5 : « Synthèse sur le roulement smart » dresse la conclusion de cette partie I.

Cet état de l'art, permettant de comprendre les travaux de recherche réalisés depuis les cinq dernières années, adresse aussi bien des solutions industrielles que des concepts proposés par des universitaires.

## Chapitre 1. Du condition monitoring vers le PHM des roulements

Le roulement intelligent cherche à automatiser un processus de PHM spécialisé autour des roulements en fonction de leurs positions au sein d'une transmission. Pour comprendre les enjeux autour du roulement intelligent, il est nécessaire de définir les points communs et les différences entre le CBM (Condition Based Maintenance), le SHM (Structural Health Monitoring) et le PHM (Prognostic Health Monitoring), et de montrer comment ces derniers peuvent s'appliquer au contrôle de roulements.

Les méthodes Condition Based Maintenance (CBM), Structural Health Monitoring (SHM) et Prognostics and Health Management (PHM) ont beaucoup de points communs. Toutes visent à améliorer la prise de décision en matière de maintenance, dans le but ultime de réduction des coûts de maintenance et d'augmentation de la disponibilité du système. Mais, dans le même temps, elles se concentrent sur différents aspects du domaine d'application et se sont développées dans des communautés plus ou moins séparées.

Dans ce qui suit et pour des raisons de clarté, la terminologie de base liée au diagnostic/pronostic est introduite. La notion de défaut (fault) est centrale dans les opérations de surveillance des systèmes industriels.

**Un défaut** (fault) se définit comme étant l'écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et celle théorique attendue. Cet écart est théoriquement nul en l'absence de défaut. Il convient de préciser que les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du système lui-même. Ces défauts sont générés suite à l'apparition et à l'évolution dynamique d'une dégradation dans un système.

**Une dégradation** (damage) est un processus d'altération causé par des changements dans les propriétés structurelles inhérentes d'un système, affectant les performances présentes et futures de manière irréversible.

**Une défaillance** (failure) correspond à une cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir des fonctions requises. Une défaillance partielle correspond à une dégradation de l'aptitude d'un système à accomplir des fonctions requises, par opposition à une défaillance complète représentée par une cessation de l'aptitude d'un système à accomplir l'ensemble des fonctions requises. Une défaillance implique obligatoirement l'apparition d'un défaut au préalable. Par contre, un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance car le système peut être exploité en assurant sa fonction principale.

**Une panne** (break-down) est l'inaptitude d'un système à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.

**Un indicateur de défaillance** (failure feature) est une quantité d'information pertinente permettant de détecter l'apparition d'une défaillance.

Un système est dit dans un état de fonctionnement normal lorsque ses variables le caractérisant (variables d'état, variables de sortie, variables d'entrée, paramètres du système) demeurent au voisinage de leurs valeurs nominales.

## 1. Comparaison et alignement des processus de CBM, SHM et PHM

### 1.1 Condition Based Maintenance (CBM)

La maintenance conditionnelle est la plus ancienne des trois méthodes. Elle est étroitement associée à la surveillance d'état (Condition Monitoring, CM), qui est un terme couvrant une gamme de techniques qui a été développée au cours des cinquante dernières années pour évaluer la condition ou l'état des systèmes et des composants. Les techniques de surveillance bien connue du CM sont la surveillance des vibrations, des températures, l'analyse de l'huile, l'émission acoustique et la thermographie. Ces méthodes sont largement appliquées dans l'industrie, où l'interprétation des mesures sont principalement basées sur l'expérience, et l'interprétation des données. Les techniques d'analyse des vibrations sont principalement appliquées aux équipements et composants tournants (par exemple pompes, compresseurs, boîtes de vitesses, roulements). Cela signifie que la source des vibrations est le fonctionnement normal de la machine, alors que les défauts peuvent être détectés comme une modification de cette source (en fréquence ou en amplitude).

Lorsque les résultats de la surveillance de l'état sont utilisés pour déclencher des activités de maintenance, on parle alors de maintenance conditionnelle (CBM). La norme ISO-13374, Condition Monitory and Diagnostics of Machines (ISO, 2012), définit la fonctionnalité d'un système de surveillance de condition de santé en six étapes : acquisition de données, manipulation de données, détection d'état, évaluation de la santé, évaluation des pronostics et génération de conseils à la maintenance. De plus, l'architecture de systèmes ouverts pour la maintenance basée sur la condition (OSA-CBM) (MIMOSA, 2013) fournit une mise en œuvre de cette norme par ajout de structures de données et définition de méthodes d'interface pour les blocs fonctionnels de la norme ISO. Bien que les recherches sur des concepts avancés comme les capteurs sans fil, les réseaux et la récupération d'énergie pour l'alimentation de capteurs autonomes soient en cours, l'acquisition de données (capteurs) et leur manipulation est de nos jours assez bien établie.

Par conséquent, une part importante de la recherche dans cette discipline se concentre sur l'analyse des données obtenues pour récupérer des informations de manière empirique. Les méthodes développées pour cela sont principalement axées sur les données, par exemple en fonction des tendances ou de la comparaison avec une mesure de base, et sont rarement basées sur des modèles physiques. L'application des étapes finales, c'est à dire l'évaluation de santé, l'évaluation de pronostic est, jusqu'à, présent très limitée en pratique. Cette méthode n'est pas couverte largement par le monde scientifique en dehors de l'application des politiques de CBM par modélisation de la maintenance. Aussi, aucune revue scientifique spécifique aux méthodes CM ou CBM n'existe. Cependant, comme le domaine existe déjà depuis des décennies, de nombreux ouvrages sur le sujet sont disponibles.

### 1.2. Structural Health Monitoring (SHM)

Le SHM est une méthode qui est étroitement liée à la surveillance d'état CM, mais elle trouve son origine dans l'inspection des structures. Les méthodes sont basées sur le contrôle non destructif (Non Destructive Testing, NDT). Ces techniques, comme le contrôle par ultrasons, les courants de Foucault et l'émission acoustique sont utilisées traditionnellement à l'aide de capteurs portatifs ou de techniques de balayage. Les inspections ne sont alors effectuées que de temps en temps ou périodiquement, sans relation avec les précédentes inspections.

En raison des exigences accrues de fiabilité et de disponibilité, la recherche s'est concentrée sur le développement de techniques de surveillance continue, qui ont évolué vers la discipline actuelle de SHM. Beaucoup de travaux scientifiques sont actuellement en cours dans ce domaine, qui a également ses propres revues scientifiques. L'accent a été mis d'une part sur le développement de nouvelles

méthodes de détection, et d'autre part sur le développement d'indicateurs avancés d'endommagement et de classificateurs. Le développement d'approches de détection est basé sur de nouvelles technologies utilisant les fibres optiques et des capteurs pour mesurer les vibrations structurelles (par exemple, les patches piézoélectriques) et la propagation des ondes (comme les ultrasons). Le développement de nouveaux indicateurs et classificateurs d'endommagement utilise une approche basée sur les données, avec des outils statistiques de diagnostic, ce qui est l'un des fondements clés du SHM. L'application de modèles physiques dans cette discipline est très limitée.

Les applications se trouvent principalement dans l'aéronautique et les ouvrages d'art (par exemple les ponts). Pour les méthodes basées sur les vibrations, la source des vibrations n'est généralement pas le système lui-même, mais l'environnement dans lequel il est utilisé (par exemple le vent, les vagues). Les défauts ou les dommages peuvent être détectés en observant les changements dans la réponse du système aux vibrations. Le SHM se concentre sur l'évaluation de la santé, mais ne fournit pas une approche claire pour l'appliquer aux politiques de maintenance (bien que le lien avec le CBM soit plutôt direct). Au contraire, les développements dans les techniques SHM se concentrent principalement sur l'augmentation de la probabilité de détection des défauts, qui provient du background NDT de cette discipline. En outre, la première norme dans ce domaine n'a été établie que très récemment (SAE, 2013). Elle définit le processus SHM en cinq étapes.

En allant de l'étape 1 vers la 5, de plus en plus d'informations sur l'endommagement dans la structure sont obtenues :

- Niveau 1 : détection de l'endommagement,
- Niveau 2 : localisation de l'endommagement,
- Niveau 3 : caractérisation de l'endommagement,
- Niveau 4 : quantification de l'endommagement,
- Niveau 5 : pronostics.

Les trois premiers niveaux peuvent maintenant être obtenus par beaucoup de méthodes, tandis que les deux dernières restent à ce jour très difficiles.

### 1.3 Prognostic and Health Management (PHM)

Le processus de PHM est différent des deux précédents, et a émergé plus récemment. Alors que le CBM et le SHM se concentrent sur la surveillance du système, le PHM est une approche plus intégrée qui vise à fournir des lignes directrices pour la gestion de santé du système. Ainsi, c'est une technique de management des moyens et des acteurs autour de la gestion du cycle de vie, en mettant l'accent sur la prévisibilité des défaillances (c'est-à-dire le pronostic) et de la maintenance. Ceci est généralement obtenu en adoptant une stratégie de surveillance, qui peut être une technique CM ou SHM. Aussi, dans ce domaine, de nombreuses approches axées sur les données sont apparues pour analyser les données de surveillance, mais également de plus en plus de méthodes basées sur des modèles physiques ont été développées. Comme pour les processus de CM et de CBM, cette discipline a émergé de l'industrie et a une présence limitée dans le monde scientifique. Le PHM est utilisé dans le domaine militaire, en particulier pour le développement de l'avion de chasse F-35. Par la suite, les approches de PHM ont également été développées pour d'autres véhicules militaires, mais aussi pour l'électronique et les systèmes civils aéronautiques comme les moteurs d'avions.

## 1.4 Comparaisons entre CBM, CM, SHM et PHM

La *Figure 45* compare les différents aspects entre les processus de CM, CBM, SHM et PHM.

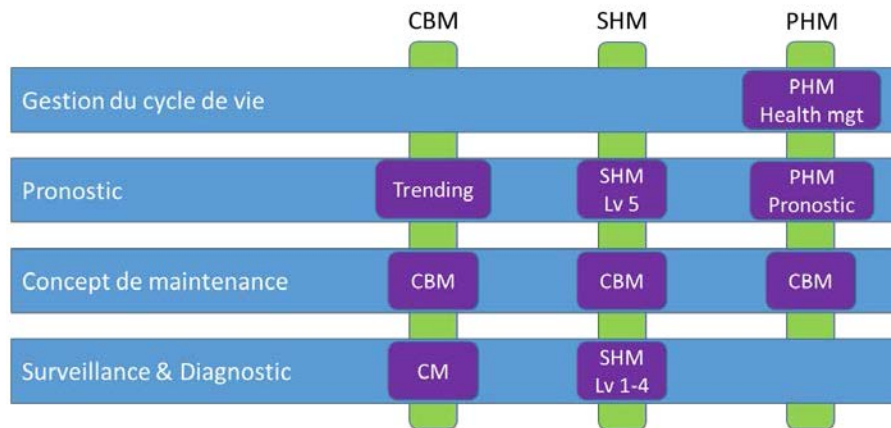


Figure 45. Relations entre CM, CBM, SHM et PHM

Tous ces processus ont en commun de rechercher des caractéristiques représentatives d'endommagement ou de dégradation du système. Cependant, il existe des différences :

- Le processus de CM est étroitement lié à la politique de CBM, ce qui signifie que les résultats de la surveillance sont directement appliqués pour guider les activités de maintenance. Dans le SHM, l'accent est mis complètement sur le suivi et aucune relation explicite avec une politique de maintenance spécifique n'est faite, même si la frontière entre CBM et SHM reste floue.
- Dans le CBM et le SHM, l'une des techniques couramment appliquées est la surveillance des vibrations, mais les approches se différencient de la manière suivante :
  - Le CM est principalement appliqué à la rotation ou au va-et-vient de la transmission, où la principale source de vibrations est la transmission elle-même. Un endommagement ou une dégradation est diagnostiqué en détectant des changements dans cette source, par exemple des défauts dans un roulement qui introduisent des vibrations supplémentaires.
  - Le SHM est principalement appliqué aux structures chargées, qui ne sont actionnées que par leur environnement (vent, vagues). Les techniques de SHM se concentrent sur la mesure des changements de la réponse du système ou de la structure et établir une relation à la présence d'endommagements.
  - Les emplacements des capteurs de vibration varient également. Dans le CM, le capteur est généralement placé à l'extérieur, alors que dans le SHM, les capteurs sont généralement sur (ou même intégrés dans) la partie surveillée.
  - Le SHM et le PHM incluent une étape de pronostic, tandis que le CBM est principalement centré sur le diagnostic. Cependant, les différences entre le CBM et le SHM à cet égard ne sont pas aussi importants, puisque dans le champ du SHM l'étape de pronostic est difficilement atteinte dans de nombreux cas. Dans le même temps, pour le CM, les données sont souvent mesurées dans le temps, ce qui fournit également une capacité de pronostic (qui est également mentionnée dans la norme ISO du CBM).

- Le PHM agit sur un niveau un peu plus élevé que le CBM et le SHM, car il a pour ambition claire de permettre la gestion de la santé globale du système. Ce dernier est une activité liée à la gestion du cycle de vie ou LCM (Life Cycle Management), ce qui signifie que cette approche est utilisée pour optimiser toutes les activités (maintenance) pendant le cycle de vie complet du système. Cela inclut la sélection d'une politique de maintenance appropriée, définissant la durée d'intervalle de maintenance et la décision du moment où le système devrait être retiré de l'exploitation. Le CBM et le SHM à une moindre extension ne fournissent pas ce support étendu au LCM.

Le PHM ne prescrit ni un concept de maintenance spécifique ni une stratégie de surveillance. Cependant, dans des études de PHM, le CBM ou d'autres politiques de maintenance sont adoptés, et dans de nombreux cas, des techniques de CM sont appliquées.

La *Figure 46* montre la relation entre l'usage d'un système et sa dégradation. Les trois pavés supérieurs de la figure représentent cette relation et idéalement la dépendance entre la durée de vie utile et l'utilisation réelle du système est explicitement définie. Cependant, en pratique, lorsque l'utilisation d'un système est normalement connue de l'opérateur, son effet sur la consommation de vie résiduelle est généralement inconnu. Seule une étude au niveau du mécanisme de défaillance physique (par exemple fatigue, usure) permettrait de quantifier cette relation, à condition que l'utilisation (heures de fonctionnement, rotation, vitesse) ou les charges mécaniques (par des jauges de contrainte, thermocouples) soient surveillées.

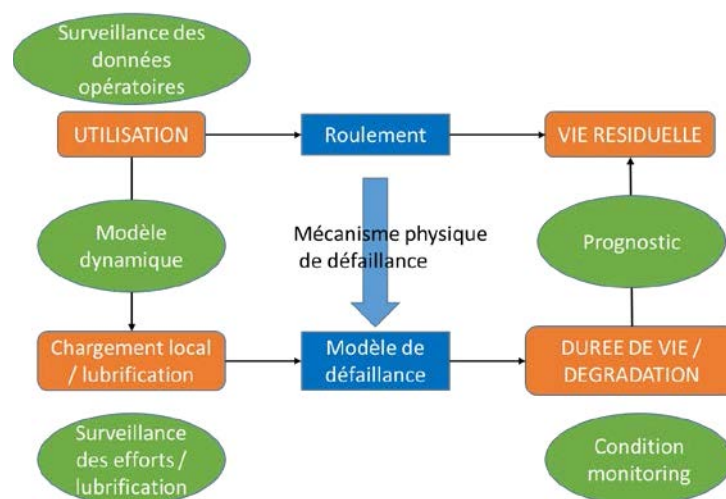


Figure 46. Relations entre usage d'un système et reste à vivre autour du mécanisme de défaillance

La *Figure 46* montre également que la surveillance de l'état de santé est une autre option de surveillance, et puisque des informations sur l'état du système sont obtenues directement, la compréhension détaillée du mécanisme de défaillance n'est pas nécessaire. C'est exactement la raison pour laquelle, dans le CM et le SHM, les approches basées sur des données ont été développées avec succès. La seule surveillance de l'état (ou des endommagements associés) permet de détecter le dépassement d'un seuil prédéfini puis de déclencher une activité de maintenance. Cependant, cette approche (en négligeant la réalité physique du mode de défaillance) comporte trois inconvénients importants :

- La sélection des quantités à mesurer, les emplacements des capteurs et les algorithmes de traitement de données sont principalement basés sur un processus « try and learn ».
- L'interprétation des données mesurées et la relation avec l'endommagement ou la dégradation sont dans bien des cas plutôt délicates, en général, c'est seulement possible si un

nombre considérable de données allant jusqu'à la défaillance est disponible, ce qui reste difficile à obtenir pour des systèmes critiques qui fonctionnent de manière variable.

- On réalise seulement un diagnostic, l'extension à une méthode de pronostic est souvent difficile.

Ces inconvénients peuvent être surmontés si le mode de défaillance est compris. La sélection des paramètres à surveiller et les emplacements des capteurs peuvent largement bénéficier de la connaissance du mode de défaillance.

Cette approche unifiée autour des modes de défaillances est présentée en *Figure 47*. Elle utilise l'inclusion de connaissances sur le système physique et son comportement lors d'une défaillance. Cette connaissance est fondamentale car elle améliore le processus sur trois étapes essentielles :

- La sélection des capteurs de surveillance et leur emplacement
- Le traitement des données de mesure pour extraire les informations requises sur la dégradation du système
- L'étape de pronostic, où l'utilisation d'un modèle physique de défaillance améliore la performance de prédiction.

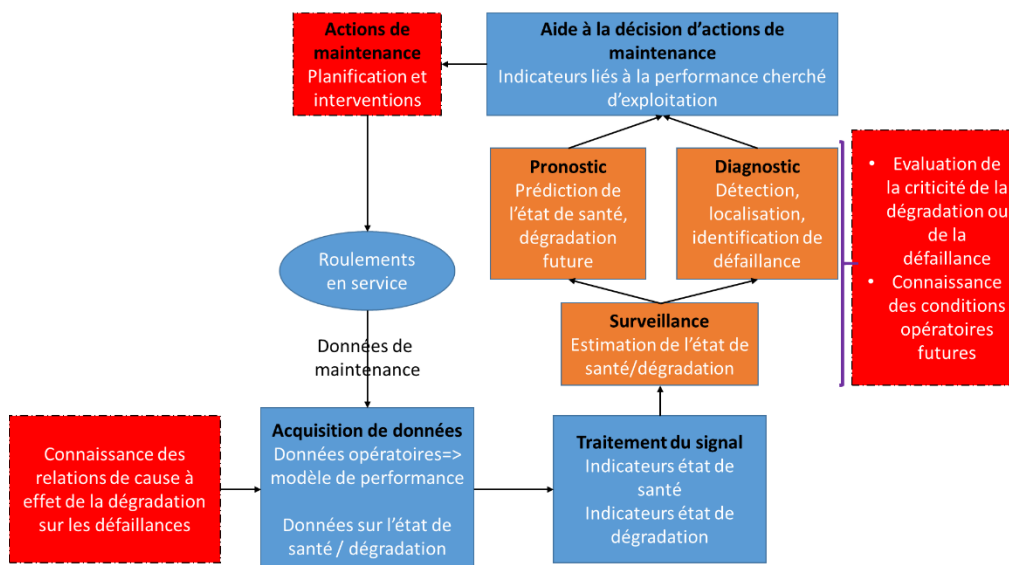


Figure 47. Alignement du CBM, SHM et PHM autour du mécanisme de défaillance

Cette architecture se décline par l'architecture fonctionnelle suivante pour le roulement smart (Figure 48).

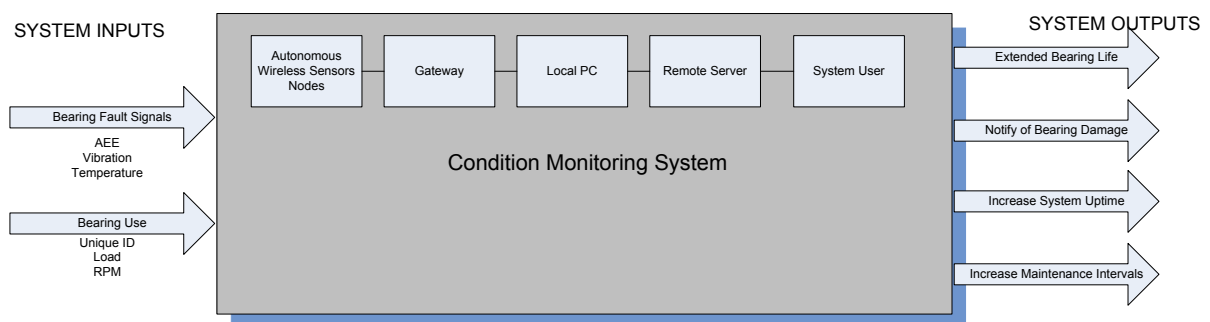


Figure 48. Architecture fonctionnelle du roulement smart

En conclusion, au lieu de considérer le CBM, le SHM et le PHM comme des disciplines distinctes, leurs objectifs et leurs approches peuvent être alignés pour parvenir à une stratégie intégrée afin d'améliorer le cycle de vie et de gestion de tout système complexe.

### 1.5. Apport des méthodes à travers une étude sur le contrôle de santé des structures

Les paragraphes précédents ont permis de mettre en exergue l'alignement qu'il fallait apporter entre les méthodes. L'objectif de cette partie est de comprendre comment ses dernières s'imbriquent dans le monde socio-économique autour du transport. En effet, le contrôle et la surveillance in situ de l'état structurel (Structural Health Monitoring, SHM) ont bénéficié des récents progrès dans la caractérisation de dommages matériels (étude de la durabilité et du vieillissement des matériaux) et structurels et des technologies des capteurs/actionneurs. Ces avancées technologiques ont favorisé l'émergence de nouvelles structures dites "structures intelligentes" (smart structures). Ce sont des structures qui se composent d'un réseau de capteurs et/ou d'actionneurs (comme des matériaux piézo-électriques) et d'une architecture d'acquisition et de commande en temps réel qui assurent le traitement des signaux. Ces capteurs et actionneurs doivent perturber le moins possible la masse du système. Ils peuvent être collés sur la structure ou à l'intérieur lorsqu'il s'agit de structure en composites. Actuellement, la majorité des recherches académique et universitaire s'attellent à cette thématique, travaillent sur les problèmes de l'optimisation de leur forme, de leur taille et de leur localisation, sans oublier leur durée de vie afin d'être en adéquation avec la durée de vie de la structure.

Le SHM est né d'une véritable demande des acteurs du monde socioéconomique de l'aéronautique. En effet, dans cette industrie, la capacité à évaluer rapidement l'état de santé d'une structure, sans attendre une maintenance programmée, constitue un enjeu sécuritaire et économique considérable, que ce soit pour les constructeurs, les compagnies aériennes et les équipes de maintenance. Par exemple, dans l'industrie aéronautique, 14% des accidents sont dus à des problèmes de maintenance, et 4% sont liés à la présence d'endommagements [1]. L'objectif du développement de systèmes SHM est de permettre de réduire de 10% le nombre de ces accidents [1]. afin de mettre en évidence l'intérêt du développement de systèmes SHM dans l'industrie aéronautique, la Federal Aviation Administration (FAA) a effectué une enquête menée par Roach et Neidigk [2]. Cette enquête s'est basée sur les réponses de 455 personnes travaillant chez des constructeurs aéronautiques, des compagnies aériennes et des compagnies de maintenance (Tableau 2).

L'enquête a mis en évidence que 61% de ces participants estiment qu'il est très important de développer des systèmes SHM dans l'industrie aéronautique. La Figure 49 illustre les différents types d'endommagements que les participants à cette enquête cherchent à détecter par le biais de systèmes SHM. D'après cette figure, les participants sont très intéressés par la détection des endommagements de type fissure, délaminage, corrosion et impact. Les résultats de l'étude ont mis aussi en avant les objectifs en termes d'attentes des systèmes de SHM, comme l'illustre Figure 50. Ceux-ci se résument sous forme de cinq points :

- Eviter le démantèlement de la structure,
- Détecter l'endommagement de manière précoce,
- Garantir la fiabilité de la structure,
- Obtenir des inspections rapides et fréquentes.
- Revoir l'organisation d'une procédure de maintenance.



De plus, les avionneurs Boeing et Airbus ont annoncé en 2010, pour leurs programmes 787 Dreamliner et l'A380 l'installation de système de SHM [3], [4] démontrant ainsi une véritable volonté économique sur le développement de SHM.

Compagnies aériennes	Constructeurs aéronautiques	Organismes de réglementations	Compagnies ou organismes effectuant la maintenance
NASA (1)	Airbus	Air Transport Association	Air New Zealand
American Airlines	Boeing	CAA-NL (2)	Air New Zealand
Austrian Air Force	Dassault Aviation	CAA-Bra (3)	China Airlines
China Airlines	EADS Military Air Systems	EASA (4)	Fokker Aircraft Services BV
Continental Airlines	Goodrich	FAA (5)	Fuji Heavy Industries, LTD
Delta Air Lines	Bombardier Aerospace	NAVAIR (6)	Jazz Air LTD
Federal Express	Honeywell	NAWCAD (7)	NASA (1)
United Airlines	Rolls-Royce Corp	Transport Canada	US Navy
Qantas Airways	Embraer	USAF (8)	US Army
US Army	Bell Helicopter Textron	US Army	Texas Aero Engine Services

Tableau 2. Participants à l'enquête de la Federal Aviation Administration (FAA) (adapté de [2]).

- (1) National Aeronautics and Space Administration
- (2) Civil aviation regulating authorities in the Netherlands
- (3) Civil aviation regulating authorities in the Brasil
- (4) European Aviation Safety Agency
- (5) Federal Aviation Administration
- (6) Naval Air Systems Command
- (7) Naval Air Warfare Center Aircraft Division
- (8) United States Air Force

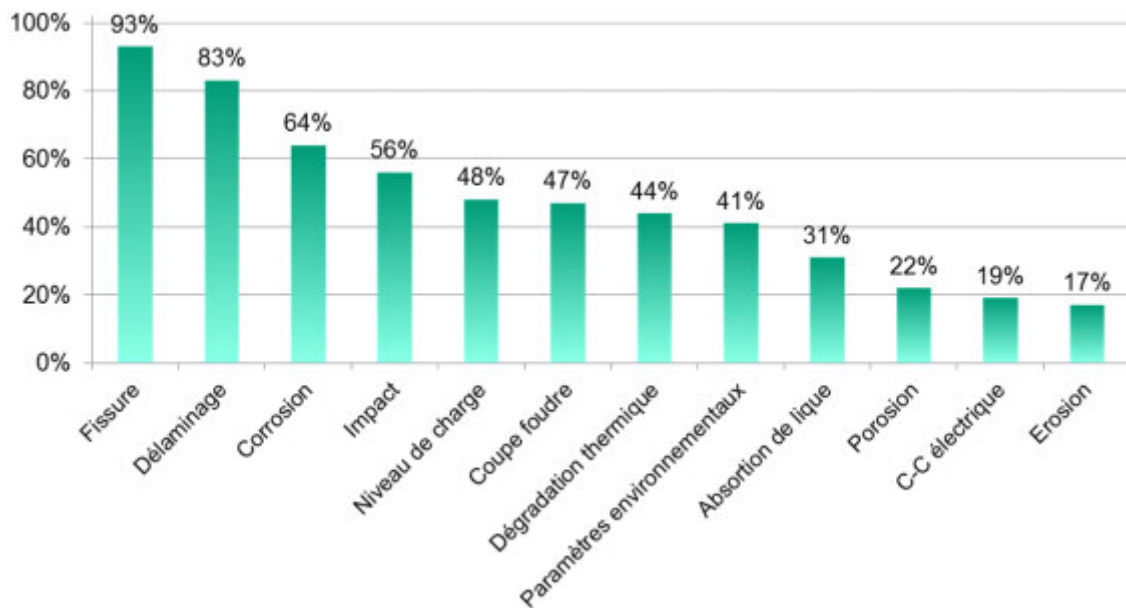


Figure 49. Types d'endommagements visés par le SHM (adapté de [2])

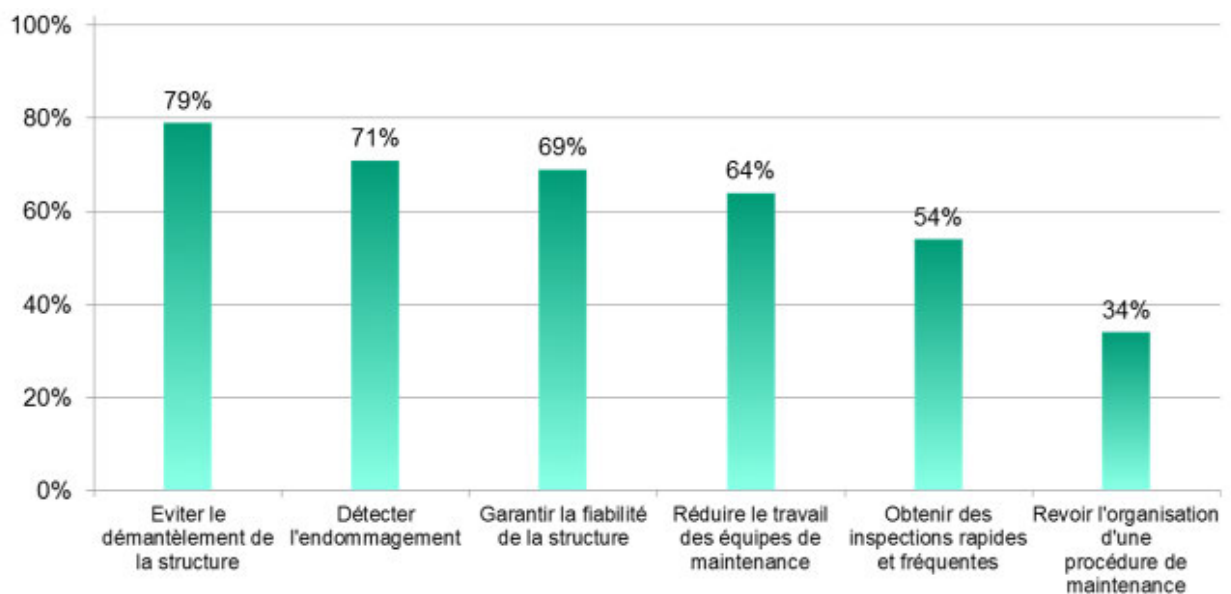


Figure 50. Rôle d'un système de SHM (adapté de [2])

Mais l'aéronautique n'est pas la seule à vouloir profiter du SHM. Dans de nombreux domaines industriels, la surveillance et le diagnostic des systèmes occupent une place grandissante. En effet, en raison de la complexité accrue des systèmes mécatroniques modernes, leurs coûts d'exploitation, essentiellement liés à la maintenance, se sont vus augmentés. De manière générale, il existe trois schémas de maintenance [5] :

- la maintenance préventive ou systématique, qui répond aux exigences d'un échéancier entraînant des actions d'inspection et de contrôle puis des réparations si nécessaire,
- la maintenance corrective, effectuée en cas de panne du système,

- la maintenance prédictive ou conditionnelle, liée à la surveillance et au diagnostic du système et n'entraînant d'action de réparation que si une panne (présente ou future) est détectée.

La maintenance systématique est largement utilisée dans le cadre des systèmes critiques pour la sécurité ou la sûreté de fonctionnement, comme par exemple en aéronautique. Ce type de maintenance est difficilement remplaçable. La maintenance corrective, quant à elle, est la plus coûteuse puisqu'elle n'intervient qu'après une panne du système et donc après une période de non fonctionnement imprévue. La maintenance prédictive vise à pallier aux coûts de la maintenance corrective, en réduisant au maximum le temps d'indisponibilité des systèmes et surtout en pouvant planifier ces indisponibilités. Cette méthode anticipative permet donc d'assurer une meilleure continuité de service et ainsi de réduire les coûts d'exploitation sur le long terme.

C'est dans ce contexte que s'inscrit l'état de l'art et des perspectives dans le domaine du PHM autonome, plus précisément autour des roulements à billes, correspondant au cœur du métier de la société SKF.

Toujours dans le but de comprendre les actions de recherche effectuées, la prochaine partie est consacrée à la description et l'analyse des méthodes qui sont aujourd'hui utilisées ou envisagées à moyen terme pour le contrôle de santé des roulements à billes.

## Chapitre 2. Application au contrôle de santé des roulements à billes

Après une courte introduction au SHM des roulements, une présentation des caractéristiques mécaniques des roulements à billes sera effectuée de manière succincte. La seconde partie s'attachera à décrire les causes de défaillance des roulements, puis, dressera un panorama des différentes techniques mises en œuvre pour analyser et traiter les signaux vibratoires, thermiques ou autres, en vue de la détection des défauts de roulements. Ces méthodes seront analysées et discutées, essentiellement en ce qui concerne leur efficacité et leur coût d'implantation, en vue de la réalisation de système autonome. La dernière partie concernera la mise en œuvre des solutions de monitoring dans les systèmes du commerce.

### 2.1. Problématique de recherche

Des roulements, il y en a partout, des robots ménagers en passant par les compresseurs ou les roues de véhicules, un très grand nombre de systèmes en rotation en sont équipés. Ce sont des composants stratégiques des machines tournantes : situés entre les parties fixes et les parties mobiles de la structure, ils assurent la transmission des efforts et la rotation de l'arbre.

Mais s'ils sont très courants, ces composants sont aussi fragiles. A titre d'exemple, des études statistiques ont montré que les pannes imputables aux roulements à billes sont prépondérantes quelle que soit la gamme de puissance des machines asynchrones [6] – [9].

Selon les différentes sources citées, les pannes dues aux roulements représentent entre 40 et 50% des pannes totales, précédant les défauts statoriques et rotoriques, comme l'illustre la *Figure 51*. Il est donc logique, d'un point de vue industriel et scientifique, de concentrer les efforts de détection des pannes et de diagnostic sur les roulements à billes.

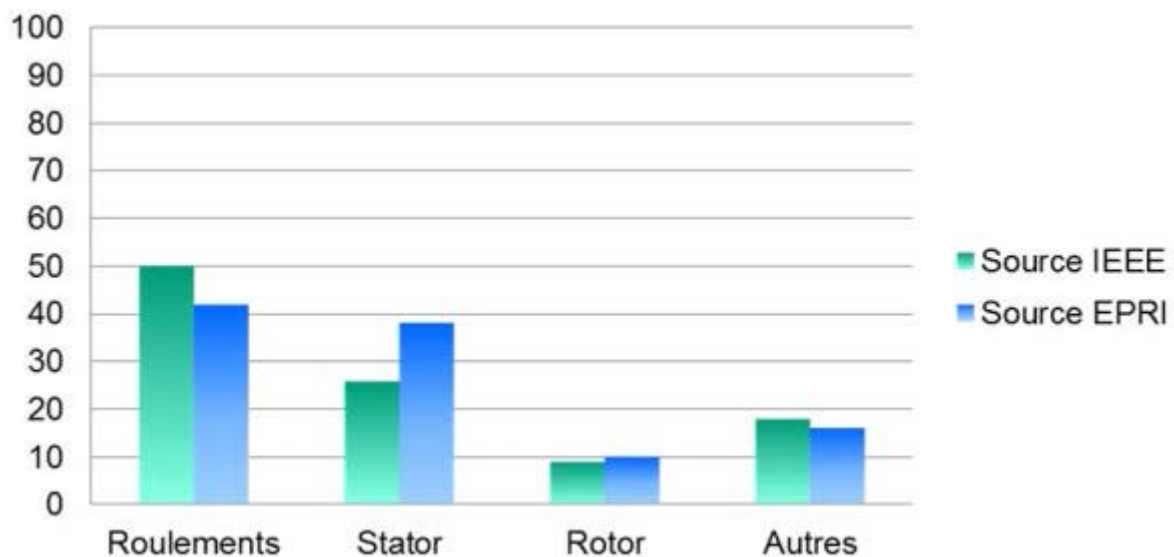


Figure 51. Répartition du taux de panne dans les machines asynchrones (extrait de [2])

### 2.2. Constitution générale de roulement

Un roulement dans un assemblage assure deux fonctions principales :

- Assurer la rotation d'une pièce par rapport à une autre (arbre par rapport au carter)
- Assurer le maintien en position d'une pièce par rapport à une autre (et en conséquence supporter de lourdes charges).

La majorité des roulements sont composés d'une bague intérieure et d'une bague extérieure, d'éléments roulants (billes ou rouleaux), et d'une cage [10]. Les éléments roulants situés entre les deux bagues du roulement sont maintenus à égale distance les uns des autres par la cage qui les guide, les maintient à l'intérieur du roulement et facilite leur rotation sur la surface de la piste de roulement située sur les bagues intérieure et extérieure. Cette surface supporte les charges appliquées aux roulements. En général, la bague intérieure est montée sur l'arbre et la bague extérieure dans le logement.

Les éléments roulants se divisent en deux catégories : les billes et les rouleaux. Les rouleaux sont classés en fonction de leur forme, rouleaux cylindriques, rouleaux coniques, rouleaux sphériques ainsi que les aiguilles. Le contact entre les éléments roulants et les bagues pour les roulements à billes est ponctuel alors que le contact pour les roulements à rouleaux est linéaire. Les roulements sont conçus de telle manière que les éléments roulants effectuent simultanément une rotation autour de leur propre axe et autour de l'axe des pistes. La *Figure 52* illustre les différents types de roulements couramment utilisés dans l'industrie.

La cage ne supporte pas directement les efforts appliqués au roulement. Les types de cage varient en fonction de leur fabrication (cage en tôle emboutie, usinée, massive acier ou laiton, polyamide injecté).

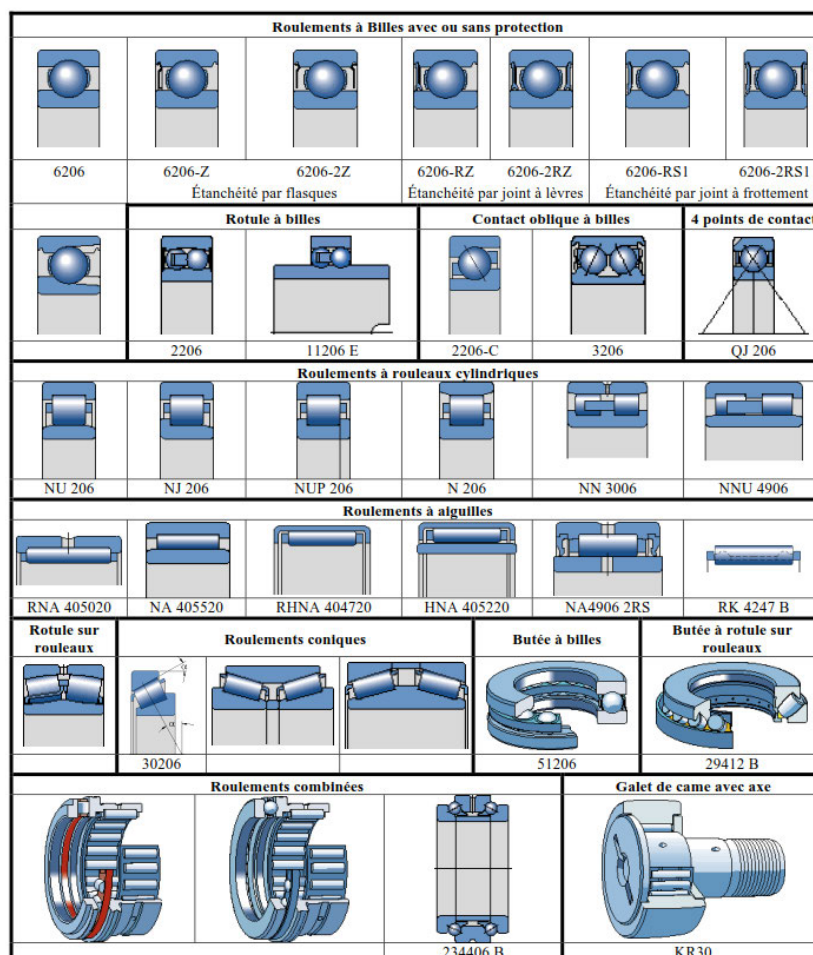


Figure 52. Illustration des différents types de roulements (extrait de [11])

### 2.3. Les phénomènes induisant une dégradation du roulement

Par définition, la durée de vie d'un roulement est une donnée statistique caractérisant le nombre de cycles, c'est-à-dire de tours qu'il peut effectuer en étant soumis à une contrainte spécifique, avant de

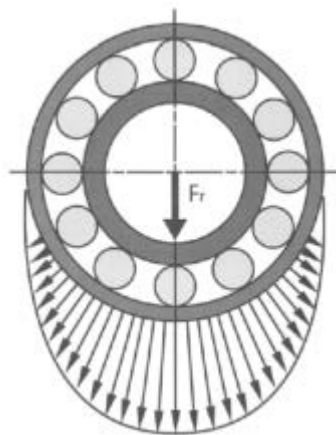
présenter des défauts d'écaillage des surfaces de contact (cf Annexe). Une courbe de fiabilité des roulements est obtenue analytiquement [12] à partir de la durée de fonctionnement atteinte par 90% des roulements d'un même type. Cependant, cette évaluation de la durée de vie des roulements ne prend en compte que les phénomènes de fatigue des matériaux.

De manière générale, l'usure d'un roulement peut difficilement être décrite théoriquement du fait de la complexité des mécanismes mis en jeu et de l'interdépendance de ceux-ci. En effet, ce n'est pas un seul un mécanisme d'usure, mais un ensemble de mécanismes qui conduit à la dégradation d'un roulement et à la diminution de sa durée de vie. De nombreux facteurs externes aux roulements, influençant leur durée de vie, sont répertoriés. Ceux-ci seront détaillés dans les prochains paragraphes.

Dans la publication SKF « Bearing Damage and Failure Analysis » [BU / I3 14219FR] de mars 2014, les causes des endommagements dans les roulements sont énumérées avec un certain nombre de solutions pour y remédier.

### 2.3.1. Effets des contraintes mécaniques

Lorsqu'un roulement est placé dans une machine, il subit des contraintes mécaniques radiales et axiales. Les contraintes axiales apparaissent plus particulièrement dans des machines entraînant un ventilateur ou lorsqu'il existe une précharge axiale, c'est-à-dire un dispositif appliquant une poussée ou une traction dans l'axe de l'arbre de rotation. Les contraintes radiales, quant à elles, existent nécessairement du fait de la masse de l'arbre de rotation de la machine. Ces dernières s'exercent donc sur la bague interne du roulement qui les transmet à la bague externe par l'intermédiaire des billes. Ainsi, les contraintes radiales ne s'exercent pas en un seul point de la bague externe mais se répartissent dans la moitié inférieure de celle-ci, comme le schématise la *Figure 53*.



*Figure 53. Répartition des contraintes mécaniques radiales et zones de charge au sein d'un roulement à bague externe fixe (extrait de [13])*

Si les efforts exercés sont trop importants, il y a surcharge du roulement. La résistance des matériaux des bagues ou des billes est mise à mal et il se produit des criques et fissures internes, voire un écaillage des pistes de roulement ou des billes si les efforts sont cycliques. La dégradation du roulement est alors considérée comme mortelle. La *Figure 54* montre les dégradations sévères que peuvent provoquer des surcharges mécaniques létales.



(a)

(b)

Figure 54. Dégradations du chemin de roulement dues à des surcharges mécaniques (extrait de [14])

### 2.3.2. Corrosion

Des agents corrosifs, tels que des acides, sont susceptibles de s'introduire dans les roulements et de dégrader les matériaux métalliques les constituant. Des criques apparaissent alors sur les bagues et les billes, comme le montre la Figure 55.

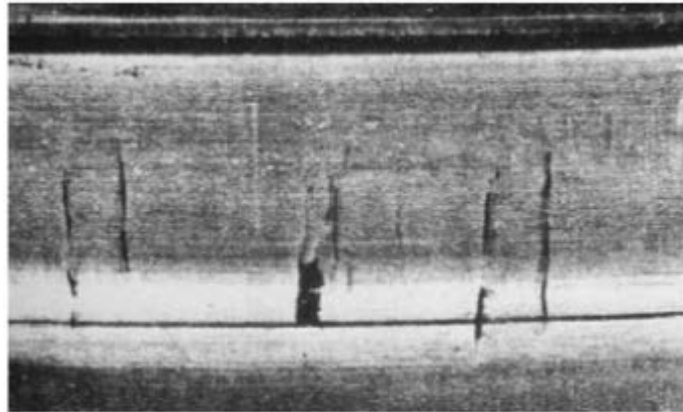


Figure 55. Criques de corrosion sur une piste de roulement (extrait de [14])

### 2.3.3. Contamination du roulement

Les roulements peuvent être installés dans des environnements poussiéreux ou en extérieur, là où les vents peuvent amener des sables ou des impuretés. Pour les applications en milieu dits contaminés, les roulements sont de préférence étanches et le lubrifiant choisi est une huile circulant en circuit fermé. Ces systèmes de lubrification sont complexes et chers et ne sont donc pas toujours mis en œuvre.

Les roulements non étanches, utilisés en milieux contaminés, peuvent donc se trouver eux-mêmes contaminés, c'est-à-dire que des impuretés entrent dans le roulement et dégradent alors les surfaces de contact. Plusieurs mécanismes peuvent être mis en jeu. Lorsque les particules de contaminant s'insèrent au niveau du contact bille/bague, il peut se produire un phénomène d'abrasion à trois corps et/ou une indentation des particules dans les billes ou les pistes (voir Figure 56). Ceci ne se produit que si les particules sont constituées d'un matériau plus dur que celui des organes internes du roulement [15]. Les dégradations peuvent alors s'intensifier et créer des fissures, voire un écaillage des constituants du roulement. Ces mécanismes sont résumés par Figure 57.

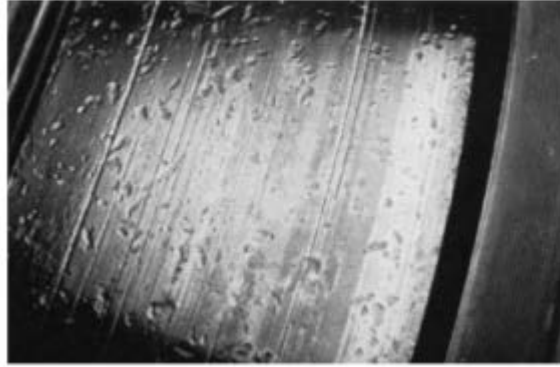


Figure 56. Marques d'indentation d'un chemin de roulement dues à la présence de contaminant

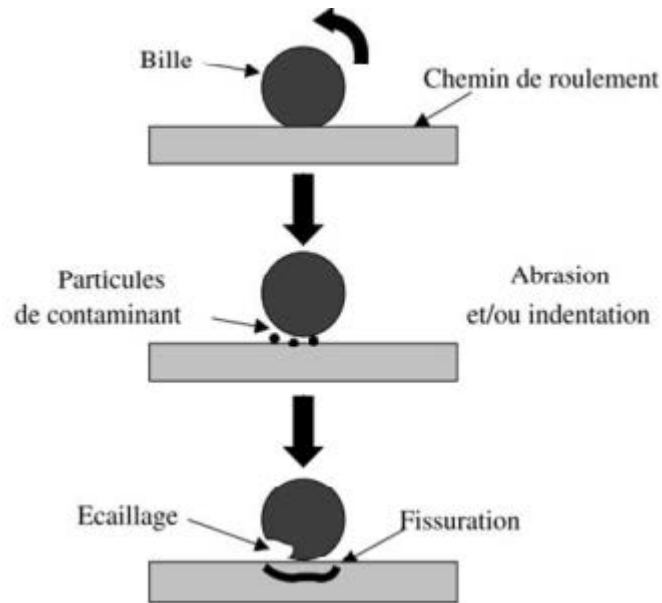


Figure 57. Mécanismes généraux d'usure en présence de contaminant (adapté de [14])

#### 2.3.4. Défaut de lubrification

Le lubrifiant est un organe essentiel des roulements dans la mesure où il crée un film d'huile protecteur au niveau des contacts bille/bague permettant de protéger les surfaces. Deux types de défauts de lubrification principaux peuvent se présenter.

Le premier est une dégradation des qualités lubrifiantes de la graisse ou de l'huile ou bien une absence de lubrifiant. En effet, en l'absence de lubrifiant, les surfaces métalliques se trouvent en contact direct, frictionnent et s'érodent rapidement, jusqu'à entraîner des écaillages des pistes, des éclatements des billes, un blocage et donc une destruction du roulement, comme le montre la *Figure 58*.

Le second type de défaut de lubrification intervient dans les roulements par l'intermédiaire d'un surgraissage (la graisse occupe tout le volume libre interne au roulement). Dans ce cas, la viscosité de la graisse empêche la libre rotation de la cage et par conséquent des billes, ce qui entraîne un glissement de ces dernières au niveau des points de contact. Les surfaces de contact se dégradent alors rapidement [14].



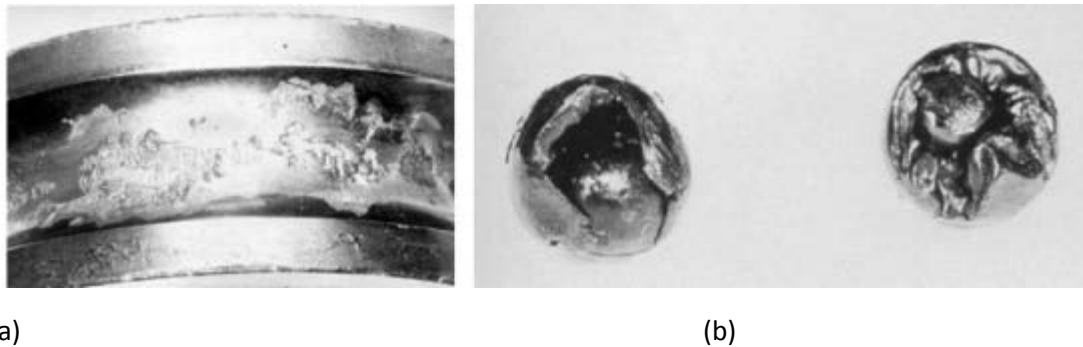


Figure 58. Dégradations provoquées par la détérioration du lubrifiant dans les roulements (a) écaillage d'un chemin de roulement, (b) éclatement de bille (extrait de [14])

### 2.3.5. Température de fonctionnement

En conditions normales d'utilisation, la température de fonctionnement d'un roulement est généralement comprise entre  $-20^{\circ}\text{C}$  et  $+120^{\circ}\text{C}$ . La géométrie générale d'un roulement est dépendante de la température de fonctionnement de celui-ci. En effet, les éléments métalliques se dilatent avec la température. Le jeu naturel du roulement est alors compensé et le lubrifiant ne peut plus s'insérer au niveau des points de contacts bille/bague, ce qui entraîne les mêmes effets que ceux précédemment cités (paragraphe 3.3.4). Par ailleurs, la graisse est composée d'une huile lubrifiante et d'un savon liant [13]. Lorsque la température de fonctionnement augmente, le savon se solidifie, la graisse perd ses propriétés lubrifiantes et la rotation de la cage est perturbée. Les billes glissent alors dans les chemins de roulement provoquant une usure rapide et prononcée [13].

### 2.3.6. Autres effets possibles

Il existe d'autres phénomènes pouvant détériorer le fonctionnement d'un roulement, comme un défaut de montage, ou dans le cas de machine électrique la circulation d'un courant électrique [14].

### 2.3.7. Synthèse

Les paragraphes précédents ont permis de mettre en avant les causes et les phénomènes tels que la corrosion, la température, la contamination, les chocs et surcharge mécaniques générant des criques, piqures et indentations provoquant une diminution de la durée de vie du roulement et donc du système global. La prochaine partie de l'étude concerne la présentation des principales solutions actuellement utilisées pour la détection de ces défauts dans les roulements.

## 2.4. Les méthodes de surveillance des roulements

Les roulements sont un des composants les plus fragiles des machines tournantes. Pour éviter des arrêts de production coûteux dus à la défaillance imprévue de l'un d'entre eux, il faut donc en permanence les surveiller et « traquer » l'apparition du moindre défaut. Pour cela, plusieurs techniques possibles, qui introduiront les prochains paragraphes, avant de dresser une synthèse de l'ensemble des outils.

Pour surveiller l'état de santé d'un roulement, ce ne sont pas les techniques qui manquent. Le choix de l'une ou l'autre d'entre elles est malaisé.

L'analyse vibratoire est la plus couramment utilisée par les acteurs du marché, comme SPM Instrument, Prüftechnik, 01dB-Stell. L'ensemble des industriels s'accorde sur le fait que les mesures vibratoires sont adaptées pour surveiller l'état général de machines tournantes comme la détection de la présence de balourd, ou d'un désalignement des pièces. Par contre, leur opinion diffère pour la surveillance spécifique des roulements. Par exemple, pour Prüftechnik, l'analyse de chocs est plus adaptée pour le

contrôle des roulements [40]. Tandis que pour 01dB-Stell, l'analyse vibratoire a largement fait ses preuves pour la surveillance des roulements [41]. 01dB-Stell avance l'argument suivant : « l'analyse vibratoire ne nécessite pas de capteurs spécifiques par rapport à l'onde de choc ou l'émission acoustique. En effet n'importe quel accéléromètre peut convenir. Pour le personnel de maintenance, c'est donc une technique peu coûteuse » [18].

L'analyse thermique ne permet pas détecter les défauts à un stade précoce, où la température varie relativement peu. En revanche, elle est utilisée pour confirmer le diagnostic, car la température évolue rapidement lorsque le roulement est proche d'une dégradation irréversible [36]. De plus, elle est généralement couplée à l'analyse d'huile, dans le but de confirmer le résultat d'analyse.

Le choix d'une méthode par rapport à une autre dépend aussi du type de surveillance souhaité. Pour une majorité des applications, une surveillance périodique est suffisante. Celle-ci est basée sur l'utilisation d'appareils portatifs (avec enregistrement des données) qu'un agent de maintenance vient disposer sur le système à contrôler avec une certaine périodicité. Mais il est parfois indispensable de réaliser une surveillance continue, notamment pour des organes de sécurité (type moteur d'avion, fermeture de vanne, etc.). Dans ce cas, la méthode d'analyse d'huile (qui nécessite de prélever un échantillon de fluide avant de l'examiner) ne peut convenir. Les industriels utilisent alors des capteurs d'onde de choc, d'émission acoustique, de vibration, de température, qui sont installés à demeure sur une structure fixe à proximité du roulement. Mais cela impose des contraintes dues à la présence de câble pour l'alimentation et la transmission des données des capteurs, ainsi qu'un encombrement plus important. Or pour certains secteurs d'activités comme l'aéronautique, cela peut être complexe à mettre en œuvre.

Il semble donc intéressant de disposer de roulements instrumentés capables d'effectuer leur propre contrôle de santé et d'envoyer les données sans fil, l'ensemble fonctionnant de façon autonome (sans source d'énergie extérieure).

L'annexe 1 fournit un état de l'art des différentes méthodes de diagnostic couramment utilisées.

## 2.5. Synthèse sur le contrôle de santé des roulements

Ce chapitre a permis de mettre en avant les phénomènes de détérioration des roulements, ainsi que les méthodes couramment utilisées pour le contrôle de santé de ceux-ci, mais aussi certains verrous technologiques à résoudre pour répondre aux contraintes applicatives. Par exemple, les capteurs ne sont généralement pas en contact directement avec le roulement posant des problèmes de fiabilité dans le diagnostic. Les acteurs du domaine sont donc à la recherche de technologies fortement intégrées capables de répondre aux contraintes applicatives. Afin de juger du développement effectué autour des roulements qualifiés d'intelligents, le prochain chapitre présentera les solutions actuellement disponibles ou en cours de développement.

## Chapitre 3. Fonctions mécatroniques intégrées aux roulements

Depuis une dizaine d'années, les constructeurs de roulements développent des solutions avec des capteurs, afin de concevoir des roulements dits instrumentés ou mécatroniques [42] – [45]. Ils ont été historiquement conçus pour l'industrie automobile, dans les dispositifs d'antiblocage et d'anti-patinage de roues ou de directions à assistance électrique, qui nécessitaient des roulements associés à des capteurs de vitesse de rotation ou de position. A titre d'exemple, la société NTN (SNR), a produit 110 millions de roulements capteurs depuis 1997 [46]. Un état de l'art sera établi dans les prochains paragraphes sur les solutions disponibles et les développements envisagés par les acteurs du marché.

### 3.1. Les mesures actuellement disponibles

La *Figure 59* donne une illustration de l'ordre d'apparition des capteurs intégrés aux roulements depuis la première application commerciale développée par SNR en 1997 à savoir le produit ASB pour Active Sensor Bearing. Les parties suivantes détailleront les technologies utilisées pour obtenir les informations comme la position, la vitesse, etc.

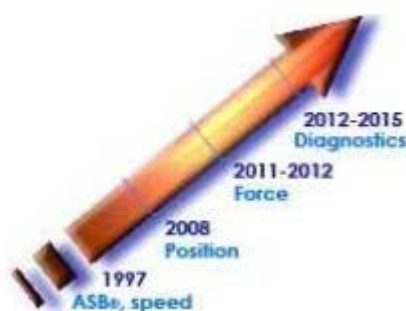


Figure 59. Apparition des capteurs intégrés aux roulements (extrait de [42])

### 3.2. La mesure de vitesse

L'information de vitesse est la première à avoir été développée par les fabricants de roulement. Elle est généralement basée sur deux méthodes de mesure de champ magnétique ou optique.

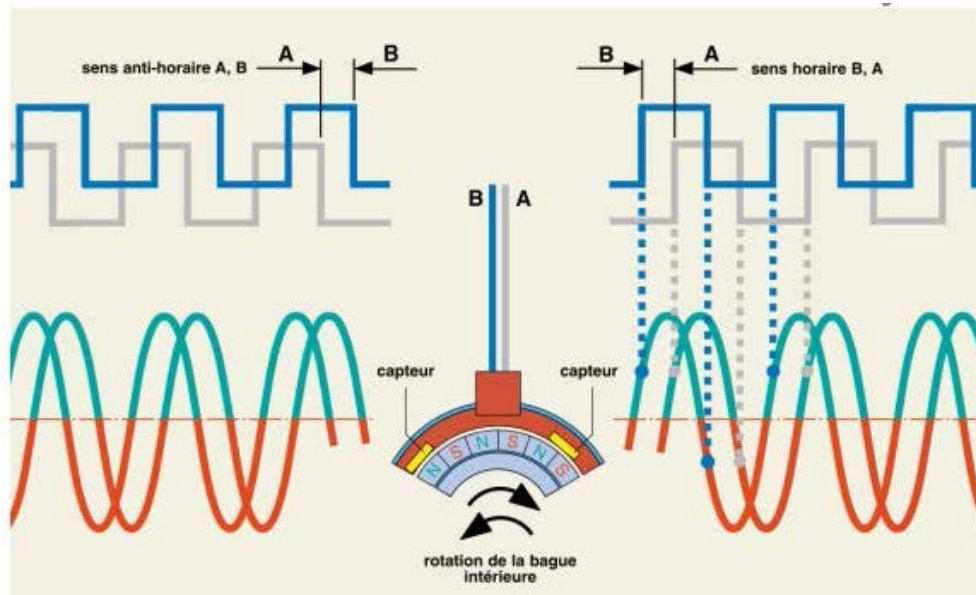
#### 3.2.1. Mesure de vitesse à l'aide de champ magnétique

Avec la technologie ASB "Active Sensor Bearing", SNR Roulements a introduit un standard de mesure de vitesse de rotation de roue sans contact. Cette technologie consiste à mesurer le champ magnétique généré par un aimant multipolaire inclus dans le joint d'étanchéité du roulement de roue, à l'aide d'un capteur magnétique à effet Hall ou à magnétorésistance.

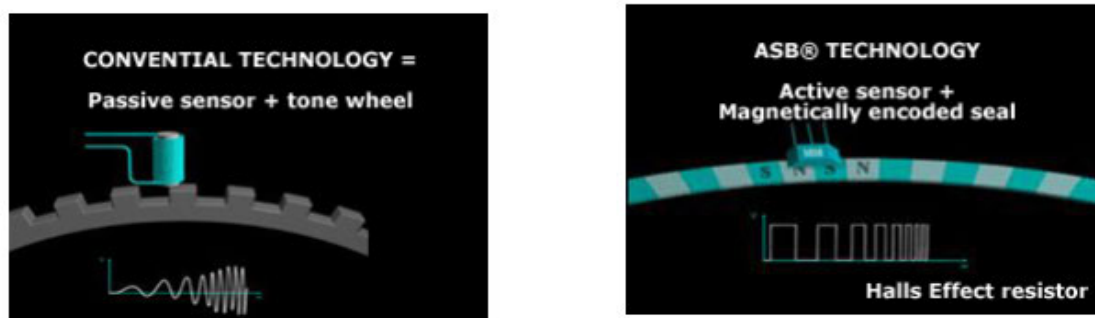
Le principe de fonctionnement est le suivant : une bague magnétique présentant une succession de pôles nord et sud est fixée à la bague intérieure du roulement-capteur, la bague extérieure supportant le corps de capteurs équipés des cellules à effet Hall. Lorsque la bague intérieure tourne, la bague magnétique passe devant les capteurs fixes créant un champ magnétique de polarité variable. Le capteur émet une pulsation dont la fréquence dépend du nombre de changements de polarité par seconde. Le signal de sortie du capteur est transmis par le câble de raccordement du roulement-capteur à une unité électronique développée par l'intégrateur du roulement. Celle-ci est chargée d'évaluer le signal et de fournir les informations nécessaires à l'application. Le corps de capteur contient deux cellules. Les deux signaux de sortie ont des phases décalées, ce qui permet de

déterminer le sens de rotation [47]. La *Figure 60* illustre le principe de fonctionnement de la mesure de vitesse.

La société NTN (SNR) propose également deux principes de mesure : l'un actif à l'aide de capteur à effet Hall et l'autre passif à l'aide d'une roue dentée comme le montre la *Figure 61*. Le groupe Schaeffler a, de même, fait le choix de la technologie magnétique avec leur produit YRTSM [48].



*Figure 60. Principe de fonctionnement des roulements avec capteur de vitesse (extrait de [47])*



*Figure 61. Deux méthodes de mesure disponibles chez NTN (extrait de [49])*

### 3.2.2. Mesure de vitesse à l'aide de capteurs optiques

Pour la société NKE, la mesure de vitesse passe par l'utilisation de technologies alternatives au magnétisme [50]. En effet, NKE avance l'argument que les capteurs magnétiques sont sensibles aux perturbations électromagnétiques et aux sources d'interférences. Pour répondre à cette problématique, NKE développe depuis les cinq dernières années un principe de mesure optique de la vitesse et de la position. Actuellement, peu d'informations sont disponibles sur ce produit hormis que la mesure de vitesse repose sur le principe de codeurs incrémentaux [50].

Le principe général de mesure est illustré dans la *Figure 62*. La périphérie du disque du codeur est divisée en "x" fentes régulièrement réparties. Un faisceau lumineux se trouve derrière ces fentes, dirigé vers une diode photosensible. Chaque fois que le faisceau est coupé, le capteur envoie un signal qui permet de connaître la variation de position de l'arbre. Pour connaître le sens de rotation du codeur, il faut utiliser un deuxième faisceau lumineux qui sera décalé par rapport au premier. Le premier faisceau qui enverra son signal indiquera aussi le sens de rotation du codeur [51].

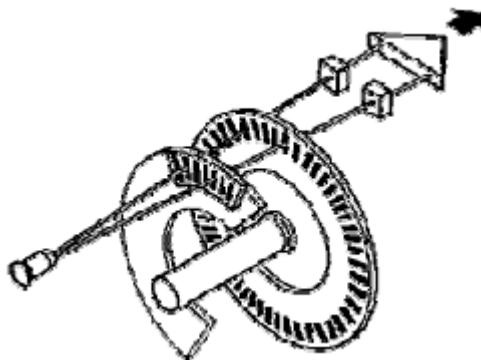


Figure 62. Principe de fonctionnement du codeur optique (extrait de [51])

### 3.2.3. Comparaison des deux méthodes

La majorité des concepteurs de roulements s'orientent sur la technologie magnétique, en raison du retour d'expérience de 20 ans et d'un coût économique moindre par rapport aux mesures optiques. Afin de démontrer l'avantage des capteurs magnétiques, le fabricant Schaeffler a réalisé une comparaison entre les deux [52]. Les résultats démontrent des réponses analogues entre les deux solutions. Les roulements avec capteurs optiques trouveraient leurs applications dans les marchés de niche, comme pour l'imagerie médicale.

## 3.3. La mesure de position

Le besoin de mesure de position est né du développement du marché de la mécatronique, par exemple pour le contrôle des positions et des déplacements de machines-outils. Encore une fois, deux des technologies, magnétique et optique, ont été sélectionnées par les fabricants de roulements.

### 3.3.1 Mesure de position ou d'angle à l'aide de champ magnétique

Le groupe SKF a récemment développé un capteur de position complètement intégré au roulement comme l'illustre la Figure 63. Le principe est analogue à celui présenté dans la Figure 39. Il s'agit d'une roue polaire composée d'une juxtaposition d'éléments magnétiques (Nord Sud) implémentés sur la partie en rotation du roulement [47]. Des capteurs à effet Hall sont disposés de part et d'autre du roulement comme le montre de façon schématisée la Figure 64. Le déphasage mesuré entre deux capteurs permet de remonter à la position du système.



Figure 63. Roulement SKF avec capteur de position intégré, (a) vue en coupe, (b) vue d'ensemble (extrait de [47])

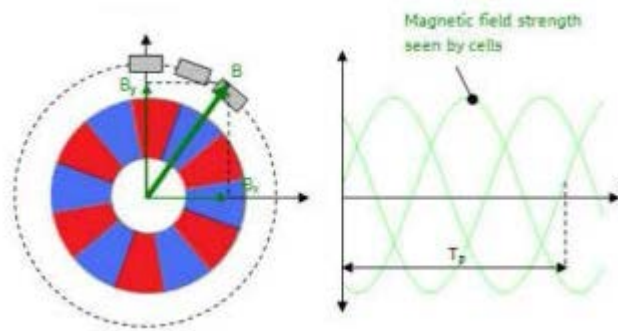


Figure 64. Principe de la mesure d'angle (extrait de [47])

Le groupe SKF n'est pas le seul à avoir parié sur la technologie magnétique. Par exemple NTN (SNR) a aussi développé son capteur de position sur le principe d'une roue multipolaire [53], [54], ainsi que l'américain Torrington (filiale de Timken) [55]. Les produits de ce dernier ont été intégrés dans un petit engin de travaux publics, le Skidsteer A300, permettant un contrôle des roues indépendantes donc d'augmenter la motricité [56].



Figure 65. Skidsteer A300 de Bobcat (extrait de [56])

### 3.3.2 Mesure optique de position ou d'angle

La mesure de position optique repose sur une technologie aussi largement éprouvée depuis un certain nombre d'années. L'entreprise HEIDENHAIN a développé des capteurs fonctionnant selon le principe de balayage photoélectrique. Ce balayage s'effectue sans contact et donc sans usure. Il détecte des traits de divisions d'une largeur de quelques microns et génère des signaux de sortie de période très faible [57]. La Figure 66 donne un exemple de disque proposé par HEIDENHAIN.

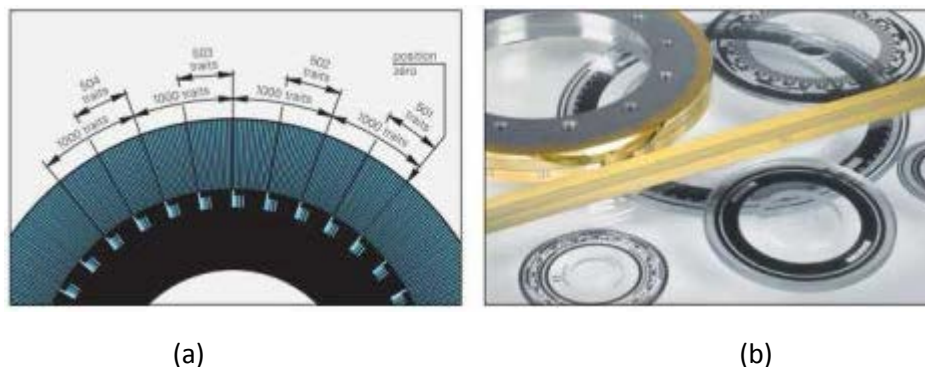


Figure 66. Illustration codeur optique (a) Schéma d'un réseau avec marques de référence à distances codées, (b) Divisions circulaires sur systèmes de mesure angulaire incrémentaux (extrait de [57])

### 3.3.3 Comparaison des deux méthodes

Une conclusion analogue à celle du paragraphe 4.1.3 peut être tirée des développements actuels en termes de capteur de position, à savoir que la technologie magnétique est largement utilisée par les acteurs du marché, en raison de son faible coût et d'une intégration moins complexe. Il semble donc que les capteurs optiques seront cantonnés à des marchés de niches comme le médical ou pour le contrôle de machine de haute précision pour la micro-fabrication.

### 3.4. La mesure d'effort

La mesure d'effort est née d'une double demande des acteurs du marché :

- Pour la réalisation de systèmes mécatroniques, par exemple pour l'automobile : connaître, en temps réel, l'adhérence de chaque pneu à la route [58] ; affiner les systèmes d'ESP (correction de la trajectoire) ; agir sur la consommation du moteur, en amenant la puissance strictement nécessaire à chaque roue [58],
- Pour le contrôle de santé des roulements afin de disposer de systèmes plus compacts. En effet, afin d'améliorer la qualité du signal reçu, les capteurs sont directement placés dans les bagues de roulements [58]. La mesure d'effort est une thématique de fond menée lors de mes expériences à SKF en collaboration avec le LGEF.

La « mesure d'effort » regroupe les méthodes et les technologies de mesure des forces et des moments exercés sur une structure mécanique. Les roulements capteurs d'effort sont utilisés pour mesurer les forces internes et externes dans un montage de roulements. Leur principale caractéristique est leur faible encombrement. Une référence de roulement peut être remplacée par sa version de mesure d'effort dans le cas idéal, mais en réalité, il faut trouver un compromis avec la géométrie et la capacité de charge. La capacité de charge, la répartition interne de la force sur les éléments roulants, la rigidité du roulement et la capacité de vitesse de rotation ne doivent être que marginalement modifiés en introduisant des capteurs dans et autour du roulement. Les analyses numériques et la simulation sont utilisées pour quantifier l'effet des modifications mécaniques nécessaires à l'introduction des capteurs et de leur câblage.

Les roulements capteur d'effort utilisent la déformation élastique de l'acier des bagues du roulement. Les contraintes de contact autour des contacts hertziens sont une source de déformations élastiques. La fonction de mesure peut se réaliser de deux façons :

- Les forces dans le roulement entraînent une contrainte sur une surface et sont mesurées par des jauges de contrainte ;
- Les forces dans le palier conduisent à un déplacement relatif entre deux points où la rigidité est connue ou calibrée, qui est mesuré par des capteurs de déplacement.

Les différences les plus importantes dans les roulements capteurs d'effort portent sur la caractéristique de mesure au sein du roulement. Il existe différentes méthodes de mesure de charge, mais elles peuvent être classées simplement soit comme la combinaison d'un capteur d'effort et d'un roulement, soit comme la mesure de la déformation des bagues du fait de la charge. La *Figure 67* présente les différentes méthodes possibles.

- Intégration d'un capteur d'effort au montage du roulement (M1/M2)
- Mesure de la déformation dans le roulement liée à la pression de contact (G1) ou mesure de la déformation globale de la bague dans son carter (G2) (*Figure 69*) par intégration de capteurs de déformation aux bagues du roulement

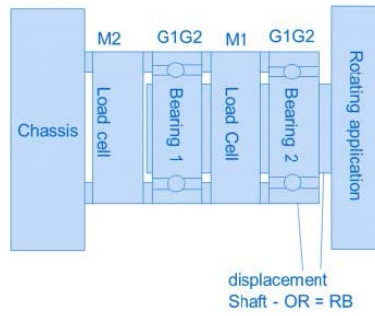


Figure 67. Classification des mesures au sein d'un roulement

La méthode M1 utilise des capteurs d'effort externes dans le montage du roulement (Figure 68).

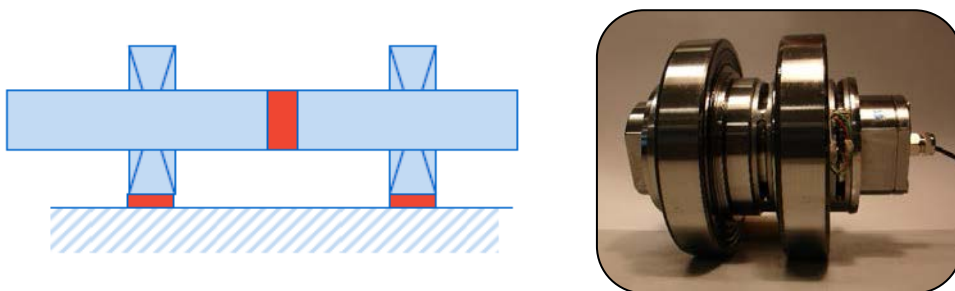


Figure 68. Capteurs d'effort associés au montage du roulement

Les méthodes G1/G2 intègrent des capteurs de déformation aux bagues du roulement.

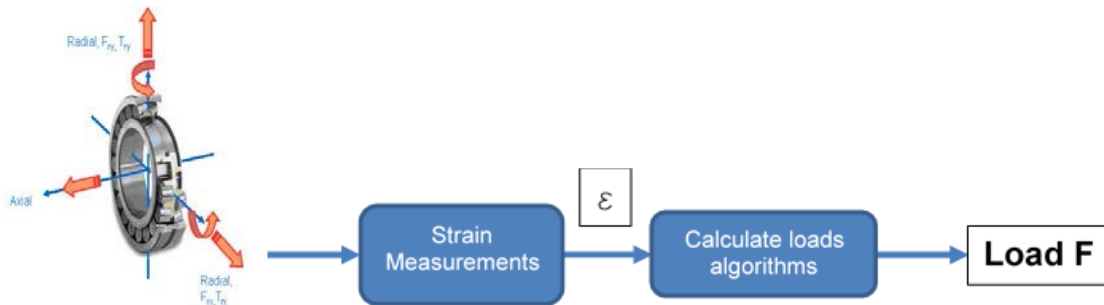


Figure 69. Mesure d'effort intégré au roulement

Les Figure 70 et Figure 71 sont des illustrations des modes de chargement d'un roulement et des signaux typiquement observés.

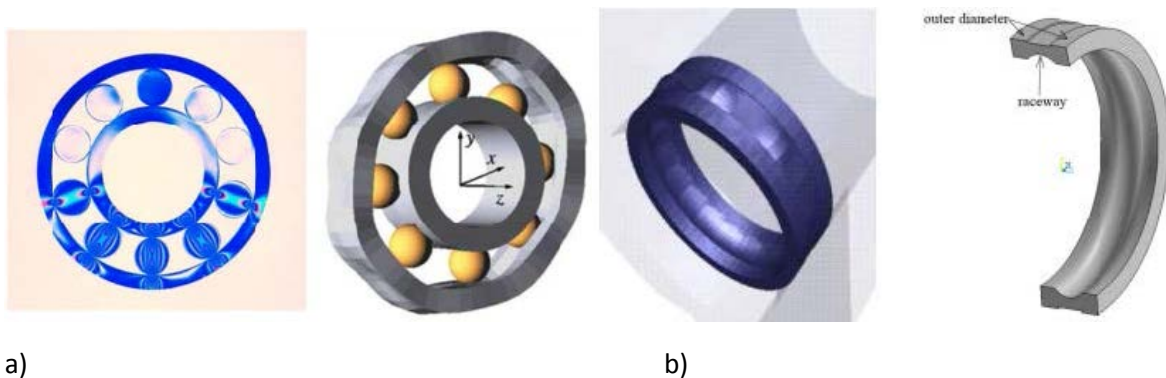


Figure 70. Visualisation de la déformation des bagues a) local b) global



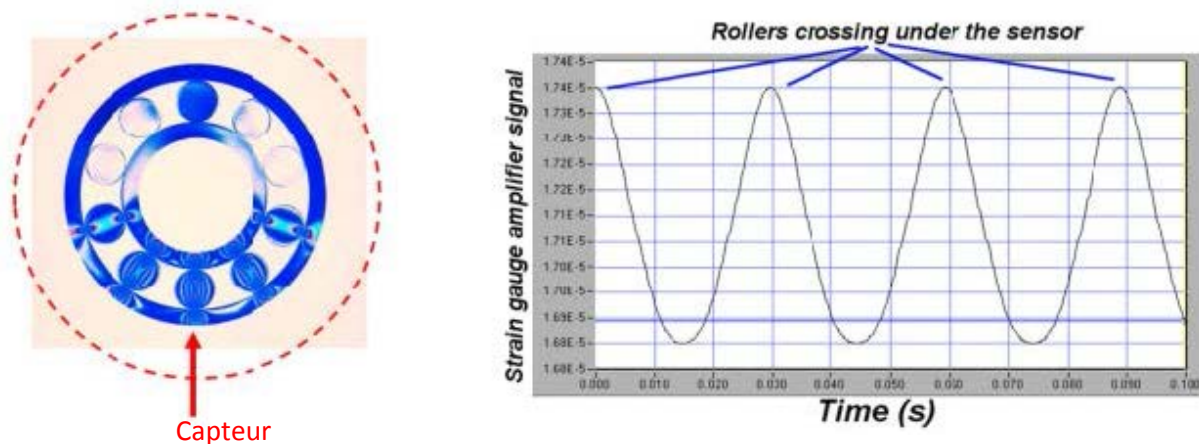


Figure 71. Réponse d'un capteur (flèche rouge) de déformation au passage d'un élément roulant chargé

Le développement de capteurs d'effort pour les roulements est majoritairement basé sur l'utilisation de capteurs piézoélectriques ou piézo-résistifs. D'autres technologies ont aussi vu le jour comme les mesures par fibre optique ou variation de capacité. L'ensemble des solutions actuellement disponibles sera décrit dans le prochain paragraphe.

La chaîne de mesure est présentée dans la Figure 72. Elle comprend le capteur de déformation, le conditionnement et le traitement de la mesure.

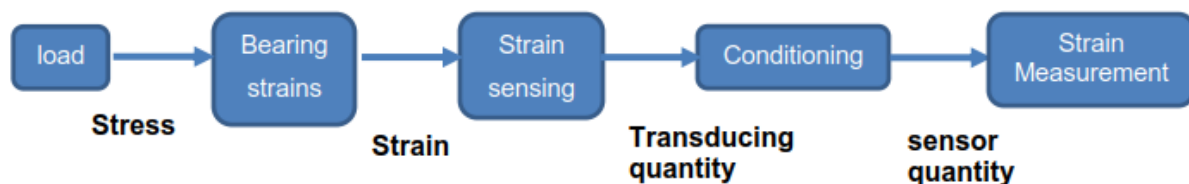


Figure 72. Chaîne de mesure d'un roulement capteur d'effort

Plusieurs technologies de mesure de contraintes peuvent être intégrées au roulement pour la mesure de d'effort, telles que les jauges de contrainte, les fibres optiques FBG et les transducteurs piézoélectriques. Pour les technologies des jauges de contrainte et des fibres optiques, des rainures spécifiques doivent être usinées afin d'intégrer les composants correspondants en conservant la même enveloppe de roulement. L'intégration de la rainure est soigneusement calculée par SKF afin de garantir que l'intrusion de l'instrumentation n'aura aucun impact sur la durée de vie des roulements pendant la campagne de test du client. Le roulement instrumenté aura le même comportement que sa version non instrumentée.

Une fois que les contraintes sont mesurées, la charge doit être calculée à l'aide d'un algorithme de calcul de charge. Deux principales approches d'algorithme dans les solutions de détection de charge intégrées peuvent être utilisées selon l'objectif de la mesure et sa qualité métrologique :

- Utilisation des déformations liées aux pressions de contact cycliques causées par le contact de la bague-élément roulant en raison de la charge externe qui est supportée et répartie sur les points de contact (méthode G1),
- Utilisation des modes de déformation globaux des bagues du roulement. Le roulement est utilisé comme une cellule de charge (méthode G2)

Le Tableau 3 compare les deux méthodes.

	Méthode de calcul G1	Méthode de calcul G2
Principe	<p>Forces de contact</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Effort = Somme des forces de contact</li> <li>• Forces de contact -&gt; Contrainte locale -&gt; Déformation sur les surfaces extérieures du roulement</li> <li>• Signal presque périodique quand les efforts sont quasi statiques</li> </ul>	<p>Déformation globale des bagues</p> <p>Effort = Déformation globale du roulement en fonction des efforts externes</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Effort externe -&gt; Contrainte globale -&gt; Déformation des bagues</li> <li>• La déformation élastique des bagues du roulement est exprimé en mode de déformé d'un anneau</li> </ul>
Avantages	<p>Insensible au gradient thermique provenant de la friction interne du roulement</p>	<p>Le temps de réponse est court et la bande passante dynamique est large. La déformée élastique évolue rapidement en fonction des changements d'effort</p>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les variations rapides d'effort sont difficilement observable</li> <li>• Pas de mesure de charge statique (nécessite la rotation du roulement pour fonctionner)</li> <li>• Calibration nécessaire et dépendante du montage</li> </ul>	<p>Fortement influencée par la rigidité du carter et les gradients thermiques dont la constante de temps d'établissement du régime continu de transfert de chaleur est supérieure à 10 s</p>

Tableau 3. Comparaison des méthodes d'estimation de la charge à partir d'une mesure de déformation

### 3.4.1. Synthèse sur les mesures d'effort dans les roulements

La majorité des industriels du roulement se sont orientés sur la technologie piézo-résistive ou piézoélectrique pour la réalisation de leurs capteurs d'effort. En effet avant d'être intégrés dans les roulements, ces types de capteurs étaient utilisés pour remplir la même fonction mais de façon discrète (éléments rajoutés sur le roulement).

De plus, les capteurs piézo-résistifs et piézoélectriques sont réputés pour leur bande passante importante et une très bonne stabilité en température. Les capteurs optiques à réseau de Bragg constituent également une alternative de par la possibilité d'avoir une multitude de points de mesure sur une seule fibre, réduisant le nombre de câbles à connecter par rapport aux solutions précédentes. La table suivante établit un comparatif entre les principales technologies de mesure.

		Jauges de contrainte	Fibre optique à réseau de Bragg	Film piézoélectrique
Caractéristiques principales	Avantages	Technologie mature	Multiplexage	Bande passante importante
	Inconvénients	Nombre de fils Faible amplitude du signal	FBG sensible à la température et aux contraintes	effet pyroelectric
Niveau de maturité pour l'instrumentation de roulements		Applications industrielles existantes pour des températures et des vitesses basses		
Sensibilité (V/ $\mu$ def)		0.000005	0.001	5
Précision (1 to 100 Hz)		0.01	0.0001	0.00001
Span (rapport étendue de mesure / précision)		5x10e3	2.5x10e6	10e8
Sensibilité à la température		La sensibilité change avec la température comme le module de Young du matériau. Ceci peut être corrigé sur le conditionnement du signal	La sensibilité des capteurs à fibre optique est très dépendante de la température. Cette dernière doit être mesurée en même temps afin de pouvoir compenser cette variation.	Les transducteurs piézoélectriques présentent une légère dépendance de leur sensibilité vis à vis de la température. Si cette dernière est prise en compte dans le calcul de la sensibilité globale de la chaîne de mesure, la compensation n'est pas nécessaire.
Sensibilité électromagnétique		sensible	Non sensible	sensible
Linéarité		Lineaire	Le factor de jauge est différent entre la compression et la traction	5% de l'étendue de mesure
Rigidité		Faible rigidité	Faible rigidité	Haute rigidité (céramique)
Dérive (vieillessement)		Très faible dérive	Faible dérive	Faible dérive
Dérive thermique du zero		Changement de résistance avec la température, peut être corrigé avec le conditionnement	Dérive avec la température, doit être recalé en mesurant la température de la fibre	Dérive liée à la dilatation du matériau, peut être corrigé lors de l'intégration ou par le conditionnement
Robustesse aux environnements extrêmes		élevé	élevé	élevé

Tableau 4. Tableau comparatif des capteurs de déformation pour roulement capteur d'effort

### 3.5. Autres mesures

Pour effectuer un monitoring complet du roulement (paragraphe 3.4.5), il est nécessaire de disposer d'autres grandeurs physiques comme

- La température
- L'état de la lubrification
- Les vibrations

C'est dans cette optique que différents fabricants proposent des roulements intégrant ces mesures.

#### 3.5.1 Mesure de température

L'élévation de température d'un roulement fournit des informations sur un futur dysfonctionnement, comme cela a été présenté au paragraphe 3.4.2. Généralement, les mesures sont réalisées à l'aide de

caméras thermiques ou de thermocouples fixés autour du roulement. Afin de disposer des informations au plus près du système, le LIST (Laboratory for Integrated Sensing Technologies) de l'Université de Puerto Rico USA, a développé un roulement où les mesures sont effectuées directement sur la bague et transmises sans fil [66]. La *Figure 73* présente une vue en coupe du système réalisé par l'équipe du Pr. Yi JIA. Le capteur de température est de type capacitif. La capacité de celui-ci évolue donc avec la température. Cette variation est mesurée de façon passive et sans fil à l'aide d'un circuit résonnant LC. Malgré un concept intéressant, la solution n'a pas encore été appliquée à l'échelle industrielle. D'autres études menées sur des concepts analogues sont en cours à l'Université de Purdue, USA [67].

Les constructeurs de roulements ne proposent que peu de solutions avec mesure de température intégrée. Par exemple, chez Timken, leur produit « Live Spindle Hub » dispose de la mesure de température [68], mais peu d'informations sont disponibles sur les technologies utilisées, de même pour certains produits de chez NTN [69]. Ce manque d'information est causé soit par une faible demande des acteurs socio-économiques, soit à cause d'un véritable verrou technologique.



*Figure 73. Vue en coupe du capteur de température et de la transmission sans fil (extrait de [66])*

### 3.5.2 Mesure de lubrification

Chez l'équipementier Schaeffler, les roulements intègrent des capteurs qui mesurent le taux d'huile dans la graisse afin de détecter une mauvaise lubrification [70]. Il s'agit de petits capteurs chimiques qui réagissent à la présence d'huile ou, au contraire, à son absence [71]. La *Figure 74* présente le roulement de chez Schaeffler développé pour des applications ferroviaires, avec une mesure de la durée de fonctionnement et de la présence d'huile afin d'optimiser la maintenance des trains [70].



*Figure 74. Capteur Schaeffler avec détection de présence d'huile (extrait de [70])*

### 3.5.3 Mesure de vibration

Selon l'article et le brevet, le fabricant Schaeffler a réalisé des prototypes de roulements avec des accéléromètres intégrés de type piézoélectrique [72]. Mais il n'est pas le seul en lice pour la mise en œuvre du diagnostic vibratoire, on peut citer le groupe SKF et son produit SKF InsightTM [61], ainsi que NTN qui affiche sur son site web le développement de roulement avec diagnostic intégré [42] (Figure 59).

### 3.6. Synthèse sur l'ensemble des mesures effectuées par des roulements instrumentés

Pour l'heure, seuls les roulements capables de mesurer vitesse, sens de rotation et position sont dans les catalogues des constructeurs. Le *Tableau 5* synthétise les grandeurs physiques actuellement envisagées et leur principe de mesure, ainsi que leur consommation typique. Cette dernière information est déduite des documents fabricants ou à partir de recherches antérieures effectuées au LGEF. L'annexe 2, fournit des informations sur les sources qu'il est possible d'exploiter dans l'environnement du roulement afin de rendre celui-ci autonome en énergie.

Type	Disponible	Principe de mesure	Consommation typique
Vitesse	Oui	Magnétique roue multipolaire et capteur à effet Hall	<500mW
Position	Oui	Magnétique roue multipolaire et capteur à effet Hall	<500mW
Effort	Non	Corps d'épreuve et jauge piézo-résistive	<10mW
Température	Non	Pas de standard	100μW
Lubrification	Non	Pas de standard	Non connue
Vibration	Non	Accéléromètre piézoélectrique	<10mW

Tableau 5. Synthèse des différentes mesures sur capteur instrumenté

### 3.7. Les applications utilisant des capteurs instrumentés

L'objectif de cette partie est de donner un aperçu rapide des applications actuelles et futures pour les roulements instrumentés.

SNR a inventé en 1996 l'ASB (Active sensor bearing), ou roulement-capteur actif, qui est devenu un standard mondial. Il permet de mesurer la vitesse et la position. Ces informations sont envoyées à l'ordinateur de bord du véhicule. Dès que celui-ci constate une diminution importante et soudaine de la vitesse (freinage brutal), il régule la pression dans le circuit de freinage pour éviter le blocage des roues et la perte de contrôle du véhicule. L'ESP (Electronic Stability Program ou contrôle électronique de trajectoire) découle aussi de cette avancée [73].

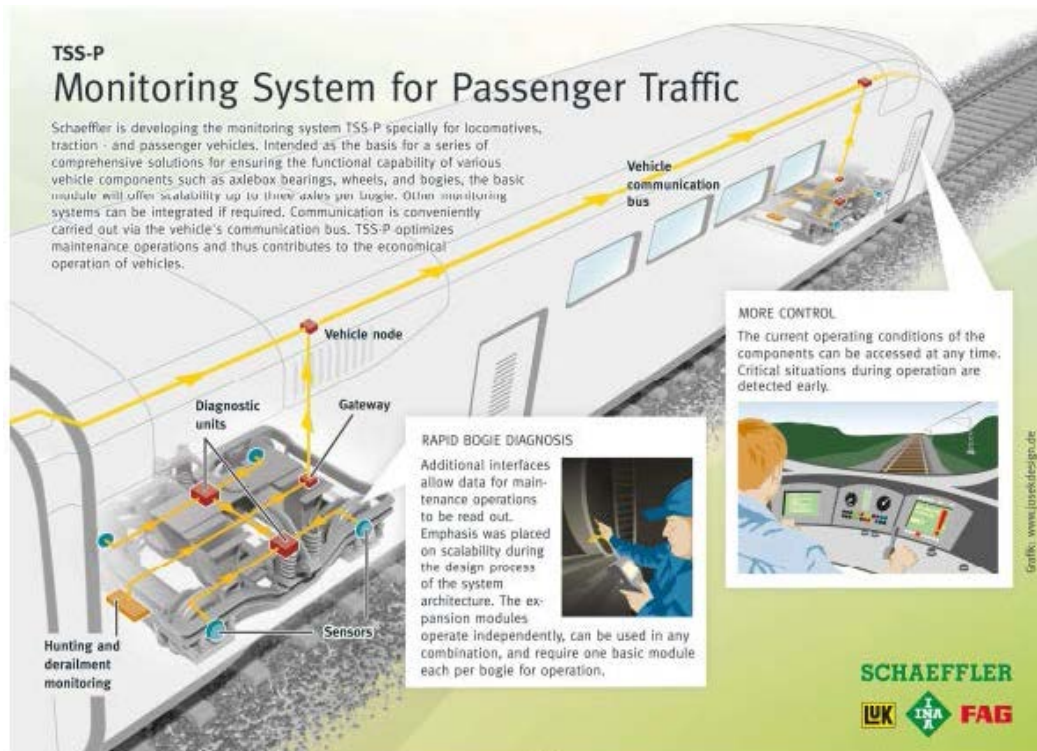
Depuis quelques années, d'autres secteurs industriels s'intéressent à ces technologies. Les chariots élévateurs en sont les plus gros consommateurs, de même que les engins de chantier, les machines agricoles, les moteurs de voitures électriques, le ferroviaire ou les plateaux tournants de machines-outils. Grâce à des avantages comme le volume, la facilité d'intégration dans la conception d'un produit, les roulements instrumentés convainquent peu à peu les industriels qu'ils peuvent se substituer aux coûteux systèmes à base de capteurs optiques, encore majoritairement utilisés pour connaître la position d'un axe tournant [73].

Toutefois, ce marché reste confidentiel. Le constructeur NTN fabrique 80 000 roulements pour l'ABS par jour, mais pour les moteurs électriques c'est encore du sur-mesure. Le besoin de diagnostic à distance des machines tournantes et du matériel ferroviaire ainsi que le développement des éoliennes, vont sans doute permettre l'émergence de nouveaux marchés.

Actuellement, le système européen de contrôle des trains (ETCS) vise à remplacer la détection ponctuelle par des systèmes infrarouges au sol, et celle des échauffements anormaux des boîtes d'essieux par un contrôle continu embarqué, unifié au niveau européen. NTN a déjà des roulements capteurs de température avec autodiagnostic en test sur un train en circulation [73]. Mais il n'est pas le seul à avoir perçu cette opportunité. Schaeffler est en mesure de proposer une alimentation en énergie autonome pour wagons de marchandises, en y intégrant à l'avenir un système de surveillance.

Dans le secteur des locomotives, des automotrices et des automobiles, Schaeffler met actuellement au point, un système de surveillance de bogies connu sous le nom de "TSS-P" (Figure 75(a)). Le module de base intègre des capteurs pour la surveillance de la température, l'accélération et la vitesse de rotation. Ce système permet une surveillance de l'état des roulements et de la roue, ainsi que la détection de différents types d'événements comme le roulis. D'après le site web de Schaeffler ces projets de développement ne sont qu'à quelques mois de la mise en production de série, après une phase de test intense menée en collaboration étroite avec la clientèle [74].

En septembre, à l'Eurobike 2010, Bosch a présenté l'E-bike, son tout nouveau vélo électrique (Figure 75(b)). Sur l'axe de pédalier, un roulement intelligent signé Fag (ccFAG BB RTS F-579008) mesure non seulement la vitesse et le sens de rotation, mais aussi le couple, en sommant la force appliquée sur chacune des pédales [75]. Ce contrôle en continu (plusieurs fois par secondes) de l'effort développé par le cycliste, permet de déterminer précisément la puissance supplémentaire à lui fournir, et ainsi de commander le moteur électrique. Le roulement capteur embarqué met en œuvre deux méthodes de mesure sans contact : l'effet Hall pour la vitesse et le sens de rotation et un système magnéto-élastique pour le couple.



(a)

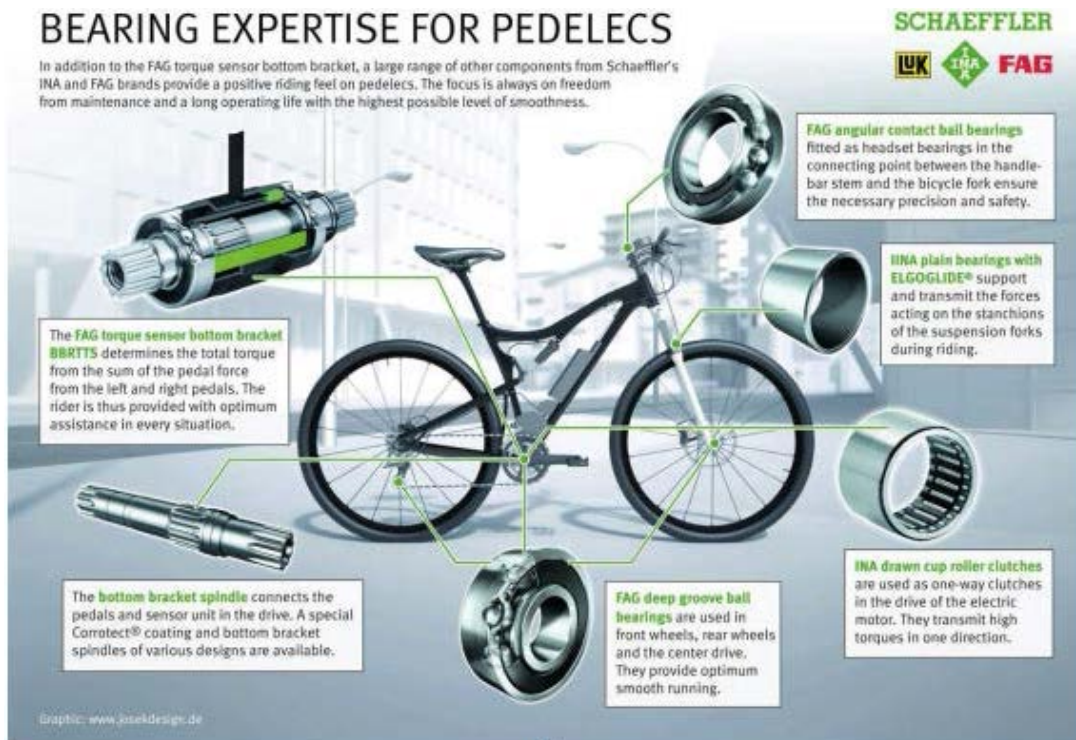




Figure 77. Application possible des roulements instrumentés chez NTN (extrait de [77])

Plusieurs constructeurs automobiles se sont déjà montrés intéressés par ce concept. En effet, NTN-SNR a présenté ainsi le Q-Mo, un véhicule prototype équipé de quatre moteurs électriques situés dans les roues [77]. Outre l'innovation technologique, dont le cœur se situe dans les remontées d'informations fournies par le roulement instrumenté ASB de l'équipementier, NTN indique donc une rupture technologique imminente car leurs roulements permettent de s'affranchir de la transmission mécanique comme de la direction, puisque ces fonctions sont gérées électriquement et surveillées par l'électronique du véhicule. Ce qui offre une réduction des coûts potentiellement importante, une liberté plus grande pour les designers, et une fiabilité accrue. Comme le montrent les exemples précédents, le potentiel applicatif des roulements dit intelligents est vaste. D'où une forte implication des fabricants de roulements pour le développement et la démocratisation de ces produits.



## Chapitre 4 Synthèse sur le roulement smart

### 4.1. PHM et roulement intelligent

Les chapitres précédents ont présenté plusieurs éléments à considérer pour la conception d'un roulement intelligent autonome avec des capacités d'autodiagnostic lui permettant de développer un processus de PHM autour des roulements.

Aujourd'hui, le Prognostic Health Monitoring (PHM) est une fonction de maintenance qui vise à optimiser la fiabilité opérationnelle des systèmes (réduction des évènements opérationnels) et à planifier les opérations de maintenance. Pour l'aéronautique, cette fonction est sans impact sur le vol, et donc non certifiée.

Le processus de PHM intégrant un roulement intelligent est résumé par la figure suivante :

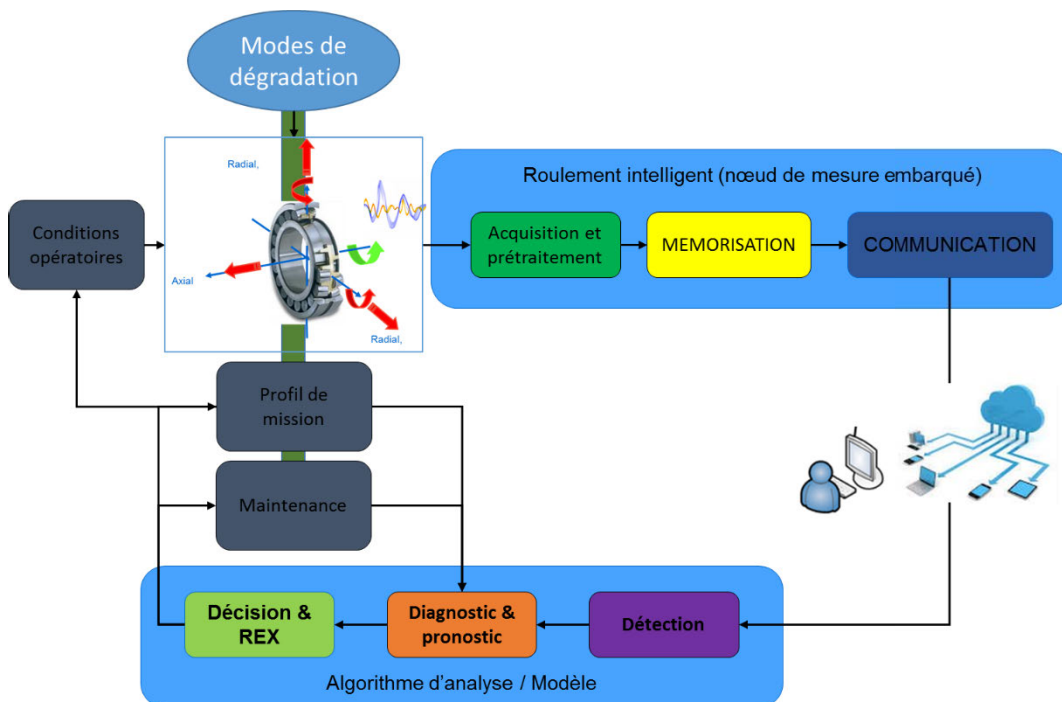


Figure 78. Processus de PHM autour du roulement smart

Même si le pronostic reste la finalité générale du PHM, il ne doit pas être considéré de manière isolée :

- L'anticipation des défaillances ne peut se faire que si les phénomènes de dégradation sont correctement appréhendés (acquisition de données, extraction de descripteurs, détection, diagnostic).
- La durée de vie résiduelle (Remaining Useful Life) n'est pas une fin en soi. Son estimation doit conduire à une politique de *réaction* adéquate.

Les mécanismes de dégradation, bien que nombreux, modifient tous la vibration émise par le roulement ou la répartition de la charge et aboutissent à une dégradation des surfaces fonctionnelles des pistes de roulement sur les bagues (Figure 79). La dissociation/combinaison de dégradation multiples reste cependant mal connue, de même que l'intégration des constantes de temps variables de ces phénomènes ainsi que la qualification de l'état du roulement. Le comportement du roulement dépend également du profil de mission, des conditions opératoires réelles et peut aussi être impacté par une action de maintenance. La connaissance de l'historique de ces sollicitations reste donc

essentielle pour l'étape de pronostic. Les modes de défaillance du roulement et leurs signatures associées sont un domaine nécessitant de la recherche :

- Etablissement d'une liste de modes de défaillance du roulement et signatures associées et identification des modèles de diagnostic et pronostic associés.
- Identification de la meilleure signature de défaillance (thermique, cinématique, acoustique, vibratoire, ...) au regard du besoin en termes d'horizon de détection.
- Modèle de dégradation du roulement dans un environnement machine d'essai et machine en opération, avec réalisation d'expérimentation utilisant des défauts calibrés et représentatif des défauts en opération.

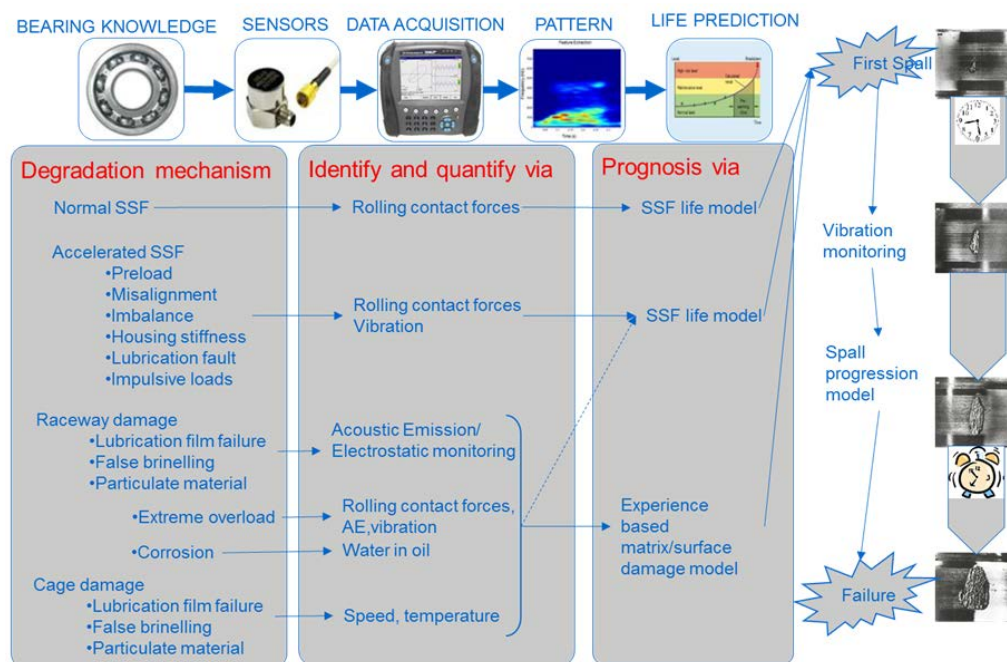


Figure 79. Mécanismes d'endommagement et leur détection

Le choix de la chaîne d'acquisition (nature des capteurs, fréquence de mesures, procédures de routage des données) et de la mémorisation des mesures est un point clé. Ces dernières doivent être fiables et répétables, avec des capteurs faiblement intrusifs pour être facilement intégrables à la structure du roulement.

Les grandeurs pertinentes à mesurer sont les suivantes :

- Température de différents éléments (bagues, cage, lubrifiant).
- Epaisseur de lubrifiant et pollution.
- Vitesse de rotation de différents éléments (bagues, cage, éléments roulants).
- Effort radial et effort axial.
- Jeu interne roulement.
- Signature vibratoire et acoustique.

Pour pouvoir embarquer la mesure sur la structure et par rapport au diagnostic, les mesures suivantes sont les plus adaptées au roulement smart :

- Signature vibratoire et acoustique : mesure de la vibration et de l'émission acoustique générée par le contact roulant. Ces mesures permettent de réaliser le diagnostic et le pronostic pour des défauts sur la surface de roulement des bagues.
- Vitesse de rotation, température et effort : ces mesures correspondent le plus aux données opératoires nécessaires pour vérifier un mode de fonctionnement

Un exemple de synoptique système est donné en Figure 80

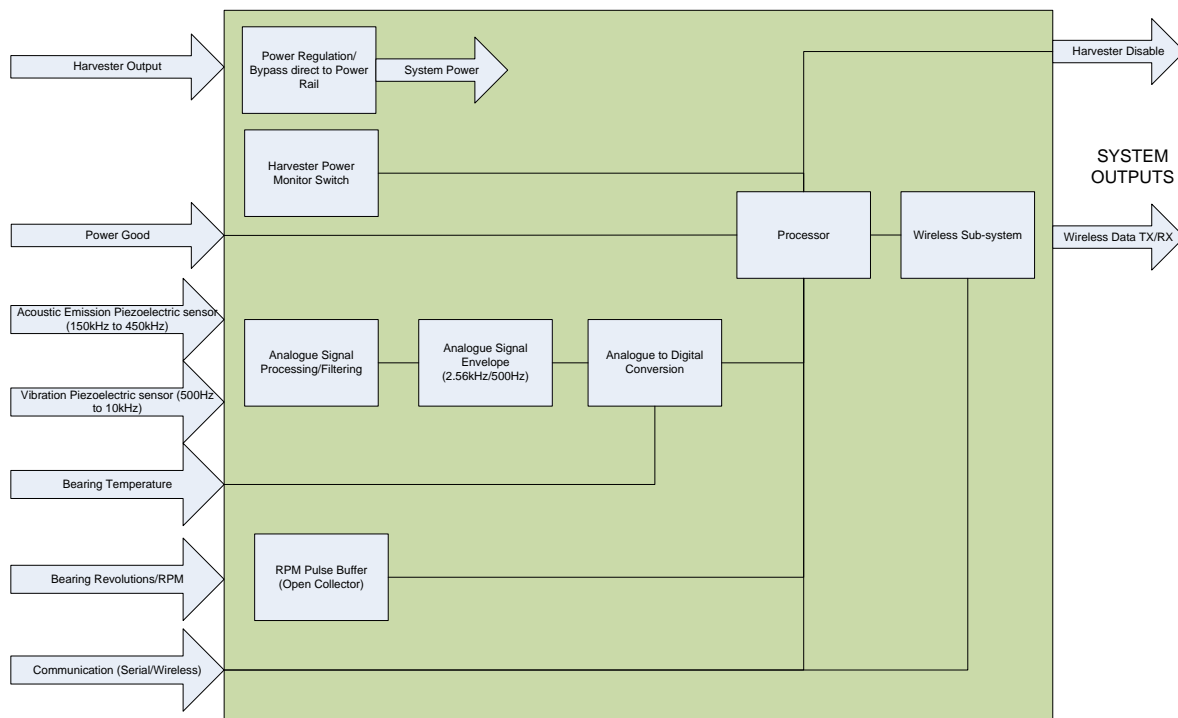


Figure 80. Synoptique système d'un roulement intelligent

Dans cette architecture, le calcul et la réduction de donnée est réalisé localement dans le système embarqué sur le roulement. Cela dépend des signaux à traiter et des capacités de transfert. Le stockage se réalise en local.

L'alimentation du système est un point clé permettant le déploiement facile du système embarqué s'il est associé à une transmission sans fil.

La méthode d'extraction de caractéristiques à des fins d'indication de dégradation dépend de l'application du roulement. La méthode faisant le plus consensus est l'utilisation du spectre d'enveloppe, avec une réduction du signal autour des fréquences caractéristiques des défauts. Plusieurs méthodes existent, nécessitant plus ou moins de puissance de calcul lors du traitement du signal. Elles sont rappelées en Figure 81.

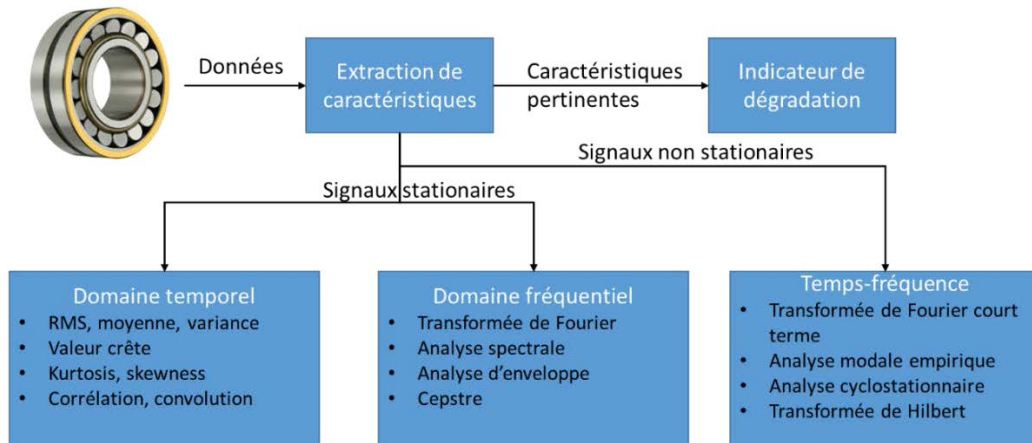


Figure 81. Méthodes d'extraction d'indicateur de dégradation

#### 4.2. Architecture du roulement intelligent

Une architecture du roulement intelligent est présentée en Figure 82

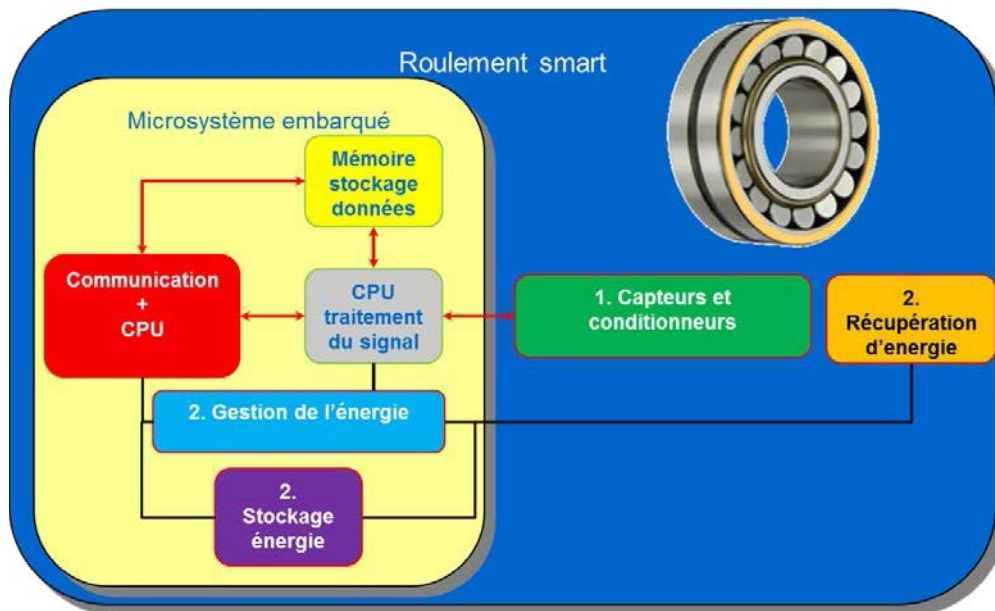


Figure 82. Architecture du roulement intelligent

La surveillance de l'état d'un roulement est, en général, réalisée par un capteur accélérométrique ou d'émission acoustique. Par rapport à ce type de mesure, le rapport signal à bruit est fondamental, encore plus que pour les méthodes de traitement du signal pour la détection de défauts.

La présence de bruit vibratoire externe peut être préjudiciable si son ampleur est assez grande pour cacher une signature de défaut de roulement. Ainsi, la détection de défauts est améliorée si le capteur est proche de la source du défaut. Cette architecture cherche donc une intégration des capteurs à la structure de roulement. La partie récupération d'énergie peut avantageusement être intégrée également à la structure du roulement.

Cette intégration, qui doit rester la moins intrusive possible, modifie par contre la structure du roulement. Des exemples concrets d'intégration seront présentés en partie II du présent mémoire.

Le reste des fonctions peut être intégré à un module indépendant, regroupant également les autres fonctions nécessaires au bon fonctionnement du système :

- **Composant pour le prétraitement du signal** : Le type de composant peut être un DSP, adapté au traitement du signal. Le DSP a pour fonctions principales de convertir les signaux issus des capteurs et de les mémoriser dans des mémoires externes de grande capacité. Il doit également pouvoir communiquer avec un autre chip par une liaison série type I2C, SPI ou RS485 et un ordinateur par une liaison RS232. L'utilisation d'un DSP sur une carte nécessite de réaliser d'autres fonctions électroniques telles que son alimentation (3,3V et 1,9V), une horloge, une configuration pour lui préciser son mode de démarrage, et une connexion appelée JTAG pour le programmer. La réalisation de l'horloge du DSP reste en général le point le plus délicat pour les environnements à large plage de température.
- **Composant pour la communication et le transfert des données** : La surveillance en ligne de chaque roulement d'une transmission nécessite un système de télémétrie robuste par protocole radio qui peut transmettre les signaux des capteurs au système de diagnostic. Ce protocole radio doit de plus travailler dans un environnement fortement métallique source de nombreuses interférences. De plus les données transmises étant utilisées à des fins de diagnostic et de pronostic, le volume d'information à transmettre est important, nécessitant une forte bande passante. Ce protocole radio doit pouvoir également consommer faiblement afin de ne pas nuire à la performance énergétique du système. Les besoins en termes de protocole radio sont donc :
  1. Un fort niveau d'intégration pour un environnement radio complexe
  2. Fréquence et modulation robuste évitant les réverbérations
  3. Forte autonomie : la faible consommation énergétique requise et l'environnement complexe militent pour des protocoles passifs évitant le maintien d'une architecture de communication en réseau. Pour ce dernier point, on préférera une architecture en réseau maillé pour remonter les données à la demande. Le temps d'établissement de connexion et débits de données sont alors extrêmement rapides.
- **Gestion et stockage de l'énergie produite par le module de récupération.**
- **Mémoire pour un stockage local de l'information** : Les mémoires flash vont être utilisées pour stocker les données issues des capteurs. L'architecture envisagée du roulement smart prévoit cinq signaux issus des capteurs à enregistrer pour au moins 1 heure d'enregistrement. L'espace mémoire nécessaire est :

$$f_{ech} \times Nb_{bits} \times Nb_{capteur} \times t_{record} = 20000 \times 16 \times 4 \times 750 = 9,6.10^8 \text{ Bits}$$

Avec  $f_{ech}$ : la fréquence d'échantillonnage,  $Nb_{bits}$ : le nombre de bits à enregistrer,  $Nb_{capteur}$ , le nombre de capteurs et  $t_{record}$ , le temps d'enregistrement en secondes à couvrir.

Dans ce calcul, certaines hypothèses ont été faites. La première concerne le choix de la fréquence d'échantillonnage. Elle a été choisie à 20 kHz par compromis. La deuxième hypothèse concerne le nombre de capteurs. En effet, nous avons 5 capteurs et je n'en ai compté que 4 car les variations de températures étant des phénomènes avec une inertie importante, il n'est pas nécessaire d'échantillonner ces signaux à 20kHz. On peut échantillonner les températures toutes les 1 à 2 secondes seulement. Il existe 3 technologies de mémoires flash : les mémoires NAND, SPI et NOR. Les mémoires NAND sont utilisées dans les clefs USB. Les bus d'adresses et de données sont multiplexés, on peut atteindre des débits de 2,4 Mbit/s et une capacité de 32 Gb sur une seule puce. Les mémoires SPI quant à elles ont un débit moins élevé et une capacité moindre (128Mo max) mais elles tiennent dans un petit boîtier 8 broches (SOIC8). Les mémoires flash NOR ont, quant à elles, des bus d'adressage et de données distincts, peuvent atteindre des capacités de 1Gb et ont la vitesse de transfert la

plus élevée. Notre choix s'est porté sur la technologie NOR car c'est elle qui était la plus adaptée pour communiquer avec le DSP et qui avait une capacité pouvant répondre à notre besoin.

Les travaux actuels portent sur l'intégration d'un chip RFID. La RFID offre l'avantage de réaliser une liaison radio téléalimentable par le lien de communication, et permettant la communication avec plusieurs objets en simultanément. La RFID fait l'objet de développement actuellement afin de réaliser des capteurs (Figure 83).

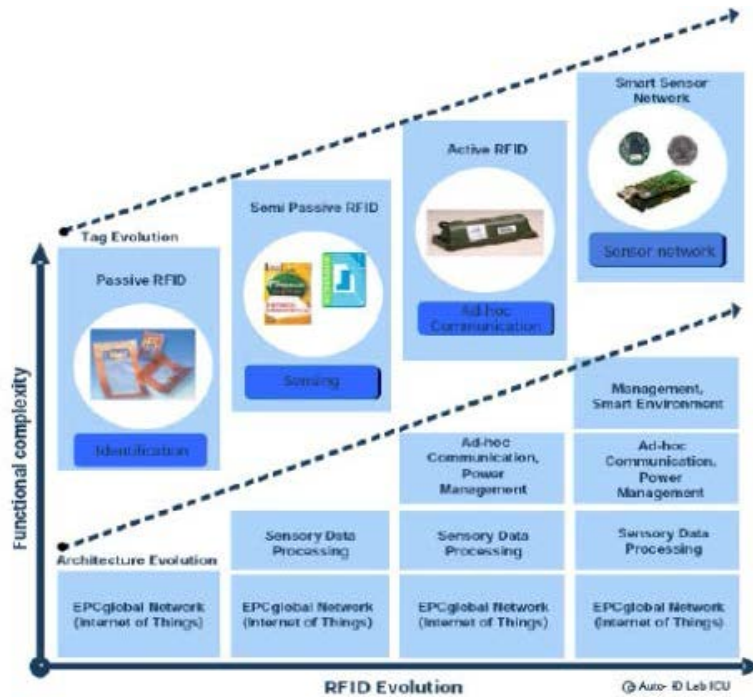


Figure 83. Evolution de la RFID

Le roulement intelligent comporte de nombreux challenges :

- CHALLENGE INTEGRATION CAPTEUR AU ROULEMENT

Les produits mécatroniques exploitant de l'électronique associé à des capteurs et actionneurs prennent une place de plus en plus prépondérante dans des applications variées du contrôle de santé allant des pales d'hélicoptère à l'ABS. L'état de l'art du présent mémoire a montré l'aspect volumineux de cette approche et la nécessité de réaliser des travaux de recherche pour une intégration plus poussée.

- CHALLENGE RECUPERATION D'ENERGIE

Au vu des applications roulement, il est possible d'utiliser trois types de gisements pour rendre énergétiquement indépendant les systèmes :

- Vibratoire
- Thermique
- Mécanique (rotation)

De façon générale, le développement et la conception de systèmes autonomes pour les roulements sont très récents, mais beaucoup de points restent à éclaircir. Cela passera par une recherche en amont

(recherche de nouveau procédé de conversion, développement d'une électronique dédiée, etc.), sans oublier la partie applicative pour montrer la rupture technologique qu'apportent ces nouveaux systèmes.

Enfin, les considérations du microgénérateur seul ne sont pas suffisantes. En effet, il faut considérer les contraintes énergétiques, notamment en termes de bilan énergétique entre l'énergie récupérée et celle nécessaire à l'accomplissement de la fonction. Ainsi, il convient de totalement repenser l'application et l'implémentation des fonctions désirées, afin d'avoir un système autoalimenté viable. Cela impose donc une réelle synergie et harmonie entre les différents acteurs (fabricant de la solution, intégrateur), chacun ayant son domaine d'expertise propre.

- CHALLENGE RF

La transmission en environnement fortement métallique reste un challenge fort pour les systèmes basés sur une communication par protocole RFID.

- CHALLENGE TRAITEMENT DES DONNEES POUR L'ANALYSE VIBRATOIRE

L'analyse vibratoire, si elle reste la référence pour la détection de défaut dans les roulements, nécessite beaucoup d'énergie au sein d'un système embarqué lors du traitement de ce type de signaux.

- CHALLENGE OPTIMISATION GLOBALE – DYNAMIQUE

L'analyse de la chaîne de conversion d'énergie complète n'est pas encore maîtrisée. Une architecture cohérente est nécessaire de sorte que la consommation s'ajuste à la production. De nombreuses étapes restent à franchir pour que tous les acteurs impliqués dans la conception d'un tel système se comprennent réellement. L'énergie ambiante varie au cours du temps (cycle des jours, vibrations, variations de température...), et se devra d'être stockée en permanence dans un « buffer » énergétique, pour être disponible et suffisante aux moments opportuns. Un des défis majeurs de ce projet de recherche est l'optimisation du système qui se doit d'être globale : elle doit porter sur l'ensemble des étapes comprenant l'absorption de l'énergie ambiante par le système lui-même, la conversion en énergie électrique pour son traitement et sa gestion (rendement électrique). De nombreux travaux ont déjà été effectués pour extraire et stocker ces types d'énergie (thermique et/ou mécanique). Une optimisation par étapes élémentaires ne correspondra pas au fonctionnement optimal de l'ensemble.

Il est également important de différencier l'énergie extraite, qui dépend directement de la conversion énergétique liée à la physique de la source, de l'énergie récupérée, qui fait également intervenir les différentes interfaces entre la source et la zone de stockage. Ainsi, une technique peut optimiser l'extraction, mais, du fait des étages intermédiaires, l'énergie récupérée et/ou le rendement de l'étage de récupération peuvent être moindres. L'étape de liaison entre la génération des charges et les éléments de stockage apparaît donc comme étant critique, de par sa conception mais également dans la gestion des périodes d'utilisation.

#### 4.3. Analyse des contributions au développement de roulement intelligent

Comme déjà identifié dans les précédents paragraphes, pour arriver au développement du roulement intelligent il apparaît nécessaire de développer un certain nombre de briques technologiques. La prochaine partie a pour objectif de détailler les contributions autour de cette thématique selon deux axes :

- Le contrôle de santé autonome, permettant le développement des briques technologiques en lien avec la récupération d'énergie
- La télémessure de température d'une bague de roulement

## Références de la Partie I

- [1] D. Balageas, « Introduction to Structural Health Monitoring », in Structural Health Monitoring, D. Balageas, C.-P. Fritzen, et A. Güemes, Éd. ISTE, 2010, p. 13–43.
- [2] « Does the Maturity of Structural Health Monitoring Technology Match ... », yumpu.com. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.yumpu.com/en/document/view/7313559/does-the-maturity-of-structural-health-monitoring-technology-match->. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [3] « Boeing SHM », yumpu.com. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.techbriefs.com/component/content/article/7794>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [4] « Airbus SHM », yumpu.com. [En ligne]. Disponible sur : [http://www.aviationtoday.com/am/categories/commercial/Composites-in-the-Sky-with-Dreamliner\\_256.html#.Ul51n1N8eKU](http://www.aviationtoday.com/am/categories/commercial/Composites-in-the-Sky-with-Dreamliner_256.html#.Ul51n1N8eKU). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [5] Daniel, « Norme AFNOR, Maintenance industrielle, Tome 1 - Méthodes et outils, 2nde édition, AFNOR, Paris, 1996. » ISTE, 2010.
- [6] « Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-21, no 4, p. 853–864, 1985.
- [7] « Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part II », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-21, no 4, p. 865–872, 1985.
- [8] « Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations: Part 3 », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-23, no 1, p. 153–158, 1987.
- [9] R. H. Engelmann et W. H. Middendorf, Handbook of electric motors. M. Dekker, 1995.
- [10] Quoc LeHoai, « Skf handbook », 30-juin-2013.
- [11] « NTN handbook », yumpu.com. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.ntn.co.jp/english/products/pdf/>. [Consulté le: 16-oct-2013].
- [12] T. A. Harris et M. N. Kotzalas, Advanced Concepts of Bearing Technology: Rolling Bearing Analysis, Fifth Edition. CRC Press, 2006.
- [13] M. Moret, Roulements et Butees à Billes et à Rouleaux. Ed. Techniques Ingénieur.
- [14] R. A. Guyer, rolling bearings handbook and troubleshooting guide. Radnor, Pa: Chilton Book Co., 1996.
- [15] Z. Chen, J. C. Cuneo, J. J. Mecholsky Jr., et S. Hu, « Damage processes in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> bearing material under contact loading », Wear, vol. 198, no 1–2, p. 197–207, oct. 1996.
- [16] «Vibration monitoring», <http://www.mobiusinstitute.com/articles.aspx?id=2088>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.mobiusinstitute.com/articles.aspx?id=2088>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [17] X. Chimentin et J.-P. Dron, « Localisation et quantification des sources vibratoires dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l'endommagement des composants mécaniques tournants : application aux roulements à billes. » Reims, France : S.C.D. de l'Université, 2007.



- [18] « Diagnostic maintenance disponibilité des machines tournantes - : Banque PDF des millions de fichiers PDF à télécharger sur Internet », 01-janv-2011. [En ligne]. Disponible sur : [http://www.banque-pdf.fr/fr\\_diagnostic-maintenance-disponibilite-des-machines-tournantes.html](http://www.banque-pdf.fr/fr_diagnostic-maintenance-disponibilite-des-machines-tournantes.html). [Consulté le : 31-oct-2013].
- [19] « Technique de l'Ingénieur machine tournante analyse vibratoire ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/vibrations-en-milieu-industriel-mesures-surveillance-et-controle-42424210/analyse-vibratoire-des-machines-tournantes-bm5145/>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [20] R. Bigret, J.-L. Féron, et C. Pachaud, Diagnostic, maintenance, disponibilité des machines tournantes modèles, mesurages, analyses des vibrations. Paris ; Milan ; Barcelone : Masson, 1994.
- [21] F. Bolaers, O. Cousinard, P. Marconnet, et L. Rasolofondraibe, « Advanced detection of rolling bearing spalling from de-noising vibratory signals », Control Engineering Practice, vol. 12, no 2, p. 181-190, févr. 2004.
- [22] P. Estocq, F. Bolaers, J. P. Dron, et L. Rasolofondraibe, « Method of De-Noising By Spectral Subtraction Applied to the Detection of Rolling Bearings Defects », Journal of Vibration and Control, vol. 12, no 2, p. 197-211, janv. 2006.
- [23] « Tendances mesures », Tendances mesure. [En ligne]. Disponible sur : [http://www.mesures.com/archives/040\\_043\\_TEN.pdf](http://www.mesures.com/archives/040_043_TEN.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [24] P. D. McFadden et J. D. Smith, « Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique — a review », Tribology International, vol. 17, no 1, p. 3-10, févr. 1984.
- [25] Q. Meng et L. Qu, « Rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution », Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 5, no 3, p. 155-166, mai 1991.
- [26] N. BAYDAR et A. BALL, « A COMPARATIVE STUDY OF ACOUSTIC AND VIBRATION SIGNALS IN DETECTION OF GEAR FAILURES USING WIGNER-VILLE DISTRIBUTION », Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 15, no 6, p. 1091-1107, Nov. 2001.
- [27] W. J. Wang et P. D. McFadden, « Early detection of gear failure by vibration analysis i. calculation of the time-frequency distribution », Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 7, no 3, p. 193-203, mai 1993.
- [28] J. Max et J.-L. Lacoume, « Méthodes et techniques de traitement du signal. » Paris: Dunod, 2004.
- [29] M. Benedicks, P. W. Jones, et S. Smirnov, Perspectives in Analysis: Essays in Honor of Lennart Carleson's 75th Birthday. Springer, 2006.
- [30] M. Blödt, « Condition Monitoring of Mechanical Faults in Variable Speed Induction Motor Drives - Application of Stator Current Time-Frequency Analysis and Parameter Estimation », Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2006.
- [31] K. Mori, N. Kasashima, T. Yoshioka, et Y. Ueno, « Prediction of spalling on a ball bearing by applying the discrete wavelet transform to vibration signals », Wear, vol. 195, no 1-2, p. 162-168, juill. 1996.
- [32] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, F. Castanié, et H. Maître, « Les Ondelettes et leurs applications. » Paris: Hermès science publications, 2003.

- [33] Z. K. Peng et F. L. Chu, « Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography », *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, no 2, p. 199-221, mars 2004.
- [34] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, et T. Jayakumar, « Infrared thermography for condition monitoring – A review », *Infrared Physics & Technology*, vol. 60, p. 35-55, sept. 2013.
- [35] « Flir », <http://www.flir.com/FR/>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.flir.com/FR/>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [36] « Thermographic inspection », [http://212.8.206.21/article/wcndt2012/papers/256\\_wcndtabstract00256.pdf](http://212.8.206.21/article/wcndt2012/papers/256_wcndtabstract00256.pdf). [En ligne]. Disponible sur : [http://212.8.206.21/article/wcndt2012/papers/256\\_wcndtabstract00256.pdf](http://212.8.206.21/article/wcndt2012/papers/256_wcndtabstract00256.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [37] B. S. Sarvajith M, « A Novel Approach for Bearing Fault Detection and Classification using Acoustic Emission Technique », *UACEE International Journal of Advances in Electronics Engineering*, 2012.
- [38] « SPM », [http://www.conditionenergy.com/SPM\\_vs\\_Vibration.pdf](http://www.conditionenergy.com/SPM_vs_Vibration.pdf). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.conditionenergy.com/SPM\\_vs\\_Vibration.pdf](http://www.conditionenergy.com/SPM_vs_Vibration.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [39] N. Tandon et A. Choudhury, « A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings », *Tribology International*, vol. 32, no 8, p. 469-480, août 1999.
- [40] « PRUFTECHNIK », [http://www.pruftechnik.com/fileadmin/user\\_upload/COM/Machinery\\_Service/PDFs/VIB\\_Booklet\\_F.pdf](http://www.pruftechnik.com/fileadmin/user_upload/COM/Machinery_Service/PDFs/VIB_Booklet_F.pdf). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.pruftechnik.com/fileadmin/user\\_upload/COM/Machinery\\_Service/PDFs/VIB\\_Booklet\\_F.pdf](http://www.pruftechnik.com/fileadmin/user_upload/COM/Machinery_Service/PDFs/VIB_Booklet_F.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [41] « 01dB », <http://www.acoemgroup.com/catalog/01dB-WebMonitoring-1-1-267-product>. [En ligne]. Disponible sur : [http://www.conditionenergy.com/SPM\\_vs\\_Vibration.pdf](http://www.conditionenergy.com/SPM_vs_Vibration.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [42] « Mechatro NTN SNR », [http://www.ntn-snr.com/group/fr/en-en/index.cfm?page=/group/home/recherche\\_et\\_developpement/mecatronique](http://www.ntn-snr.com/group/fr/en-en/index.cfm?page=/group/home/recherche_et_developpement/mecatronique). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.ntn-snr.com/group/fr/en-en/index.cfm?page=/group/home/recherche\\_et\\_developpement/mecatronique](http://www.ntn-snr.com/group/fr/en-en/index.cfm?page=/group/home/recherche_et_developpement/mecatronique). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [43] « Mechatro SKF », <http://www.skf.com/group/index.html>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.skf.com/group/index.html>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [44] « Mechatro Schaeffler », <http://www.schaeffler.fr/content.schaeffler.fr/fr/press/press-releases/press-details.jsp?id=9989760>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.schaeffler.fr/content.schaeffler.fr/fr/press/press-releases/press-details.jsp?id=9989760>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [45] « Mechatro NKE », <http://www.nke.at/en/bearings-applications/standard-bearings/angular-contact-ball-bearings/>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.nke.at/en/bearings-applications/standard-bearings/angular-contact-ball-bearings/>. [Consulté le : 16-oct-2013].

[46] « 10 ans NTN SNR », <http://www.mecatronique.fr/mecatronique-snr-fete-les-10-ans-de-lasb>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.mecatronique.fr/mecatronique-snr-fete-les-10-ans-de-lasb>. [Consulté le : 16-oct-2013].

[47] « Principe capteur vitesse SKF », <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/engineered-products/sensor-bearing-units/motor-encoder-units/active-sensor-design/index.html>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/engineered-products/sensor-bearing-units/motor-encoder-units/active-sensor-design/index.html>. [Consulté le : 16-oct-2013].

[48] « Principe capteur vitesse Schaeffler », [http://www.schaeffler.co.uk/content.schaeffler.co.uk/en/branches/industry/productronic/productronic\\_product\\_range/precision\\_bearings/yrtsm/yrtsm.jsp](http://www.schaeffler.co.uk/content.schaeffler.co.uk/en/branches/industry/productronic/productronic_product_range/precision_bearings/yrtsm/yrtsm.jsp). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.schaeffler.co.uk/content.schaeffler.co.uk/en/branches/industry/productronic/productronic\\_product\\_range/precision\\_bearings/yrtsm/yrtsm.jsp](http://www.schaeffler.co.uk/content.schaeffler.co.uk/en/branches/industry/productronic/productronic_product_range/precision_bearings/yrtsm/yrtsm.jsp). [Consulté le : 16-oct-2013].

[49] « Principe capteur vitesse NTN », [http://www.ntn-snr.com/autoaftermarket/fr/en-en/index.cfm?page=/autoaftermarket/home/produits/roue/technologie\\_asb/capteur\\_actif](http://www.ntn-snr.com/autoaftermarket/fr/en-en/index.cfm?page=/autoaftermarket/home/produits/roue/technologie_asb/capteur_actif). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.ntn-snr.com/autoaftermarket/fr/en-en/index.cfm?page=/autoaftermarket/home/produits/roue/technologie\\_asb/capteur\\_actif](http://www.ntn-snr.com/autoaftermarket/fr/en-en/index.cfm?page=/autoaftermarket/home/produits/roue/technologie_asb/capteur_actif). [Consulté le : 16-oct-2013].

[50] « Principe capteur vitesse NKE », <http://www.nke.at/en/news-events/hannover-messe-2007/developement-project/>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.nke.at/en/news-events/hannover-messe-2007/developement-project/>. [Consulté le : 16-oct-2013].

[51] « Les capteurs en instrumentation industrielle - Dunod/L'Usine Nouvelle ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.dunod.com/sciences-techniques/sciences-techniques-industrielles/automatique-robotique/ouvrages-professionnels/les-capteurs-en-inst>. [Consulté le : 13-nov-2013].

[52] « Schaeffler (UK) Ltd. | Media Library | Magnetic versus Optical ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.schaeffler.co.uk/content.schaeffler.co.uk/en/mediathek/library/library-detail-language.jsp?id=1711797>. [Consulté le : 13-nov-2013].

[53] « NTN MPS40S ». [En ligne]. Disponible sur : [http://www.ntn.jp/english/products/review/pdf/NTN\\_TR75\\_en\\_P036.pdf](http://www.ntn.jp/english/products/review/pdf/NTN_TR75_en_P036.pdf). [Consulté le : 13-nov-2013].

[54] « NTN High resolution ». [En ligne]. Disponible sur : [http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN\\_TR78\\_en\\_p076\\_082.pdf](http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN_TR78_en_p076_082.pdf). [Consulté le : 13-nov-2013].

[55] « Timken datasheet », [http://www.timken.com/de-de/products/Documents/MSS7301\\_Using\\_the\\_MPS160\\_ASIC.pdf](http://www.timken.com/de-de/products/Documents/MSS7301_Using_the_MPS160_ASIC.pdf). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.timken.com/de-de/products/Documents/MSS-7301\\_Using\\_the\\_MPS160\\_ASIC.pdf](http://www.timken.com/de-de/products/Documents/MSS-7301_Using_the_MPS160_ASIC.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].

[56] « Timken », <http://www.timken.com/enin/solutions/construction/stories/Pages/Bobcat.aspx>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.timken.com/enin/solutions/construction/stories/Pages/Bobcat.aspx>. [Consulté le : 16-oct-2013].

- [57] « HEIDENHAIN », [http://www.heidenhain.fr/fr\\_FR/php/documentation-et-information/documentation/catalogues/popup/media/media/file/view/file-0025/file.pdf](http://www.heidenhain.fr/fr_FR/php/documentation-et-information/documentation/catalogues/popup/media/media/file/view/file-0025/file.pdf). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.heidenhain.fr/fr\\_FR/php/documentation-et-information/documentation/catalogues/popup/media/media/file/view/file-0025/file.pdf](http://www.heidenhain.fr/fr_FR/php/documentation-et-information/documentation/catalogues/popup/media/media/file/view/file-0025/file.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [58] L. Nouvelle, « Le capteur d'effort s'intègre aux roulements », [usinenouvelle.com](http://www.usinenouvelle.com), 01-mars-2007. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.usinenouvelle.com/article/le-capteur-d-effort-s-integre-aux-roulements.N55317>. [Consulté le : 18-nov-2013].
- [59] « Fraunhofer », [http://www.ist.fraunhofer.de/content/dam/ist/en/documents/biasas\\_piezoresistive\\_duennschichts\\_ensorik\\_en.pdf](http://www.ist.fraunhofer.de/content/dam/ist/en/documents/biasas_piezoresistive_duennschichts_ensorik_en.pdf). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.ist.fraunhofer.de/content/dam/ist/en/documents/biasas\\_piezoresistive\\_duennschichts\\_ensorik\\_en.pdf](http://www.ist.fraunhofer.de/content/dam/ist/en/documents/biasas_piezoresistive_duennschichts_ensorik_en.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [60] « NTN effort », [http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN\\_TR79\\_en\\_p058\\_063.pdf](http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN_TR79_en_p058_063.pdf). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN\\_TR79\\_en\\_p058\\_063.pdf](http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN_TR79_en_p058_063.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [61] « SKF Insight », <http://www.skf.com/group/news-and-media/news-search/2013-04-08-skf-launches-skf-insight-groundbreaking-intelligent-bearing-technology.html>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.skf.com/group/news-and-media/news-search/2013-04-08-skf-launches-skf-insight-groundbreaking-intelligent-bearing-technology.html>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [62] H. Mol, E. Zaaijer, F. Falsetti, et C. Vissers, « Bearing assembly with a strain sensor », 768589030-mars-2010.
- [63] H. A. Mol et S. J. F. Van Den, « Combination of bearing component and sensor », 831672327-nov-2012.
- [64] « Effort par fibre optique », <http://sem-proceedings.com/03s/sem.org-2003-SEM-Ann-Conf-s26p04-Detecting-Loading-Roller-Element-Bearings-Using-Fiber-Optic-Strain.pdf>. [En ligne]. Disponible sur : <http://sem-proceedings.com/03s/sem.org-2003-SEM-Ann-Conf-s26p04-Detecting-Loading-Roller-Element-Bearings-Using-Fiber-Optic-Strain.pdf>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [65] « Reims », <http://crestic.univ-reims.fr/publication/1715/pdf>. [En ligne]. Disponible sur : <http://crestic.univ-reims.fr/publication/1715/pdf>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [66] « Puerto Rico », <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/09/ucr-hbcu/presentations/01%20Yi%20Jia.pdf>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/09/ucr-hbcu/presentations/01%20Yi%20Jia.pdf>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [67] S. Scott, « Harsh-environment MEMS temperature sensors for aircraft bearing health monitoring applications », PURDUE UNIVERSITY, 2012.
- [68] « Timken température », <http://www.timken.com/en-us/products/bearings/productlist/integrated/Pages/LiveSpindleHub.aspx>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.timken.com/en-us/products/bearings/productlist/integrated/Pages/LiveSpindleHub.aspx>. [Consulté le : 16-oct-2013].

[69] « NTN Temperature », <http://www.ntn-snr.com/portal/fr/en-en/index.cfm?contentid=AED494C2-DE6F-A7B6-1974E9724D34CD69>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.ntn-snr.com/portal/fr/en-en/index.cfm?contentid=AED494C2-DE6F-A7B6-1974E9724D34CD69>. [Consulté le : 13-nov-2013].

[70] « Schaeffler oil », <http://www.schaeffler.com/content.schaeffler.de/en/mediathek/library/library-detail-language.jsp?id=3407110>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.schaeffler.com/content.schaeffler.de/en/mediathek/library/library-detail-language.jsp?id=3407110>. [Consulté le: 16-oct-2013].

[71] F. M. Discenzo, « Bearing-sensor integration for a lubrication analysis system », US6324899 B104-déc-2001.

[72] « Palier de roulement doté d'un capteur »

[73] « Onze roulements intelligents ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.industrie-techno.com/onze-roulements-intelligents.20318>. [Consulté le : 18-nov-2013].

[74] « Schaeffler France SAS | Presse | Le ministre allemand des transports s'invite au stand de Schaeffler ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.schaeffler.fr/content.schaeffler.fr/fr/press/press-releases/press-details.jsp?id=9989760>. [Consulté le : 18-nov-2013].

[75] « Schaeffler PedElec ». [En ligne]. Disponible sur : <http://machinedesign.com/recreation/electric-bike-balances-pedal-and-motor-torque>. [Consulté le : 18-nov-2013].

[76] « Capteurs pour applications ferroviaires », Evolution Online. [En ligne]. Disponible sur : <http://evolution.skf.com/fr/capteurs-pour-applications-ferroviaires/>. [Consulté le : 01-déc-2013].

[77] « NTN application », <http://www.j2rauto.com/lja/article.view/13149/ntn-snr-plus-qu-un-concept-une-veritable-vision-de-l-avenir/16/fournisseurs>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.j2rauto.com/lja/article.view/13149/ntn-snr-plus-qu-un-concept-une-veritable-vision-de-l-avenir/16/fournisseurs>. [Consulté le : 13-nov-2013].

[78] O. Zorlu, E. T. Topal, et H. Kulah, « A Vibration-Based Electromagnetic Energy Harvester Using Mechanical Frequency Up-Conversion Method », IEEE Sensors Journal, vol. 11, no 2, p. 481-488, 2011.

[79] « WISD projet », [http://elca1.inaoep.mx/~jescami/papers/WISD%20Nanopower%20\\_08.pdf](http://elca1.inaoep.mx/~jescami/papers/WISD%20Nanopower%20_08.pdf). [En ligne]. Disponible sur : [http://elca1.inaoep.mx/~jescami/papers/WISD%20Nanopower%20\\_08.pdf](http://elca1.inaoep.mx/~jescami/papers/WISD%20Nanopower%20_08.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].

[80] S. Ikunori et N. L, « Proper Utilization and Maintenance. Development of Sensor for Rolling Bearings. », NSK Tech J.

[81] « Wireless sensor, rolling bearing with sensor, management apparatus and monitoring system »,

[82] « Bearing with wireless self-powered sensor unit »,

[83] D. Alff, « Sensor bearing with clip-on sensor », US5451869 A19-sept-1995.

[84] K. Sahashi, K. Okada, et M. Mizutani, « WIRELESS SENSOR SYSTEM AND BEARING DEVICE HAVING WIRELESS SENSOR », EP154219015-juin-2005.

[85] « Système de capteur sans fil et dispositif a palier avec capteur sans fil ».

- [86] « OMag NTN », <http://www.ntn-snr.com/portal/fr/en-en/file.cfm/O.MAG1-FR.pdf?contentID=4860>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.ntn-snr.com/portal/fr/en-en/file.cfm/O.MAG1-FR.pdf?contentID=4860>. [Consulté le: 16-oct-2013].
- [87] D. Parthasarathy, P. Enoksson, et R. Johansson, « Prototype energy harvesting wheel speed sensor for anti-lock braking », in 2012 IEEE International Symposium on Robot and Sensors Environments (ROSE), 2012, p. 115-120.
- [88] E. Romero, R. O. Warrington, et M. R. Neuman, « Energy scavenging sources for biomedical sensors », *Physiol. Meas.*, vol. 30, no 9, p. R35, sept. 2009.
- [89] M. Lossec, « Systèmes multisources de récupération d'énergie dans l'environnement humain- : modélisation et optimisation du dimensionnement », École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2011.
- [90] B. J. Bowers et D. P. Arnold, « Spherical, rolling magnet generators for passive energy harvesting from human motion », *J. Micromech. Microeng.*, vol. 19, no 9, p. 094008, sept. 2009.
- [91] « ARVENI », <http://www.arveni.fr/en/>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.arveni.fr/en/>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [92] « Algra », [http://www.algra.ch/content.php?MAIN\\_RUB\\_ID=161&subcatid=189&content=cms](http://www.algra.ch/content.php?MAIN_RUB_ID=161&subcatid=189&content=cms). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.algra.ch/content.php?MAIN\\_RUB\\_ID=161&subcatid=189&content=cms](http://www.algra.ch/content.php?MAIN_RUB_ID=161&subcatid=189&content=cms). [Consulté le: 16-oct-2013].
- [93] M. Pozzi, M. S. H. Aung, M. Zhu, R. K. Jones, et J. Y. Goulermas, « The pizzicato knee-joint energy harvester: characterization with biomechanical data and the effect of backpack load », *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, no 7, p. 075023, juill. 2012.
- [94] M. Pozzi et M. Zhu, « Characterization of a rotary piezoelectric energy harvester based on plucking excitation for knee-joint wearable applications », *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, no 5, p. 055004, mai 2012.
- [95] F. Khameneifar, S. Arzanpour, et M. Moallem, « A Piezoelectric Energy Harvester for Rotary Motion Applications: Design and Experiments », *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no 5, p. 1527-1534, 2013.
- [96] E. Brusa, « Optimisation of a Hybrid Energy Scavenger with Piezoelectric/Magnetic Coupling for Sensor-Bearing Units », *Advanced Materials Research*, vol. 745, p. 41-56, août 2013.
- [97] M. Li, Y. Wen, P. Li, J. Yang, et X. Dai, « A rotation energy harvester employing cantilever beam and magnetostrictive/piezoelectric laminate transducer », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 166, no 1, p. 102-110, mars 2011.
- [98] L. Gu et C. Livermore, « Passive self-tuning energy harvester for extracting energy from rotational motion », *Applied Physics Letters*, vol. 97, no 8, p. 081904, août 2010.
- [99] « SKF LTU », <http://www.ltu.se/ltu/media/Smarta-kullager-i-sikte-1.106455?l=en>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.ltu.se/ltu/media/Smarta-kullager-i-sikte-1.106455?l=en>. [Consulté le: 16-oct-2013].
- [100] C. P. Le et E. Halvorsen, « MEMS electrostatic energy harvesters with end-stop effects », *J. Micromech. Microeng.*, vol. 22, no 7, p. 074013, juill. 2012.
- [101] S. Boisseau, « Récupération d'énergie vibratoire à électrets », Université de Grenoble, 2011.

- [102] « SANYO », <https://www.semiconportal.com/en/archive/news/main-news/sanyo-develops-energy-harvesti.html>. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.semiconportal.com/en/archive/news/main-news/sanyo-develops-energy-harvesti.html>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [103] C. He, M. E. Kiziroglou, D. C. Yates, et E. M. Yeatman, « A MEMS Self-Powered Sensor and RF Transmission Platform for WSN Nodes », *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no 12, p. 3437-3445, 2011.
- [104] « Shinsei », <http://www.shinsei-motor.com/English/techno/index.html>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.shinsei-motor.com/English/techno/index.html>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [105] G. Sebald, E. Lefeuvre, et D. Guyomar, « Pyroelectric energy conversion : optimization principles », *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, vol. 55, no 3, p. 538-551, mars 2008.
- [106] M. N. Lallart, « Amélioration de la conversion électroactive de matériaux piézoélectriques et pyroélectriques pour le contrôle vibratoire et la récupération d'énergie - Application au contrôle de santé structurale auto-alimenté », INSA de Lyon, 2008.
- [107] O. Puscasu, S. Monfray, G. Savelli, C. Maitre, J. P. Pemeant, P. Coronel, K. Domanski, P. Grabiec, P. Ancey, P. J. Cottinet, D. Guyomar, V. Bottarel, G. Ricotti, I. Bimbaud, F. Boeuf, F. Gaillard, et T. Skotnicki, « An innovative heat harvesting technology (HEATec) for above-Seebeck performance », in *Electron Devices Meeting (IEDM), 2012 IEEE International, 2012*, p. 12.5.1-12.5.4.
- [108] O. Puscasu, S. Monfray, F. Boeuf, G. Savelli, F. Gaillard, D. Guyomar, et T. Skotnicki, « Scale laws for enhanced power for MEMS based heat energy harvesting », in *2012 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW), 2012*, p. 1-2.
- [109] « MicroPelt technology », <http://www.micropelt.com/technology.php>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.micropelt.com/technology.php>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [110] « MicroPelt Power RING », [http://www.micropelt.com/applications/te\\_power\\_ring.php](http://www.micropelt.com/applications/te_power_ring.php). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.micropelt.com/applications/te\\_power\\_ring.php](http://www.micropelt.com/applications/te_power_ring.php). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [111] « MicroPelt Datasheet », [http://www.micropelt.com/downloads/datasheet\\_te\\_core.pdf](http://www.micropelt.com/downloads/datasheet_te_core.pdf). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.micropelt.com/downloads/datasheet\\_te\\_core.pdf](http://www.micropelt.com/downloads/datasheet_te_core.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [112] « NTN thermoelectric », [http://www.ntn.co.jp/english/news/news\\_files/new\\_products/news201200095.html](http://www.ntn.co.jp/english/news/news_files/new_products/news201200095.html). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.ntn.co.jp/english/news/news\\_files/new\\_products/news201200095.html](http://www.ntn.co.jp/english/news/news_files/new_products/news201200095.html). [Consulté le : 16-oct-2013].
- [113] M. Moret, *Roulements et Butees à Billes et à Rouleaux*. Ed. Techniques Ingénieur.
- [114] « Roulement », <http://www.fltsi.fr/files/article/114/ROULEMENTS.pdf>. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.fltsi.fr/files/article/114/ROULEMENTS.pdf>. [Consulté le : 16-oct-2013].
- [115] « NTN effort », [http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN\\_TR79\\_en\\_p058\\_063.pdf](http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN_TR79_en_p058_063.pdf). [En ligne]. Disponible sur : [http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN\\_TR79\\_en\\_p058\\_063.pdf](http://www.ntn.co.jp/english/products/review/pdf/NTN_TR79_en_p058_063.pdf). [Consulté le : 16-oct-2013].

[116] «NTNhandbook», yumpu.com. [Enligne]. Disponiblesur: <http://www.ntn.co.jp/english/products/pdf/>. [Consulté le: 16-oct-2013].

[117] makarandnikume, « R&t 2008 principles and practices of vibrational analysis - keefer », 16:33:30 UTC.

[118] E. Brusa, « Optimisation of a Hybrid Energy Scavenger with Piezoelectric/Magnetic Coupling for Sensor-Bearing Units », Advanced Materials Research, vol. 745, p. 41 - 56, août 2013.

[119] M. Pozzi et M. Zhu, « Characterization of a rotary piezoelectric energy harvester based on plucking excitation for knee-joint wearable applications », Smart Mater. Struct., vol. 21, no 5, p. 055004, mai 2012.

[120] M. Pozzi, M. S. H. Aung, M. Zhu, R. K. Jones, et J. Y. Goulermas, « The pizzicato knee- joint energy harvester: characterization with biomechanical data and the effect of backpack load », Smart Mater. Struct., vol. 21, no 7, p. 075023, juill. 2012.

[121] P. Pillatsch, E. M. Yeatman, et A. S. Holmes, « Piezoelectric Rotational Energy Harvester for Body Sensors Using an Oscillating Mass », in 2012 Ninth International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN), 2012, p. 6- 10.

[122] P. Pillatsch, E. M. Yeatman, et A. S. Holmes, « A scalable piezoelectric impulse- excited energy harvester for human body excitation », Smart Mater. Struct., vol. 21, no 11, p. 115018, nov. 2012.

[123] M. Lossec, « Systèmes multisources de récupération d'énergie dans l'environnement humain : modélisation et optimisation du dimensionnement », École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2011.



## Bibliographie

[CCMR-01] Clayton M. Christensen, The Innovator's Dilemma, Harvard Business School Press, 1997 (ISBN 0-87584-585-1)

[CCMR-02] Clayton M. Christensen et Michael E. Raynor, The Innovator's Solution, Harvard Business School Press, 2003 (ISBN 1-57851-852-0)

[CCAGM-01] C. Constantinou et Paul A. Gerosk Markides, Fast Second: How Smart Companies Bypass Radical Innovation to Enter and Dominate New Markets, Jossey-Bass, 2004

[MLTPA-01] M.L. Tushman et P. Anderson, « Technological Discontinuities and Organizational Environments », Administrative Science Quarterly, vol. 31, no 3, septembre 1986, p. 439-465 (résumé [archive]).

[RFS 1] Revue française de sciences sociales n°122 | Avril-Juin 2013 Relever les défis de la Validation des Acquis de l'Expérience (VAE)

[FOL 1] Développement d'un outil d'assistance pour le prédimensionnement d'une vis à rouleaux satellites soumise à des sollicitations complexes - Folly kossi Abevi

[RICLE-1] Progress in Aerospace Sciences Volume 79, November 2015, Pages 147–157, Review on energy harvesting for structural health monitoring in aeronautical applications (doi: 10.1016/j.paerosci.2015.10.001)

[RICLE-2] Characterization and modeling of magnetic domain wall dynamics using reconstituted hysteresis loops from Barkhausen noise /Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 432 (2017)

[CIA-1] 5th international conference on Recent Advances in Aerospace Actuation system (R3ASC12) EMA KEY COMPONENTS AND ASSOCIATED MONITORING

[CIA-2] 6th international conference on Recent Advances in Aerospace Actuation system (R3ASC14) The Internet of Things and the Future of Condition Monitoring: Mechatronic Technology Development for Aerospace and Industry Bearing Solutions

[CIA-3] 7th international conference on Recent Advances in Aerospace Actuation system (R3ASC16), A wireless rolling bearing cage temperature sensor for aerospace transmission diagnostic application (Poster Session)

[CIA-4] World Congress Condition Monitoring 2017 Energy harvesting for wireless and autonomous load monitoring sensors

[CIA-5] World Congress Condition Monitoring 2017 A wireless rolling bearing cage temperature sensor for aerospace transmission diagnostic application

[CIA-6] World Congress Condition Monitoring 2017 Characterisation and modelling of magnetic domain wall dynamics using reconstituted hysteresis loops from Barkhausen noise

[CEA-1] 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM14) Wireless and Autonomous Sensor for Strut Load Monitoring (HAL Id: hal-01021202)

[CEA-2] 2nd EUROPEAN CONFERENCE ON: IMPROVEMENT IN BEARING TECHNOLOGY THROUGH EUROPEAN RESEARCH COLLABORATION (iBETTER) A wireless rolling bearing cage temperature sensor for aerospace transmission diagnostic application

[CN-1] 7èmes Journées Nationales sur la Récupération et le Stockage d'Énergie (conférencier invité)  
IoT and future of conference monitoring : enabling Energy Harvesting for Intelligent Bearing solutions

[FH-01] Energy Harvesting for Smart-Internet-Connected Bearings-Fredrik Häggström

[SA-01] Engine Maintenance Concepts for Financiers Elements of Turbofan Shop Maintenance Costs-  
Shannon Ackert

[RLM-01] « Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I  
», IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-21, no 4, p. 853-864, 1985.

[RLM-02] « Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part II  
», IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-21, no 4, p. 865-872, 1985.

[RLM-03] « Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations: Part 3  
», IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-23, no 1, p. 153-158, 1987.

[RHE-01] R. H. Engelmann et W. H. Middendorf, Handbook of electric motors. M. Dekker, 1995.

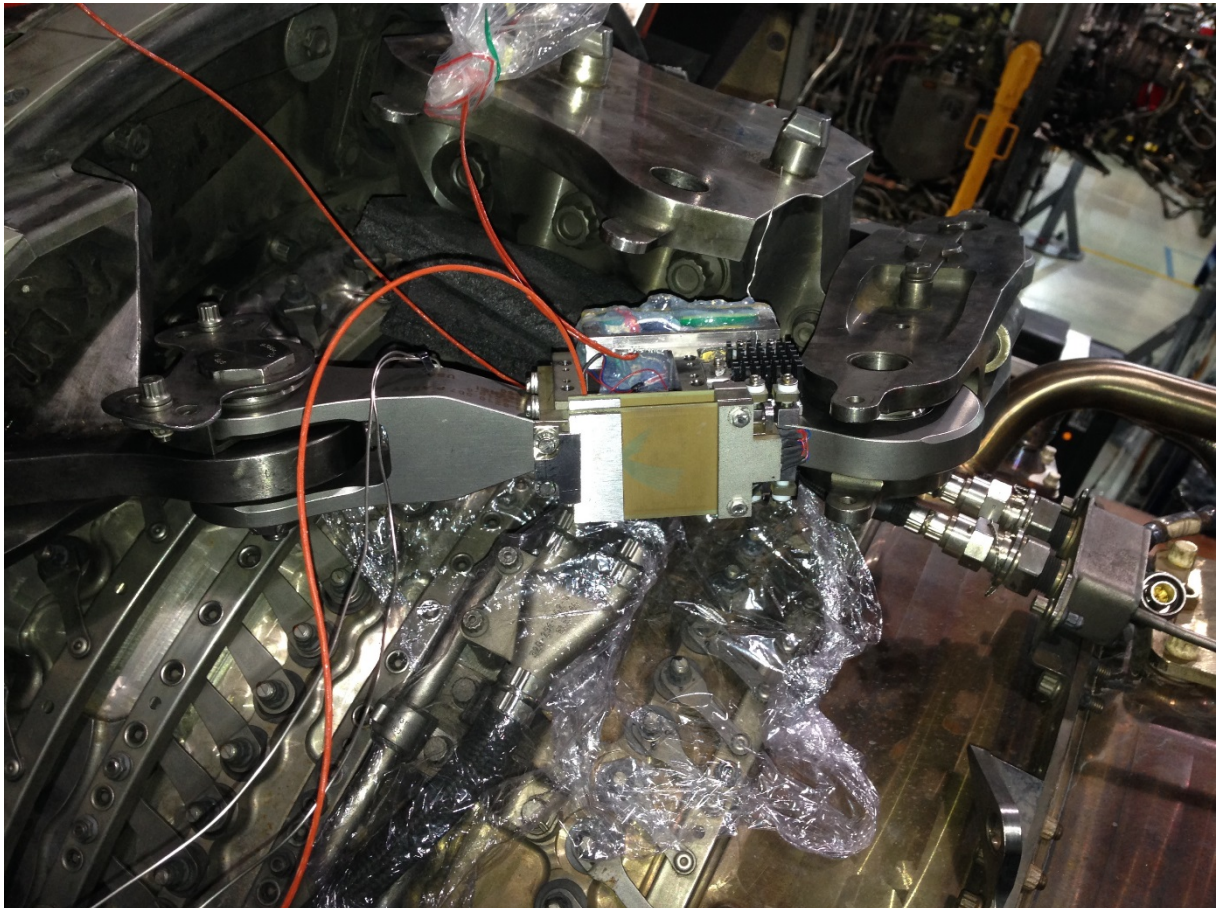
[AHSZ-01] A. Heng, S. Zhang, Andy C.C. Tan, and J. Mathew. Rotating machinery prognostics: State of  
the art, challenges and opportunities. Mechanical Systems and Signal Processing, 23(3) :724 – 739,  
2009.

[AKSJ-01] Andrew. K.S. Jardine, Daming Lin, and Dragan Banjevic. A review on machinery diagnostics  
and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal  
Processing, 20(7) :1483 – 1510, 2006.

[JZS-01] J.Z. Sikorska, M Hodkiewicz, and L Ma. Prognostic modelling options for remaining useful life  
estimation by industry. Mechanical Systems and Signal Processing, 25(5) :1803–1836, 2011.

[AFN-01] AFNOR. Conditionmonitoringanddiagnosticsofmachines-prognostics-part1: General  
guidelines. NF ISO 13381-1, 2005.

## Partie II : Mise en œuvre de capteurs autonomes communiquant sans fil pour le PHM des composants critiques



*Figure 84. Démonstrateur pour la surveillance autonome d'une attache moteur : installation sur banc moteur*

"Un concept est une invention à laquelle rien ne correspond exactement, mais à laquelle nombre de choses ressemblent." **Friedrich Nietzsche**

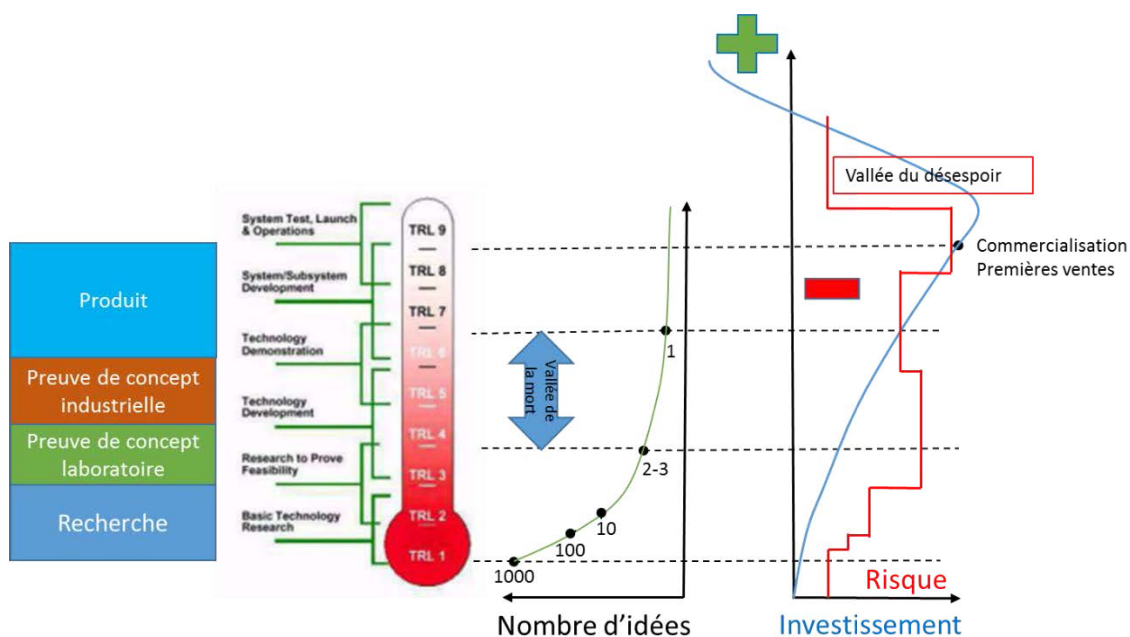


Figure 85. Positionnement du concept sur la chaîne des Technology Readiness Level (TRL)

## Introduction

Les prochains chapitres ont pour objectif d'illustrer les travaux de recherche effectués concernant les diverses briques technologiques nécessaires au développement du roulement intelligent.

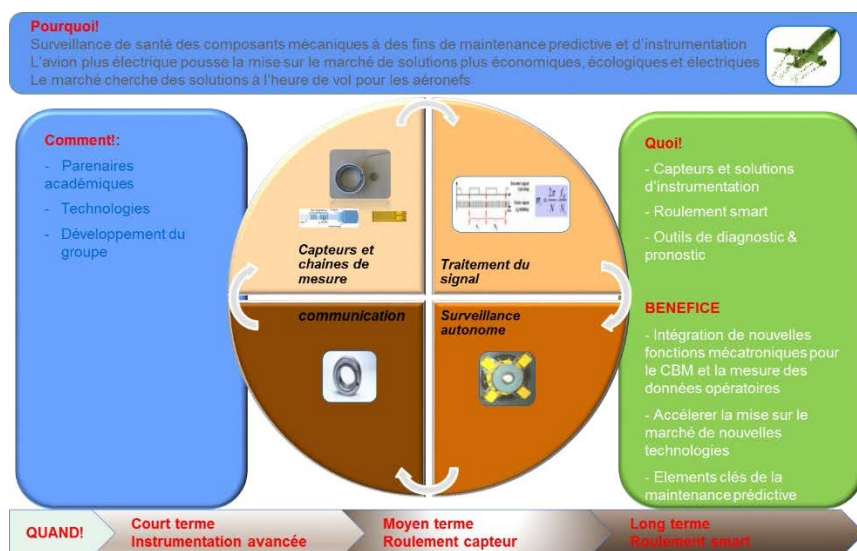


Figure 86. Programme de R&T autour du roulement smart

Ces travaux ont pour finalité de juger les niveaux de maturité de chaque brique technologique. Pour cela est utilisée l'échelle TRL (Technology Readiness Level ou niveau de maturité technologique) qui

évalue le niveau de maturité d'une technologie jusqu'à son intégration dans un produit complet et son industrialisation. Conçue initialement par la Nasa et l'Esa (Figure 85) pour les projets spatiaux, elle compte neuf niveaux allant de 1 à 9, 1 étant l'observation du principe de base et 9 la validation du produit dans son environnement réel.

Les degrés allant de 1 à 3 (observation du principe de base, formulation du concept technologique, preuve expérimentale de concept) correspondent à la Recherche de base et appliquée. La Recherche scientifique voire fondamentale se traduit en recherche appliquée par la réalisation d'une étude « sur le papier » des propriétés de base d'une technologie, autour d'un concept spéculatif, afin d'envisager des applications. S'en suit une R&D active en laboratoire pour valider des hypothèses et fournir une preuve expérimentale du concept.

Les degrés allant de 4 à 5 (Validation des fonctions clés du concept en laboratoire, Validation de la technologie en environnement représentatif, Démonstration dans un environnement réel simulé) correspondent à la recherche avancée et à la démonstration technologique. En laboratoire, les composants technologiques de base sont intégrés dans une maquette de façon à vérifier le fonctionnement d'ensemble. Si cette étape est validée, ils sont intégrés à un système réaliste grâce aux équipements de plateformes technologiques. Cela conduit à la réalisation d'un prototype qui doit être démontré en environnement représentatif de l'application, puis optimisé en conformité avec un environnement opérationnel sur des lignes-pilotes semi-industrielles.

Les degrés allant de 7 à 9 (Démonstration dans un environnement opérationnel, Qualification du produit complet dans un environnement opérationnel, Validation du produit dans un environnement réel) représente la qualification opérationnelle et technologique du produit prototype au produit de série. La technologie, telle que validée sous la forme de son prototype, fonctionne dans les conditions prévues. Son application réelle est mise en œuvre sur des lignes-pilotes industrielles pour subir d'ultimes tests. Le système complet est alors validé par des missions réussies en environnement réel.

Les niveaux 4 à 7 représentent le passage du « concept au produit », c'est-à-dire le développement d'une technologie jusqu'à sa validation dans un environnement réel. Étapes indispensables pour le transfert technologique aux industriels, elle repose sur des plateformes technologiques et lignes-pilotes très onéreuses. Franchir cette vallée de la mort implique de mutualiser les moyens (partenariats publics-privés, client fournisseur) et d'être soutenu financièrement.

Les travaux présentés dans cette partie couvrent la validation des TRL 4, 5 et 6 principalement. Cette partie est structurée autour des chapitres suivants :

**Chapitre 1 : Capteur de surveillance de charge autonome communicant sans fil** présente le projet EPICE, développement d'un démonstrateur d'un système de surveillance d'une attache de moteur d'avion.

**Chapitre 2 : Capteur de température sans fil** réalise une étude de preuve de concept d'un capteur de température résonant intégré à la cage d'un roulement.

**Chapitre 3 : Perspectives des travaux et futurs axes de développement**

## Chapitre 1 : Capteur de surveillance de charge autonome communicant sans fil

Dans ce chapitre, nous allons présenter la réalisation d'un système de surveillance d'une attache de moteur d'avion, afin d'illustrer concrètement les chapitres précédents. Le prototype a été testé sur un moteur d'avion au sol. Des mesures réalisées au cours d'essai en vol ont permis également de mieux caractériser l'environnement de ce type d'application.

Ces travaux ont été réalisés lors du projet CORALIE en collaboration avec la société SAFRAN AE. Le projet CORALIE fait partie de la plateforme de projet EPICE, visant à développer des démonstrateurs technologiques autour du système de propulsion (moteur, mat, nacelle). Cette plateforme de démonstration technologique est l'une des huit plateformes proposées par le CORAC au titre du programme gouvernemental d'investissements d'avenir. Le projet a associé SKF, le LGEF en tant que laboratoire d'expertise et la société Oridao comme fournisseur de la plateforme RFID.

Ce projet de démonstrateur technologique a duré 5 ans et a été l'occasion de mener des travaux de recherche sur le système et ses constituants, avec une validation dans l'environnement de l'application sur banc moteur ainsi que des essais en vol (Figure 87).

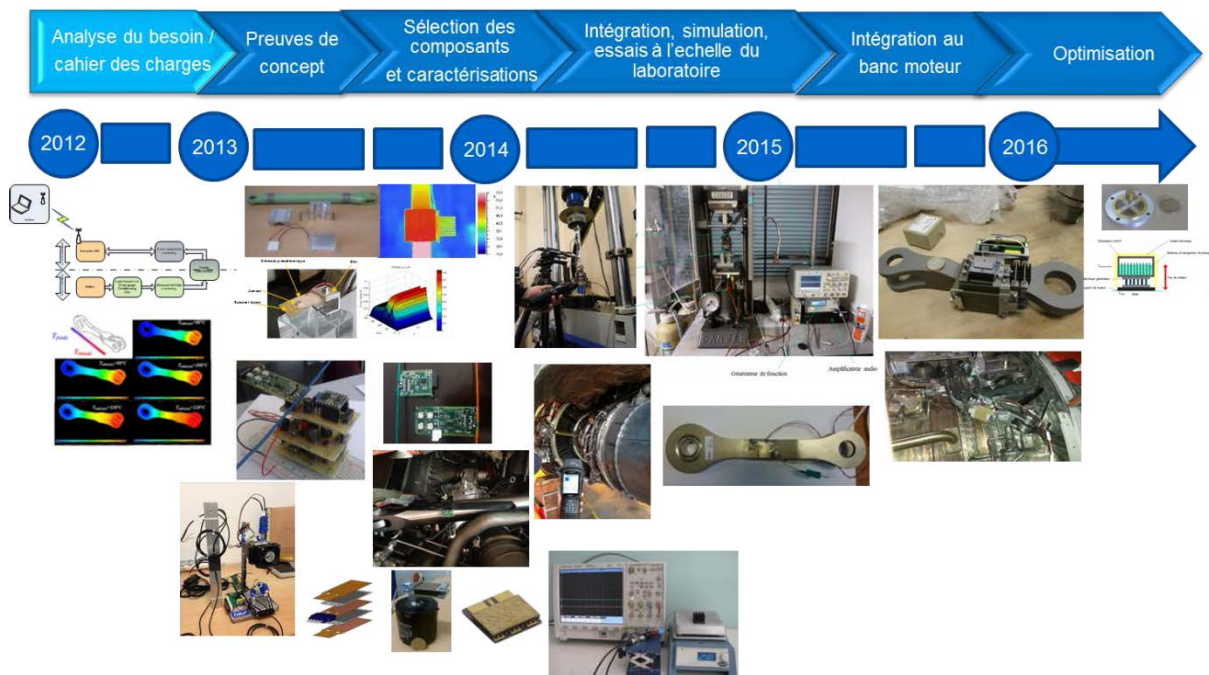


Figure 87. Principales étapes du projet CORALIE

Il est indispensable de vérifier régulièrement l'état de santé d'un aéronef et de mener en conséquence les opérations de maintenance nécessaires pour maintenir le haut niveau de sécurité des vols que connaît le monde du transport aérien civil. Or, les opérations de maintenance représentent, suivant les sources, 10 à 25 % du coût d'exploitation des aéronefs. Ceci est notamment lié au fait que lorsque les campagnes périodiques d'inspection sont menées, elles impliquent parfois de longues immobilisations de l'avion pour les opérations de démontage et remontage indispensables pour accéder aux zones où, par exemple, corrosion ou fatigue de la structure mécanique sont susceptibles de mettre en péril l'intégrité de l'avion. Or, le simple coût d'immobilisation au sol d'un avion pour une compagnie aérienne est de 10 000 \$/heure, coût auquel il convient de rajouter celui des opérations de maintenance à proprement parler. Dans le cadre d'inspections périodiques, des marges de sécurité mécanique sont prises pour certaines pièces critiques, garantissant ainsi qu'entre deux visites,

quoiqu'il arrive, aucune défaillance grave ne puisse survenir. Ces marges augmentent le poids de l'avion et indirectement la consommation en carburant.

Depuis quelques années, est apparu le concept de Structural Health Monitoring (SHM), c'est-à-dire de suivi en continu du vieillissement de la structure mécanique par l'intermédiaire d'une instrumentation installée à demeure. Le concept est également décliné en génie maritime et en génie civil. L'objectif est d'abandonner les inspections périodiques et de ne lancer d'opérations de maintenance qu'au besoin, en identifiant précisément à l'avance l'élément devant être changé : c'est la maintenance prédictive. Les capteurs de SHM sont très divers, actifs ou passifs : mesures de contraintes, de vibrations, d'émission ou d'écoute acoustique, mesure d'impédance, de champs magnétiques... Les quelques applications aéronautiques opérationnelles sont filaires (et militaires, sur des drones notamment).

### 1.1 Contexte et objectifs

L'objectif de développer un capteur mesurant la charge de l'attache autonome et communiquant est de surveiller les niveaux de charge vus par l'attache du moteur afin de détecter son niveau de chargement en utilisation. Les éventuelles surcharges peuvent ainsi être identifiées, et le vieillissement du composant peut être suivi.

J'ai eu à développer un système complet, intégrant des modules de récupération d'énergie pour l'alimentation d'une plateforme associant un microcontrôleur à un système de communication RFID et des capteurs de mesure de déformation.

La structure à contrôler dans le cadre du projet est une bielle de reprise de poussée, intégrée dans le mat-moteur. Le mat-moteur est une structure qui réalise la liaison entre l'aile et l'ensemble propulsif (moteur + nacelle). Il permet de transmettre à l'avion la poussée générée par le réacteur, de supporter le poids du moteur et d'assurer le cheminement des systèmes électriques, hydrauliques, pneumatiques et du carburant. Le système d'attache varie en fonction du type de moteur. Cette structure est vitale pour l'avion : sa rupture peut entraîner la perte du moteur (Figure 88).

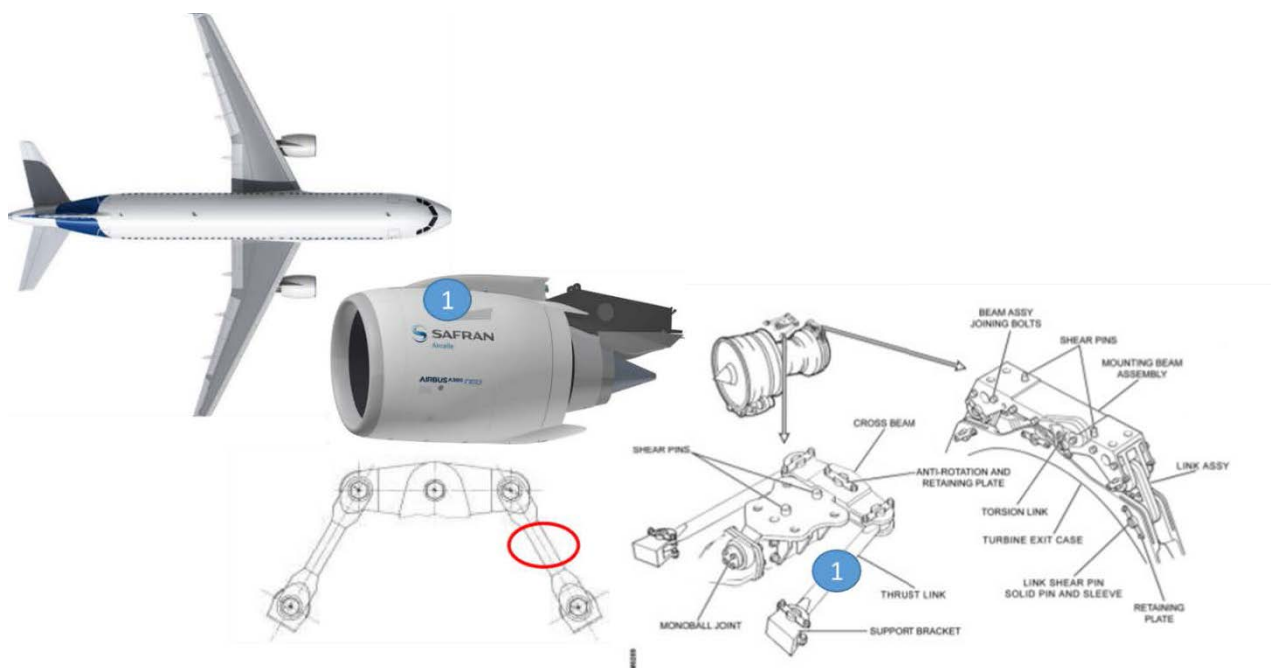


Figure 88. Position du capteur (1) dans le système d'attache-moteur (CFM56)

Le système doit être intégré sur la bielle de reprise de poussée « Thrust link » au niveau du système d'attache mat-moteur. Ce système d'attache est composé de trois parties :

- L'attache avant qui correspond à une rotule « engine fwd support shaft » liant la partie avant de la structure primaire au carter du fan. L'environnement thermique de ce point est de 120°C.
- L'attache arrière, qui assure la liaison entre le carter de la turbine basse pression et le mat. Elle est équipée de cinq ou six rotules intégrées dans deux manilles (deux ou trois points) selon le type de motorisation. L'environnement thermique de ce point est de 350°C.
- Le chemin de poussée, qui transmet la poussée du turboréacteur vers le mat par l'intermédiaire de deux bielles de poussée et d'un palonnier équipé de deux rotules vissées par écrou. Les billes sont équipées de rotules sur le côté assurant la jonction au moteur. L'environnement thermique est de 120°C en fonctionnement, avec de possibles pointes à 150°C.

La bielle de reprise de poussée est une pièce de structure critique dont les modes de sollicitations mécaniques sont la traction et la compression. Les composants du système d'attache font l'objet d'une maintenance systématique pouvant imposer l'immobilisation de l'avion. Leur surveillance permet de passer à la maintenance prédictive afin de réduire au maximum le temps d'indisponibilité par une planification plus efficace des interventions. La mesure d'effort sur ces bielles permet également de mesurer directement la poussée du moteur et donc de connaître le contexte opératoire des composants du système d'attache.

Le projet doit intégrer sur ce composant mécanique un système de surveillance capable de fonctionner de manière autonome en vol et de stocker localement les données afin de pouvoir les restituer sans fil lors des phases d'inspection en maintenance (Figure 89). Ceci impose d'intégrer des récupérateurs d'énergie pouvant collecter l'énergie disponible dans l'environnement nacelle moteur.

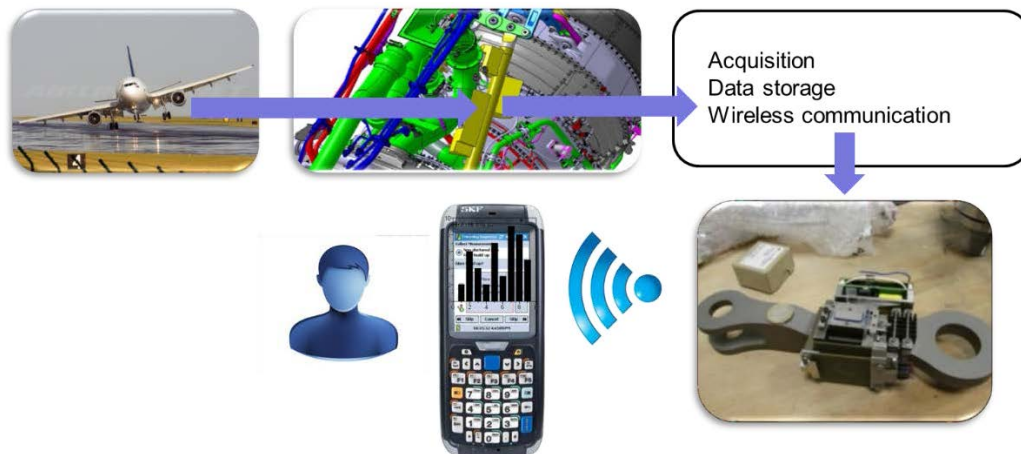


Figure 89. Chaîne fonctionnelle du démonstrateur

## 1.2. Cahier des charges

Les éléments principaux du cahier des charges sont les suivants :

- Fonctionnement dans une gamme de température de -50 °C à + 150°C ;
- Résistance à la pression réduite de 220 mbar ;
- Respect d'un volume d'encombrement réduit, compatible du plan interface ;
- Chaque module doit présenter une certaine flexibilité pour s'adapter à des plages de mesure dépendant du type de moteur pour la démonstration en vol ;



- Autonomie complète sur un vol par récupération de l'énergie ambiante disponible dans l'environnement nacelle-moteur (les gisements vibratoires et thermiques ont été identifiés en début de projet).
- Récupération possible des données de mesures par transmission sans fil une fois au sol.

La Figure 90 présente l'architecture de principe de l'ensemble du dispositif : récupérateurs d'énergie « harvester », chaîne d'instrumentation des efforts par mesure des contraintes, traitement du signal, stockage de l'information, transmission de l'information au sol et télé-alimentation. Les sections suivantes présenteront les choix technologiques des composants principaux.

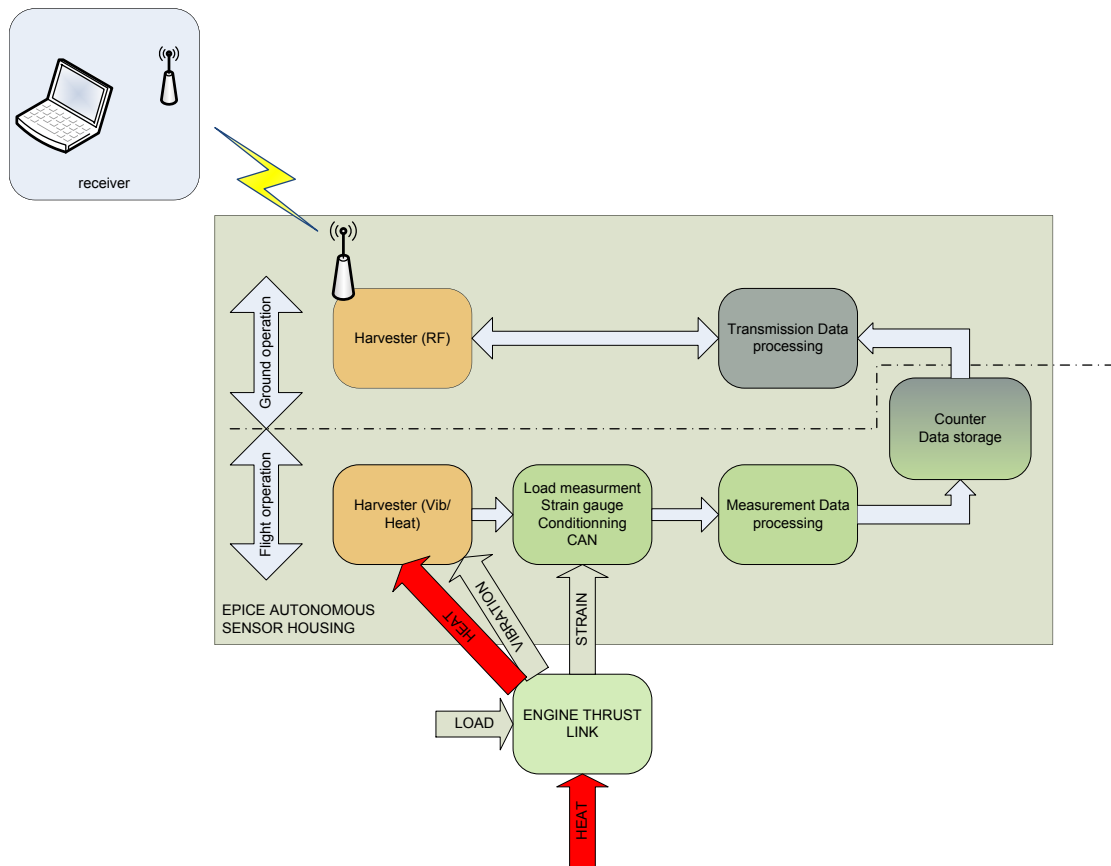


Figure 90. Synoptique système fonctionnel du module de surveillance

La mesure du spectre de chargement du composant est réalisée par détection de franchissement de seuils successifs et comptage du nombre d'occurrence de dépassement. Chaque seuil correspond à une classe associée à un niveau de charge équivalent à un niveau de déformation. Ceci permet une représentation du spectre de chargement en histogramme (Figure 91).

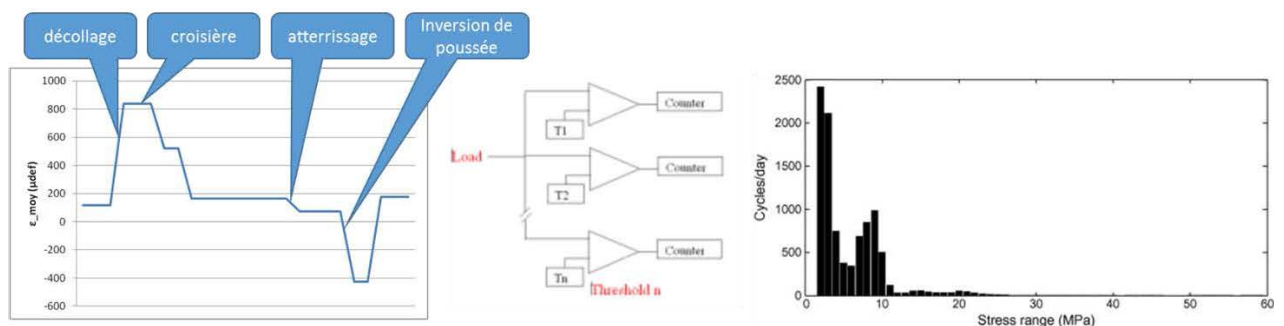


Figure 91. Comptage de franchissement de seuils de déformation

### 1.3. Choix technologiques et composants majeurs

Pour comprendre la démarche mise en œuvre, les briques technologiques composant le système et leurs règles de dimensionnement seront décrites dans les prochains paragraphes.

#### 1.3.1. Capteurs

Les capteurs ont été sélectionnés à partir des besoins suivants :

- Caractéristiques métrologiques : une plage utile de mesure de  $4000\mu\text{Def}$  avec une résolution de  $200\mu\text{Def}$ ,
- Caractéristiques électriques : résistance d'entrée élevée (de l'ordre de 5000 Ohms).
- Endurance : 2 millions de cycles de contraintes,
- Contraintes environnementales : mesure à une température de  $150^\circ\text{C}$ , spectre vibratoire important.

Le choix des capteurs conditionne fortement une partie du besoin énergétique du dispositif. En considérant les sollicitations mécaniques vues par la pièce (traction/compression avec une dynamique inférieure à 2kHz voir Figure 92), ainsi que les déformations statiques et quasi-statiques, les jauges de contraintes ont été sélectionnées (Figure 93). Elles présentent une grande résistance interne (5000 Ohms).

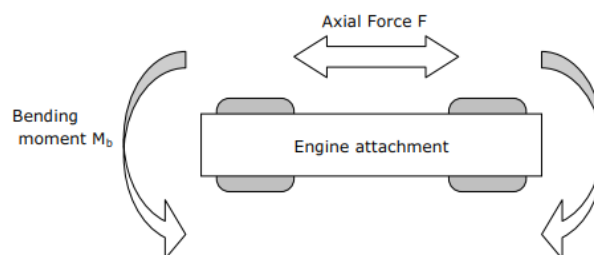


Figure 92. Sollicitations mécaniques de l'attache.

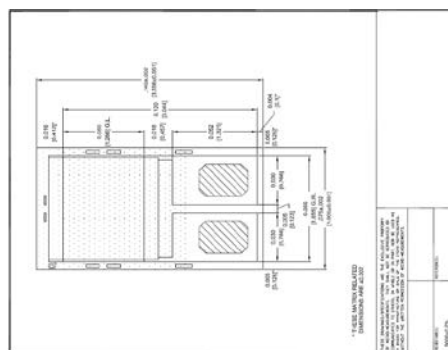


Figure 93. Jauge de contrainte du projet

Les jauges de contrainte sont une technologie mature, déjà utilisée pour des essais en vol. Ces capteurs sont connus pour leur dérive thermique. Un montage de quatre jauges de mesure en pont complet a été choisi (Figure 94). Ce type de montage permet la compensation de la dérive en température et de la présence d'une éventuelle composante de flexion, à condition que :

- Le positionnement des jauges soit parfaitement symétrique,
- Les matériaux utilisés aient le même coefficient de dilatation,
- Les jauges du pont aient des résistances proches,
- Tous les éléments soient à la même température.

Les fils de connexion des jauges au système ont également une influence du fait de leur résistance propre. Cet effet est en général compensé par un montage du pont en connexion 6 fils. Ceci n'a pas été réalisé pour le prototype, la résistance des fils par rapport à la longueur étant négligeable.

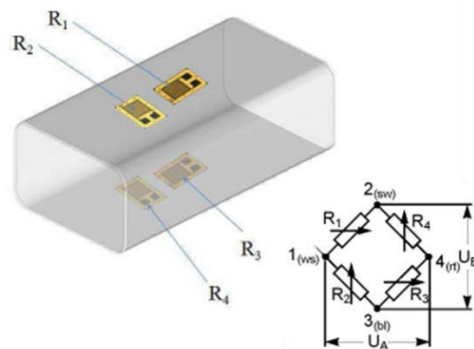


Figure 94. Montage des capteurs

La Figure 95 montre les zones possibles pour le positionnement des capteurs. La Figure 96 présente la bielle équipée des jauges de contraintes.

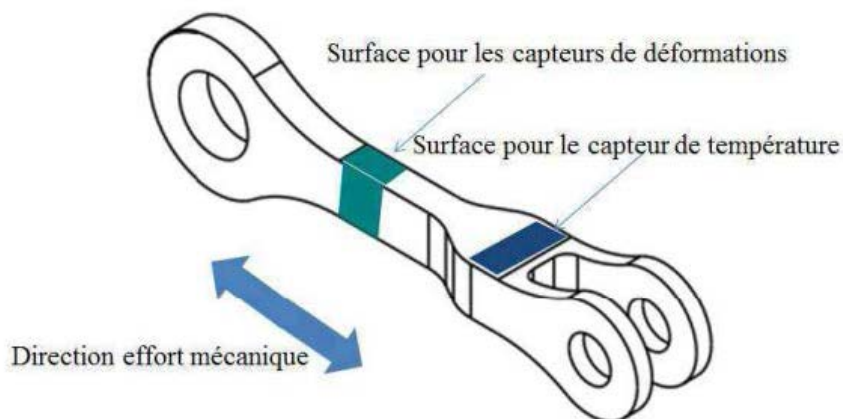


Figure 95. Zones d'instrumentation sur la bielle

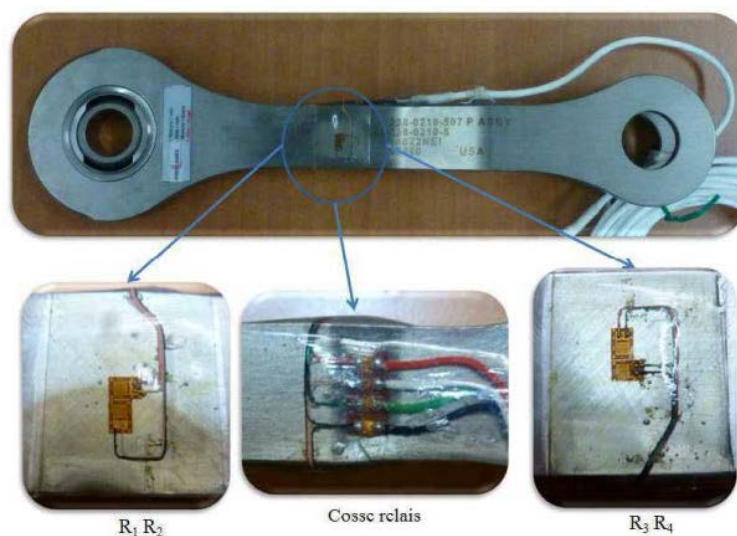


Figure 96. Montage des jauges de contrainte

### 1.3.2. Plateforme RFID à microcontrôleur

Les fonctions de mesure et d'acquisition des données, de stockage dans une mémoire embarquée et de restitution par liaison RFID sont réalisées par une plateforme RFID à microcontrôleur. La plateforme, basée sur une architecture de capteur RFID WISP, a été développée avec la société ORIDAO et présente les caractéristiques illustrées en Figure 97 :

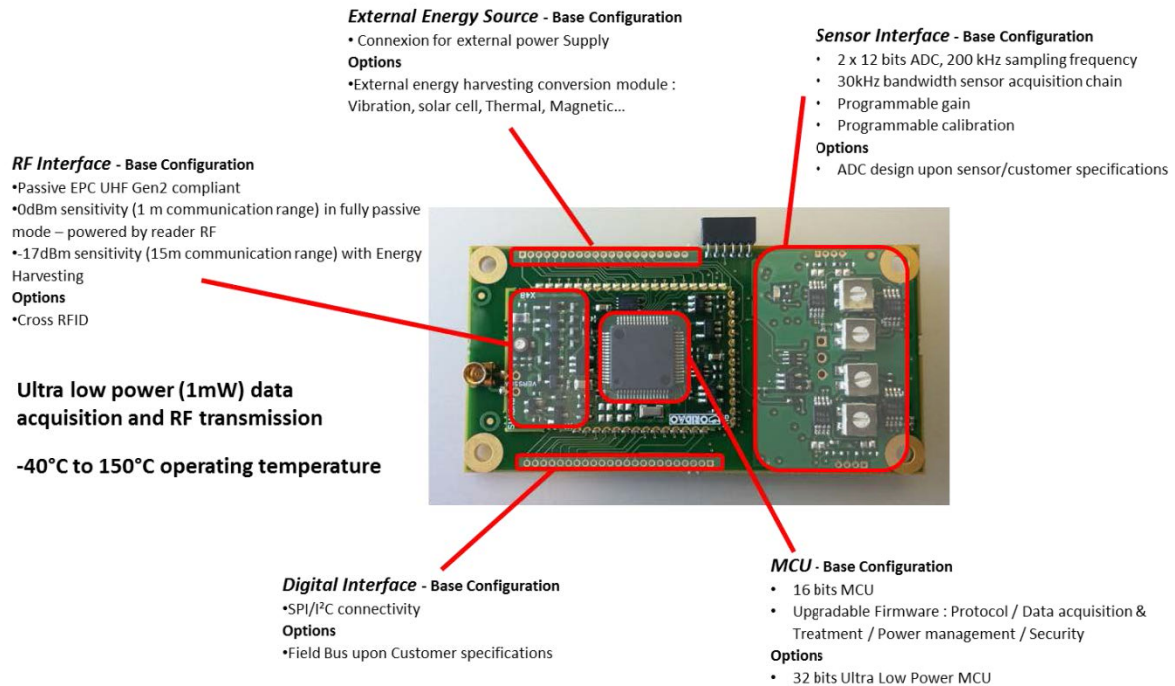


Figure 97. Plateforme RFID

La plateforme a une architecture classique composée de quatre blocs principaux :

- Front end RF : Ce bloc démodule le signal radio fournit par la lectrice, module le signal de 'backscattering' du tag et rectifie le signal RF de l'antenne pour alimenter la puce en mode autonome. Il fournit également des informations sur le signal au microcontrôleur telles que :
  - La puissance RF disponible ce qui permet d'informer le microcontrôleur qu'il est possible de s'alimenter par la liaison radio.
  - Les données issues de la démodulation, conformément au protocole EPC UHF gen 2.

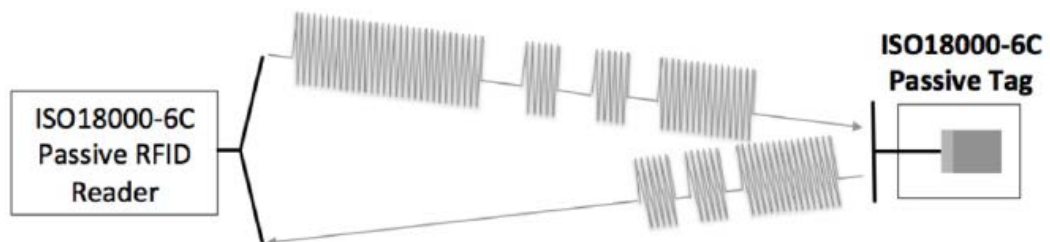


Figure 98. Protocole RFID

Le front-end RF est constitué de quatre blocs principaux, un redresseur pour générer une tension continue à partir du champ radio, un régulateur pour alimenter la totalité du circuit avec une tension régulée et à faible bruit de 1,8V, un démodulateur pour fournir un flux de données vers le microcontrôleur (MCU) et un modulateur pour générer le signal de

backscattering vers la lectrice UHF. Ce module permet de transmettre les données stockées dans la mémoire du module vers la lectrice.

- Microcontrôleur : il décode les données RF suivant la norme EPC UHF gen2 et dialogue avec la lectrice. Il gère le protocole de mesure des convertisseurs, l'état du système en fonction de l'alimentation, le filtrage et le traitement du signal.
- Acquisition des mesures : le Tag embarque deux chaînes de mesure intégrant un amplificateur d'instrumentation. Elles s'interfaçent sur des capteurs résistifs montés en pont de Wheatstone. Ces chaînes ont été optimisées afin d'obtenir la consommation la plus basse possible, 12 bits de résolution, et une bonne stabilité de la mesure sur la plage de température.

Les gains et les offsets de la chaîne d'acquisition sont ajustables à l'aide de potentiomètres présents sur la carte. Ceci permet d'optimiser les performances de la chaîne de mesure en fonction de l'environnement de mesure et de l'application. La chaîne d'acquisition permet d'éteindre l'alimentation du pont lors du passage en mode passif du module.

- Gestion de l'énergie : ce bloc fournit l'indication de puissance disponible au microcontrôleur. Il génère l'ensemble des tensions nécessaires pour le fonctionnement système. L'optimisation de ce bloc a donné lieu à une collaboration avec le LGEF pour le dimensionnement des microgénérateurs.

Le protocole RFID a été sélectionné pour les raisons suivantes :

- La RFID est un protocole de communication qui a été massivement adopté à travers le monde. Il est utilisé pour le contrôle d'accès, la gestion de la billetterie dans les transports, la logistique.
- Le principe de communication en fait un des protocoles de communication les plus basses consommations. Ce protocole présente des contraintes d'alimentation, car elle est seulement disponible au niveau de l'antenne de réception et demeure la principale limitation des tag UHF passifs. La puissance disponible au tag est donnée par la relation suivante :

$$P_{tag} = P_{lectrice} \frac{S_{er} S_{et}}{\lambda^2 d^2}$$

Avec  $P_{lectrice}$  la puissance en sortie de l'amplificateur de la lectrice,  $\lambda$  la longueur d'onde,  $d$  la distance entre la lectrice et le tag,  $S_{er}$  est la surface équivalente de la lectrice et  $S_{et}$  la surface équivalente de l'antenne. La relation entre la surface effective et le gain de l'antenne est donnée par :

$$S_{et} = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$$

En combinant les deux équations précédentes, on obtient la relation suivante :

$$P_{tag} = P_{lectrice} G_{lectrice} G_{tag} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

En prenant les hypothèses suivantes, on peut calculer la puissance maximale disponible à la communication :  $P_{lectrice}$  et  $G_{lectrice}$  ensemble peuvent être à 33 dBm, ce qui correspond au maximum de puissance émise autorisé par la norme en Europe autour de la fréquence fondamentale qui est  $f=868$  MHz, soit une longueur d'onde  $\lambda = \frac{c}{f} = 0.3456$  m ( $c$  est la vitesse de la lumière). Le gain du tag  $G_{tag}$  peut être estimé dans une plage de -3dBi à + 3dBi. La polarisation variable et l'adaptation d'impédance variable entre l'antenne et le bloc front end sont ainsi considérés.

Le protocole RFID peut être rendu plus performant en devenant actif (Figure 99). Ceci permet d'étendre la portée du protocole RFID et de communiquer dans un environnement complexe.

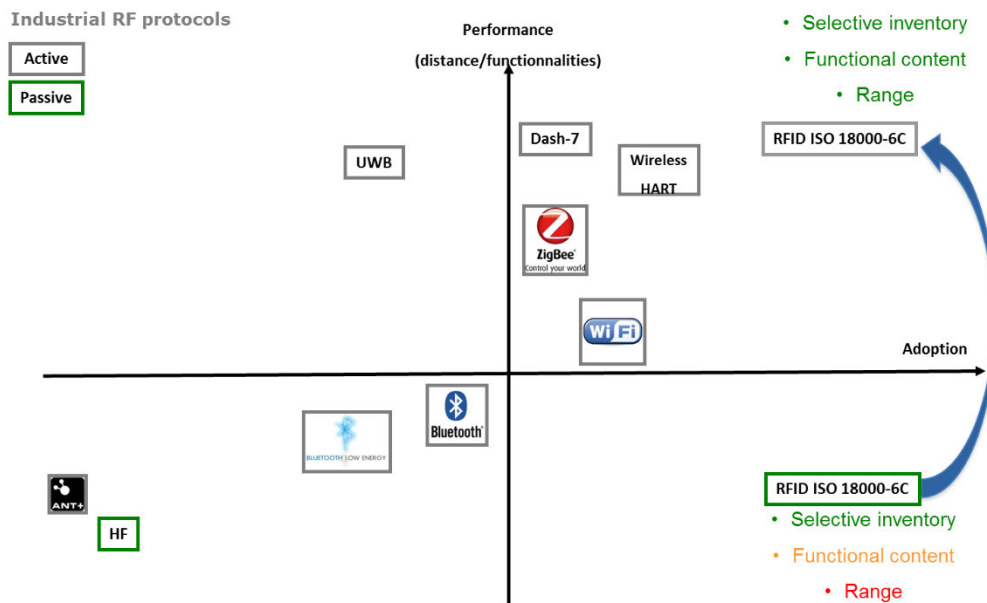


Figure 99. Comparaison des protocoles radio

### 1.3.3. Besoins en énergie du tag RFID

Le profil de consommation du système d'acquisition que notre module de capture de l'énergie ambiante doit rendre autonome, est un élément clé du cahier des charges. L'optimisation énergétique est un problème complexe qui fait appel à de très nombreux paramètres souvent interdépendants. Ces derniers peuvent être séparés en deux classes distinctes :

- Les paramètres matériels qui dépendent de l'architecture du système,
- Les paramètres logiciels qui dépendent des algorithmes de traitement, stockage et de transmission mis en œuvre dans le système.

Un modèle simple sur les besoins énergétique du système est le suivant :

$$E_{tot} = E_{algo} + E_{analog} + E_{amp}$$

Avec  $E_{tot}$  le besoin total en énergie pour alimenter le système,  $E_{algo}$  représente la consommation du processeur et des mémoires RAM et Flash,  $E_{analog}$  correspond à l'énergie dépensée par le capteur et la conversion Analogique/Numérique associée,  $E_{amp}$  est l'amplification de la partie radio.

Pour évaluer la consommation énergétique, deux analyses ont été réalisées : mesure du produit courant/tension aux bornes de l'alimentation du système pendant son fonctionnement et mesure de la consommation pour chaque cycle (Figure 100).

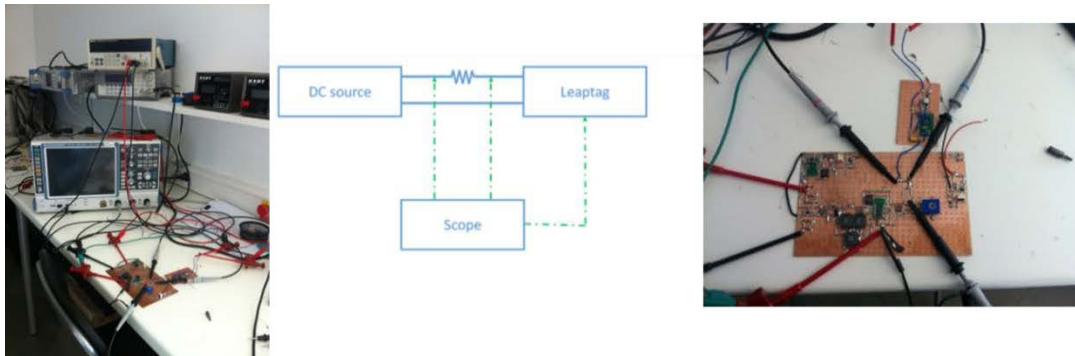


Figure 100. Mesure de consommation du tag RFID

Le système présente deux modes : un mode actif ou mode monitoring, pendant lequel le système est surveillé (mesure active) et un mode passif ou mode de veille assurant un fonctionnement minimal du microcontrôleur. Le mode actif consiste à venir périodiquement échantillonner la sortie différentielle du pont de jauge. La chaîne d'acquisition comprend un amplificateur d'instrumentation analogique et un convertisseur analogique-numérique (ADC). Les données acquises sont fournies au microcontrôleur (MCU) et sont ensuite filtrées et traitées par voie numérique. Si les données actuelles franchissent un ou plus de seuils prédéfinis, le compteur d'événements « dépassement de seuils » correspondant est incrémenté. Enfin, la valeur de chaque compteur peut être récupérée par le lecteur RFID et affichée dans un histogramme.

L'échantillonnage des données fonctionne en continu toutes les 1 ms tant que la surveillance a été activée par l'utilisateur grâce à une commande RFID spécifique et qu'une puissance suffisante est disponible sur la sortie des récupérateurs. L'état d'activation de la surveillance est stocké dans le tag afin que la surveillance commence dès que l'énergie récupérée est suffisante pour alimenter le tag. Si l'énergie baisse, la surveillance s'arrête. Elle recommence automatiquement une fois que l'énergie augmente de nouveau. La surveillance est définitivement arrêtée lorsqu'elle est désactivée par l'utilisateur via une commande RFID. Le gain de l'amplificateur d'instrumentation et la conversion des valeurs brutes en sortie du bloc ADC en  $\mu$ def sont définis par le firmware du microcontrôleur : l'utilisateur ne peut y accéder.

Étant donné que l'énergie récupérée nécessaire pour maintenir une surveillance continue du pont de jauges peut avoir des variations importantes lors de l'utilisation du module, il est nécessaire de sauvegarder régulièrement les valeurs des compteurs de franchissement de seuil en mémoire non volatile (NVM) et aussi pour conserver un historique des différents événements pouvant se produire pendant le suivi des données. Afin non seulement de limiter la consommation d'énergie moyenne nécessaire pour écrire toutes les données dans le bloc NVM, mais aussi pour améliorer la durée de vie de ce dernier, le stockage des données est exécuté toutes les minutes seulement. Un compteur spécifique a été alloué pour enregistrer le nombre total d'écritures de données réussies dans le bloc NVM. Celui-ci est ensuite incrémenté à la fin de chaque stockage complet des données en mémoire et sa valeur est également stockée en mémoire. Le suivi de l'historique d'état est donné par un seul compteur qui est incrémenté chaque fois qu'un cycle de surveillance commence avec succès. Le cycle de surveillance se déclenche lorsque les deux conditions suivantes sont vérifiées : la surveillance doit être activée par l'utilisateur, et de plus l'énergie en sortie du récupérateur est suffisante pour réaliser la surveillance. En considérant le compteur du nombre d'écritures réussies en mémoire (événement réalisé chaque minute) et le nombre de démarrages de cycle de surveillance (échantillonnage du pont de jauge) réussis, il est ainsi possible de déterminer certaines statistiques sur le temps de surveillance effectif du tag. La valeur des deux compteurs est récupérée avec la valeur des compteurs de seuil à

l'aide d'une commande RFID spécifique. Des mesures de consommation lors des appels en courant lors de différents modes de fonctionnement ont été réalisées. Ces modes de fonctionnement sont :

- Démarrage du MCU (alimentation par les récupérateurs),
- Commande Setup / Run surveillance (alimentation par le lien RFID),
- Lecture des données acquises à partir de la mémoire (alimentation par le lien RFID),
- Cycle de mesure sur le pont de jauge (alimentation par les récupérateurs).

Les phases consommant le plus d'énergie ont été caractérisées par mesure.

L'acquisition du signal sur le pont de jauge reste la phase consommant le plus d'énergie. Le niveau de consommation de cette phase dépend de la fréquence d'échantillonnage et du niveau de résistance électrique du pont de jauges. Pour un niveau de tension donné, le niveau de courant consommé par le pont peut être effectivement réduit en prenant des jauges de contrainte dont la résistance interne est la plus grande possible.

La consommation en veille obtenue en éteignant au maximum les fonctionnalités du module lorsque son activité n'est plus souhaitée est à minimiser. Une mesure globale de la puissance consommée en mode veille en fonction de la tension d'alimentation ( $V_{DD}$ ) a été réalisée. Puis, le système a été mis en mode monitoring afin de mesurer la puissance consommée. La puissance est déterminée par méthode indirecte : la tension d'alimentation  $V_{DD}$  et le courant consommé ( $I_{DD}$ ) sont mesurés à l'aide d'un voltmètre et le courant grâce à un amplificateur de courant relié à un oscilloscope (Figure 100). La puissance est calculée en utilisant le logiciel Matlab.

La consommation restante (correspondant à  $E_{algo}$  et  $E_{analog}$ ) est la consommation en mode actif. L'importance de cette consommation est inversement proportionnelle au pourcentage de temps que le système passe en activité. La Figure 101 illustre la consommation et le courant consommé en mode veille en fonction de la tension d'alimentation.

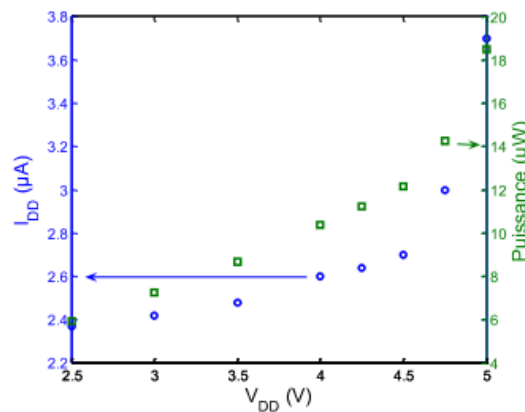


Figure 101. Evolution du courant et de la puissance consommée en fonction de la tension d'alimentation lorsque le système est en veille

On peut ici remarquer la dépendance quadratique de puissance avec la tension d'alimentation : cette dernière a été ainsi limitée sur le système pour éviter de consommer de l'énergie tout en garantissant un niveau suffisant pour l'alimentation.

La Figure 102 trace l'évolution de la puissance consommée pour un fonctionnement en mode actif en fonction de la tension d'alimentation. On retrouve également la dépendance quadratique entre tension d'alimentation et courant.



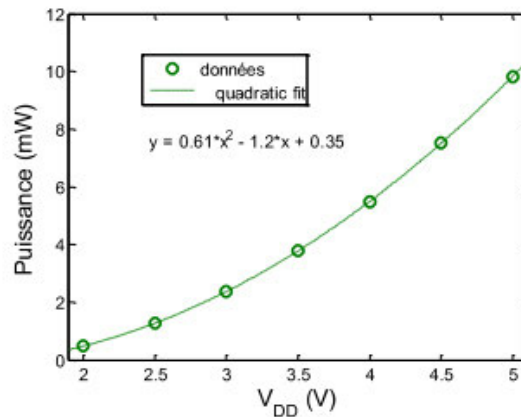


Figure 102. Puissance consommée en fonction de la tension en mode actif

Il a été choisi d'alimenter le dispositif sous 3,3V ce qui correspond à la tension d'alimentation de la plupart des composants du marché. Des mesures supplémentaires ont été réalisées à 125°C

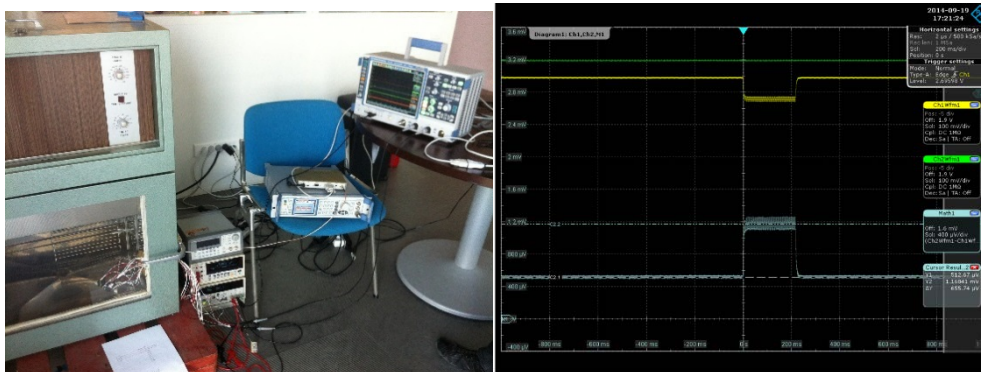


Figure 103. Mesure de courant pendant une mesure sur le pont de jauges et une écriture en mémoire (tension d'alimentation en vert, courant en gris)

Elle a permis d'identifier les besoins énergétiques complets du système résumés dans le Tableau 6.

Mode	Veille	Actif
25°C	6μW	3mW
125°C	9μW	4mW

Tableau 6. Résumé des consommations du système

La température augmente la consommation globale du système. Ces mesures ont ainsi permis d'établir un profil de consommation typique du système que les modules de récupération de l'énergie ambiante doivent rendre autonome. Son allure est donnée par la Figure 104. Ce profil correspond à un cycle sur un vol avec une acquisition intégrant uniquement la séquence suivante :

- Initialisation du mode surveillance : Set up command,
- Réalisation de la mesure : Sampling,
- Ecriture en mémoire : Read command.

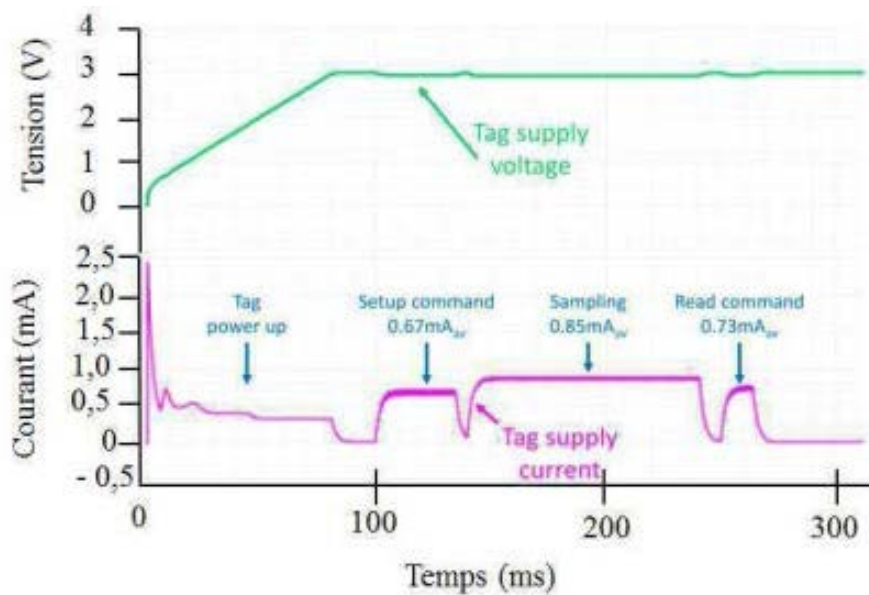


Figure 104. Profil de consommation typique du tag RFID (tension d'alimentation en vert)

Ce profil permet de vérifier que c'est le cycle de mesure à partir du pont de jauge qui reste le plus consommateur en énergie, impliquant des pics de 2,8 mW en puissance. Ce cycle a été optimisé en jouant sur la fréquence de l'échantillonnage et la résistance des capteurs au pont de jauge. L'échange de données entre le Tag et la lectrice est alimenté par le lien RFID. Le profil de consommation étant connu, les sections suivantes vont s'intéresser au travail de dimensionnement des microgénérateurs et de la chaîne de gestion de l'énergie.

#### 1.3.4 Energies ambiantes

Le concept de récupération de l'énergie présente dans l'environnement du système à alimenter implique l'interception d'un flux externe d'énergie : un système plongé dans un environnement isotherme, ou soumis à une accélération constante, ne pourra rien extraire de son environnement. Ceci étant posé, et nous limitant au contexte du projet, la nacelle du moteur a de nombreuses sources d'énergie qu'il est possible de capter avec des technologies de récupération d'énergie : différentiel de températures, variations de températures, vibrations, contraintes, lumière ambiante, variations de pression, charge électrostatique ...

Cependant, toutes les sources n'ont pas le même potentiel pour fournir suffisamment de puissance à un système de surveillance. Les drivers techniques du projet sont le ratio puissance/masse et la fiabilité. Au regard de ces critères, les sources les plus pertinentes dans l'environnement nacelle-moteur sont les gisements thermiques et vibratoires.

Les données disponibles sur l'environnement nacelle-moteur sont parcellaires voire inexistantes. Leur obtention est complexe car il s'agit d'un évènement à la frontière entre l'avionneur (ici Airbus) et le motoriste (SAFRAN). Les données sur l'environnement ont été réellement disponibles sur la fin du projet, ceci en raison de l'approche retenue. Il s'agit certes d'un point critique pour le succès du projet, mais le plus riche en enseignements a été de comprendre la démarche autour de la conception d'un système autonome en énergie.

##### 1.3.4.1. Source d'énergie vibratoire

De manière générale, l'énergie vibratoire dans un aéronef recouvre des phénomènes très différents. Il existe deux sources principales de vibrations qualifiées d'interne et d'externe (turbulences...). Le

système de propulsion est la principale source interne. On peut citer les sources vibratoires suivantes dans un aéronef :

- Oscillations aléatoires de la structure de l'avion à basse fréquence liées au vol (accélérations diverses sous l'effet de la commande de vol ou des moteurs, turbulences...) (<10Hz)
- Vibrations permanentes et souvent périodiques de la structure de l'avion (de 10Hz à plusieurs KHz) dont les moteurs sont à l'origine
- Vibrations acoustiques (bruit), assez importante dans la zone des moteurs

Les vibrations produites par le moteur à réaction sont généralement comprises dans une bande de fréquence entre 20 Hz et 500 Hz sous une accélération maximale de 3g. Il est courant de séparer l'aéronef en régions et de supposer que les amplitudes de vibrations sont similaires pour tous les équipements positionnés dans cette région. La Figure 105 donne une représentation de découpage pour un avion et un hélicoptère civils.

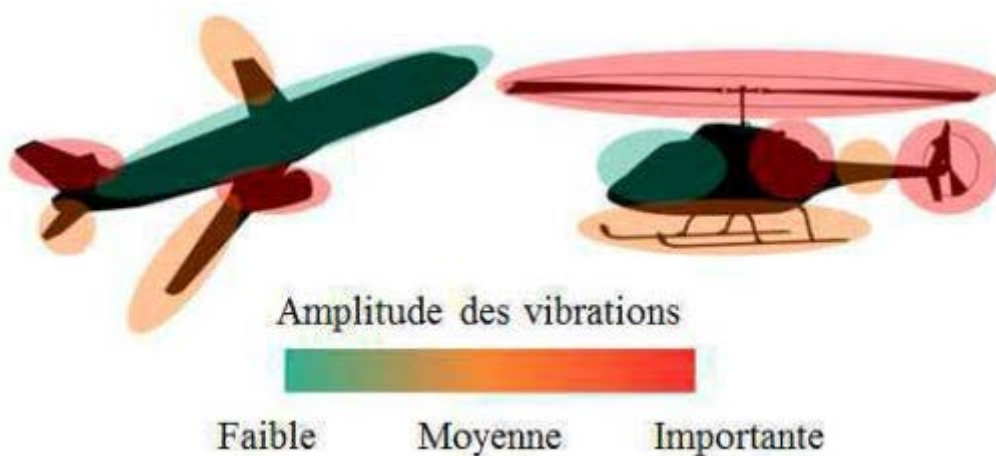


Figure 105. Représentation schématique de vibration dans un avion et un hélicoptère

En début de projet, la récupération de l'énergie mécanique des vibrations se développant dans la nacelle semblait une excellente idée, au moins du fait de la répartition de ces vibrations dans toute la structure de l'aéronef et d'un accès possible à l'énergie qui ne soit plus ici fonction de la localisation de la capture envisagée, comme c'est le cas en thermogénération pour laquelle la présence d'un corps chaud est requise. Le cahier des charges initial indique que la bande de fréquence est de 40 Hz à 600 Hz avec des maximum de vibration dans la bande 70 Hz à 200 Hz. La Figure 106 représente l'enveloppe des vibrations fournies initialement dans le cahier des charges. Pour des raisons de confidentialité, les amplitudes ne sont pas indiquées mais normalisées.

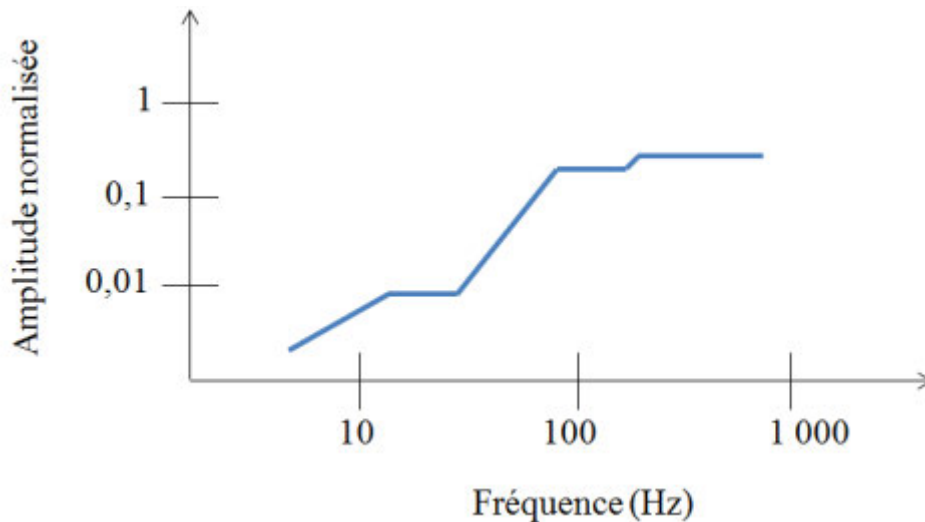


Figure 106. Enveloppe de vibration fournie au cahier de charges en amplitude normalisée

#### 1.3.4.2. Source d'énergie thermique

Dans un aéronef, de nombreux gradients thermiques sont présents : toutes les sources internes de chaleur en génèrent telles que les baies électriques et électroniques, les actionneurs, certaines conduites de fluides, les moteurs, les freins, etc. Des gradients thermiques se développent également entre l'extérieur et l'intérieur de l'aéronef (notamment en fonction de l'altitude) et donc entre les parois internes et l'air des compartiments pressurisés et chauffés. Certains gradients sont plus ou moins permanents, d'autres transitoires, certains ont des valeurs déterminées à l'avance, tandis que d'autres sont aléatoires. Les différents gradients disponibles sont représentés en Figure 107.



Figure 107. Représentation schématique des gradients thermique dans les structures de type avion et hélicoptère

Dans le cas du projet, la bielle se trouve entre un point chaud (le moteur) et un point froid (la structure du pylône) comme l'illustre la Figure 108. La température chaude côté moteur est de  $120^{\circ}\text{C}$  et la température froide est de  $80^{\circ}\text{C}$ . La bielle est réalisée en titane Ta6V-DMD776, de conductivité thermique  $6,7\text{W/m}$ .

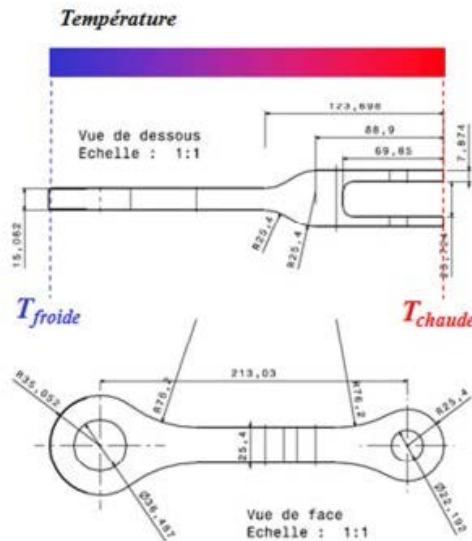


Figure 108. Bielle de reprise de poussée,

Aucune information concernant l'environnement thermique de la bielle n'est disponible, comme la température ambiante, ou les flux d'air circulant dans la nacelle. De plus, le coefficient de convection thermique diminue avec l'altitude. A 3500 m, le coefficient est réduit de 25% et de 40% à 6000 m (Adjusting Temperatures for High Altitude, de la revue en ligne Electronics Cooling, 1er septembre 1999 /How to select a heat sink, de Seri Lee, accessible en ligne). La Figure 109 présente l'environnement nacelle.

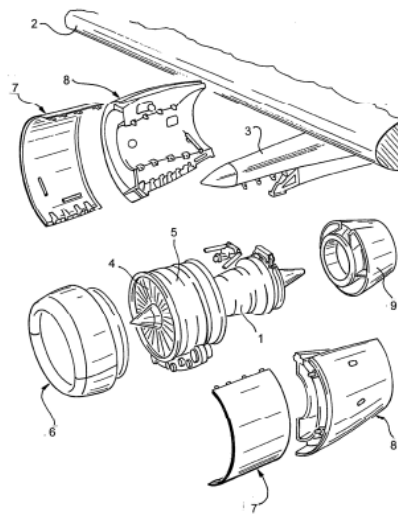


Figure 109. Nacelle-moteur, vue schématique

Le système d'attache se situe dans le flux d'air du fan. Le volume autour est assez confiné et hermétique par rapport à l'environnement extérieur limitant les mouvements d'air. Afin d'être dans un cas défavorable, le coefficient d'échange entre la bielle et l'air de son environnement sera pris comme égal à  $10 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Cette valeur correspond au cas typique d'un échange thermique par convection libre.

Afin d'analyser l'influence de la température ambiante sur la répartition du gradient thermique dans la bielle, des modélisations sous éléments finis ont été effectuées. Les résultats sont présentés en Figure 110. Il est intéressant de noter que la température ambiante influence énormément le gradient interne

de la bielle. Pour cela, une température moyenne localisée sur la moitié de la bielle a été calculée, elle est nommée température chaude du module.

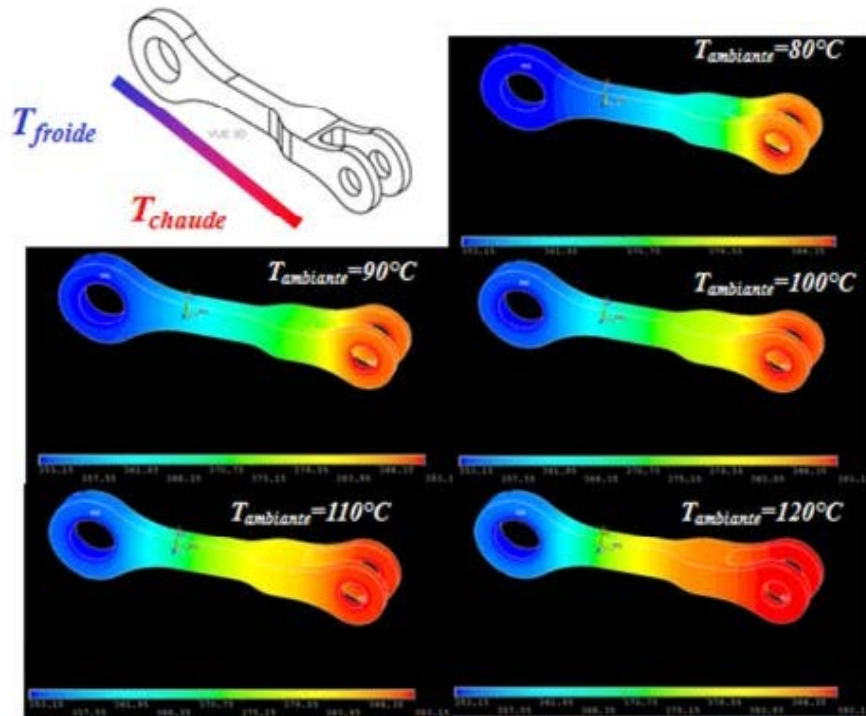


Figure 110. Influence de la température ambiante sur le gradient de la bielle

La Figure 111 donne l'évolution de la température chaude du module en fonction de la température ambiante. Une dépendance linéaire entre les deux grandeurs est mise en évidence. Un autre phénomène intéressant est observé : l'inversion du gradient spatial de température. En effet pour une température ambiante inférieure à 108°C, la température chaude du module est supérieure à la température ambiante. Lorsque la température ambiante dépasse les 108°C, cela n'est plus le cas. Cette situation correspond à un cas extrême qui n'arrive pas en fonctionnement normal, mais qui doit être considéré.

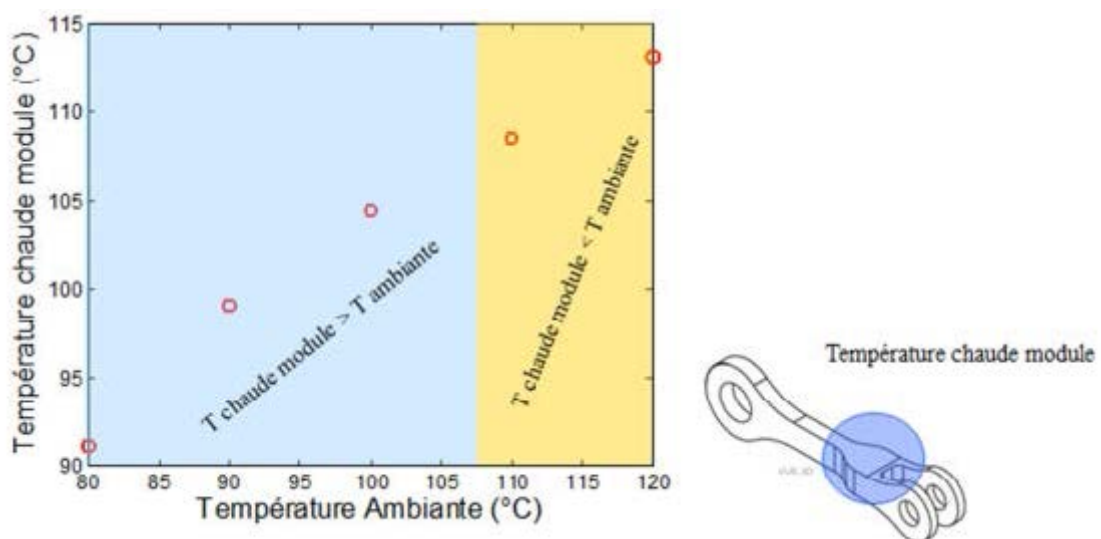


Figure 111. Evolution de la température chaude du module en fonction de la température

### 1.3.4.3. Conclusion sur l'environnement énergétique de l'attache

Les sections précédentes ont permis d'identifier les sources d'énergie récupérable pour alimenter la plateforme RFID, avec une caractérisation préliminaire. Cette analyse nous a menés vers le développement de deux microgénérateurs, basés sur deux principes différents : mécanique et thermique comme présenté en Figure 112.

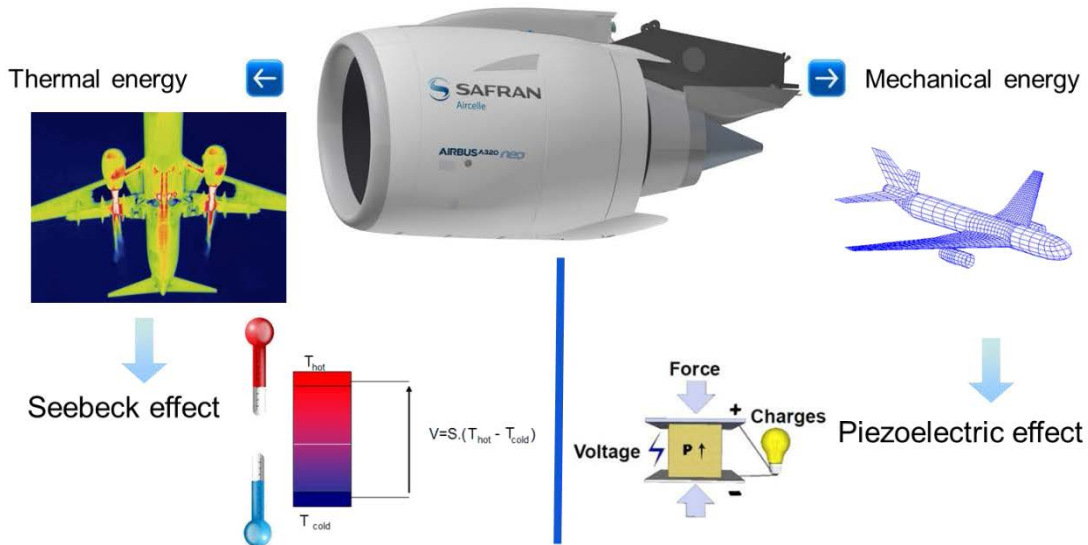


Figure 112. Sources disponibles

On retiendra principalement :

- La présence d'un gradient thermique dans la bielle exploitable pour réaliser de la récupération d'énergie par thermogénération : la récupération d'énergie thermique en interceptant un flux thermique entre un corps solide et l'air. Le thermogénérateur sera donc, sur une face de la bielle, en contact indirect (par l'intermédiaire d'une platine) avec une paroi, et échangera par convection avec l'air sur sa deuxième face par l'intermédiaire d'un dissipateur. Un exemple de réalisation est présenté en Figure 113.

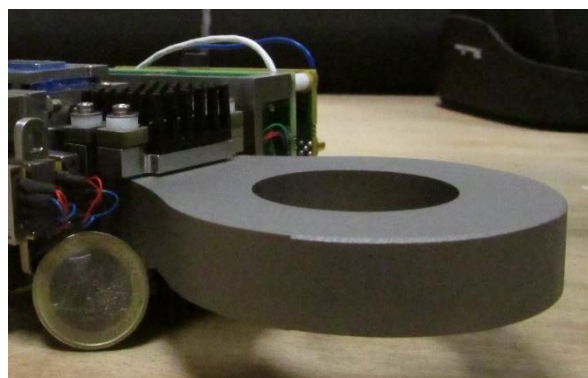


Figure 113. Thermogénérateur intégré à la bielle

En pratique, la face de la bielle constitue généralement la source chaude et l'air la source froide. Dans la suite de cette étude, seuls les échanges par conduction et convection sont envisagés. L'absence de données sur les régimes d'écoulement d'air ou le régime thermique réel sur un vol impose d'être conservateur sur le dimensionnement.

- La récupération d'énergie des vibrations en provenance du moteur. Un gabarit vibratoire a été fourni. La réalisation sur bielle est présentée en Figure 114.

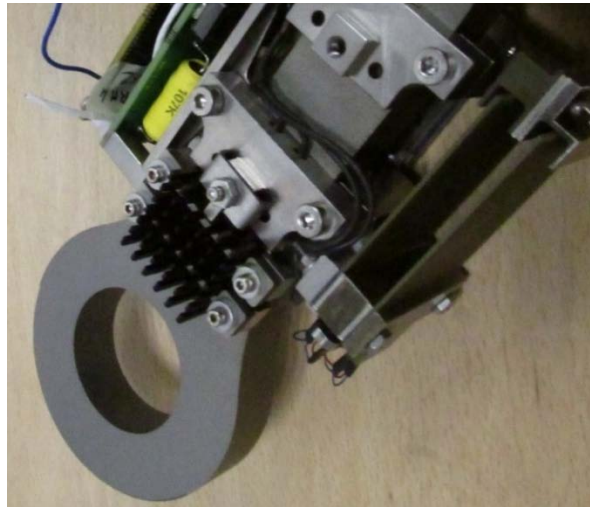


Figure 114. Exemple de réalisation récupérateur vibratoire.

En pratique, on peut s'attendre à ce que la récupération de cette énergie vibratoire soit malheureusement rendue difficile du fait des caractéristiques ci-dessous :

- L'architecture du récupérateur fait qu'il n'y a d'énergie à récupérer qu'au niveau des pics autour de la fréquence des harmoniques  $F_h$ . La position de ceux-ci étant fonction du régime moteur, cela implique un transducteur à bande passante suffisamment large (voir infra).
- Pendant la phase du vol en croisière, il n'y a quasiment pas de pics de puissance ni d'énergie à récupérer, or la phase de croisière constitue souvent l'essentiel du vol ;
- Pour des positions éloignées du moteur (fuselage par exemple), la densité spectrale d'énergie est beaucoup plus faible.
- Sur d'autres positions dans l'avion, lorsqu'un pic est présent (fondamental par exemple), il peut être décalé de quelques Hertz par rapport à  $F_h$  mesurée près du moteur, voire amorti en amplitude (effet de filtrage de la structure). L'information relative à ces points critiques n'a pu être vérifiée qu'en fin de projet.

Les paragraphes suivants vont exposer l'architecture et la réalisation des récupérateurs.

### 1.3.5. Architecture générique des microgénérateurs

Ce paragraphe détaille les travaux réalisés pour l'intégration de microgénérateurs récupérant l'énergie vibratoire et thermique.

La Figure 115 présente l'architecture générique d'un système de récupération de l'énergie.



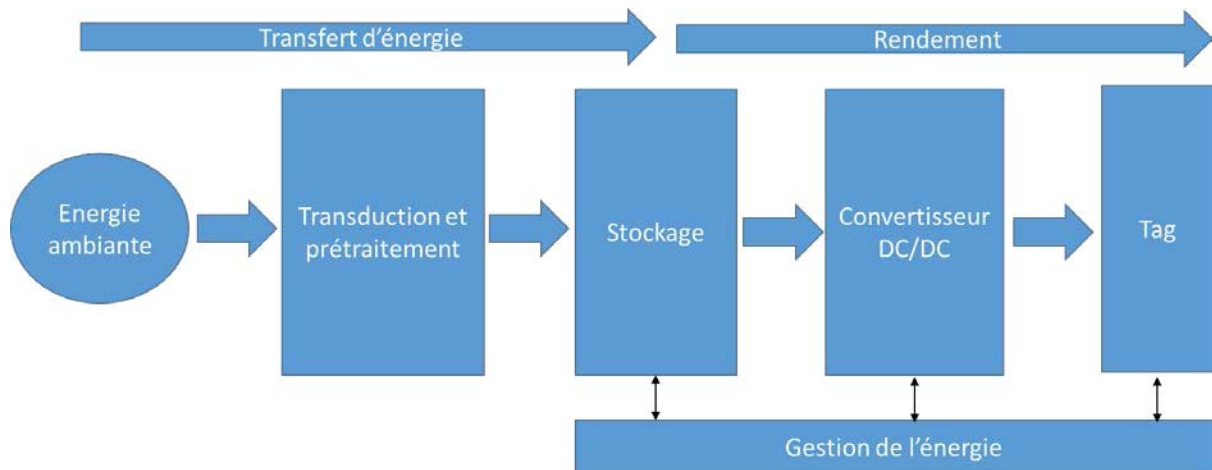
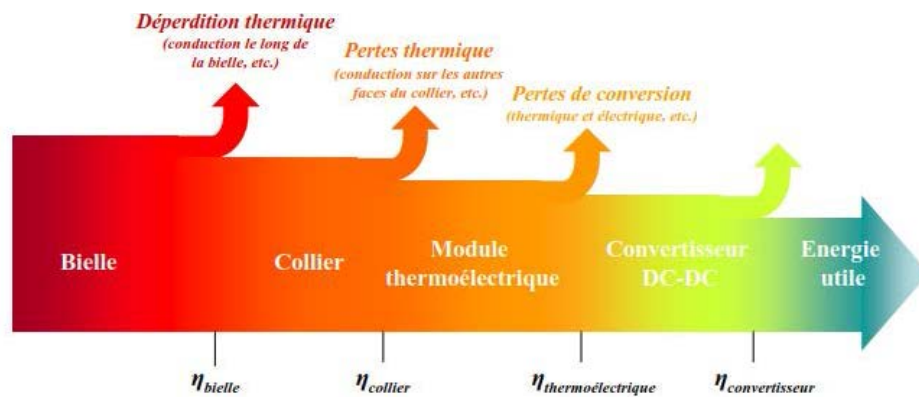


Figure 115. Architecture générique d'un système de récupération de l'énergie

L'entrée est constituée d'une source d'énergie extérieure, présente dans l'environnement proche du système : vibrations mécaniques ou flux de chaleur. Le transducteur aura pour fonction de transformer cette énergie primaire en électricité. Au-delà de l'opération de transduction, il est souvent indispensable de procéder à un prétraitement de l'énergie dès ce stade, comme par exemple :

- Effectuer le redressement de la sortie alternative du transducteur (cas d'un transducteur traitant les vibrations mécaniques) ;
- Réaliser une adaptation d'impédance, maximisant ainsi le transfert d'énergie ;
- Limiter la tension électrique appliquée à l'élément de stockage.

A ce niveau, la priorité est donnée à la maximisation du transfert d'énergie, d'où la fonction d'adaptation d'impédance mentionnée ci-dessus. Les étages suivants sont le stockage et la conversion de l'énergie, (convertisseur DC/DC). Celle-ci a pour fonction de générer une tension constante sur sa sortie, indépendante de l'état de charge du stockage et adaptée à la polarisation du Tag. Le tag est constitué des circuits et composants nécessaires à la réalisation des fonctions des nœuds du réseau de capteurs (mesure, traitement du signal, transmission, etc.). Le rendement de ce convertisseur, mais également la conception de l'ensemble de la charge, doivent maximiser le rendement global, utilisant au mieux l'énergie capturée par le transducteur. La Figure 116 présente les différentes pertes pour un générateur thermoélectrique (a) et piézoélectrique (b).



(a)

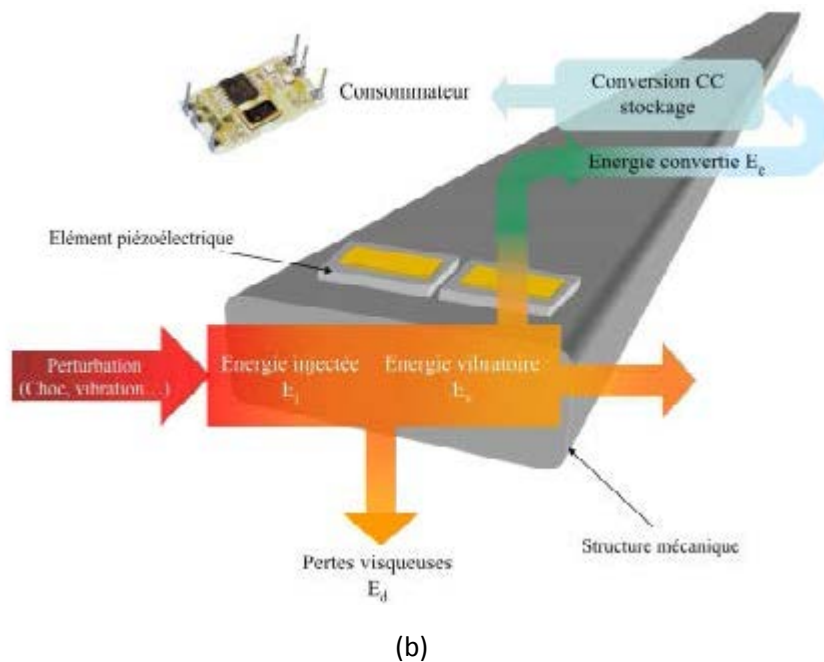


Figure 116. Pertes sur une chaîne de conversion par thermogénération (a) et piézoélectricité (b)

La dernière fonction mentionnée sur la Figure 115 est celle de la gestion de l'énergie. Cette fonction est très dépendante de l'application et de l'architecture précise du système, représentée en Figure 116 de façon générique. Cette fonction a été mise en œuvre par des composants analogiques spécifiques au tag. Des fonctions plus avancées peuvent être implantées comme par exemple :

- Gérer le réveil autonome de l'ensemble lorsque la réserve d'énergie est vide et que les circuits électroniques ne sont pas polarisés, mais que, en revanche, le transducteur est prêt à fournir de l'énergie électrique, l'environnement du tag étant à nouveau favorable ;
- Prendre en compte l'état de la réserve d'énergie pour conditionner l'initiation d'opérations (telle la transmission d'une trame radio) ou l'écriture en mémoire de données en ayant la garantie de pouvoir mener l'opération jusqu'au bout.

Dans la réalisation finale, la gestion de l'énergie est réalisée par un comparateur qui vérifie le niveau de tension en sortie du régulateur pour démarrer le microcontrôleur sur le tag.

### 1.3.6. Module de récupération d'énergie vibratoire

#### 1.3.6.1. Transducteur piézoélectrique

Le choix du mode de transduction s'est orienté vers un générateur utilisant une base de conversion piézoélectrique. On rappelle ici que la piézoélectricité est la propriété que possèdent certains matériaux de se polariser électriquement sous l'action d'une déformation mécanique et, réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique, comme l'illustre la Figure 117.



Figure 117. Effet piézoélectrique direct

Les équations phénoménologiques régissant la piézoélectricité sont rappelées ici :

$$\begin{cases} D = d.T + \varepsilon^T E \\ S = S^E.T + d.E \end{cases}$$

Ce choix de conversion est justifié par la large bande de fréquence de travail qui a été initialement identifiée dans la section précédente. Le choix doit également tenir compte de la contrainte en termes de température ambiante de fonctionnement (150°C max). Ceci entraîne de nombreux challenges pour la tenue en température de l'électronique du microgénérateur, pour les matériaux de conversion (température de Curie pour les matériaux ferroélectrique) mais aussi pour la structure mécanique du convertisseur vis-à-vis de sa dilatation. La dernière exigence est la durée de vie du système pouvant être la durée de vie complète du composant de l'avion, une période de 10 ans, correspondant à l'intervalle entre deux visites de maintenance prolongée.

Il existe une large gamme de matériaux pouvant répondre aux exigences de tenue mécanique et thermique. De plus, la plage de fonctionnement recherchée (70 Hz à 200 Hz) correspond au domaine de fonctionnement où les récupérateurs d'énergie piézoélectrique possèdent des densités de puissance supérieures aux autres technologies.

Il est possible d'améliorer la transformation d'énergie à l'aide d'une structure hôte appelée sismique (Figure 118) où l'énergie mécanique est transférée à une structure oscillante constituée par une poutre sur laquelle sont collés des inserts piézoélectriques et éventuellement une masse sismique. Cette technique permet non seulement de sélectionner le mode sur lequel on désire récupérer de l'énergie mais aussi d'amplifier la déformation de la poutre à cette fréquence, avec comme conséquence l'augmentation de l'efficacité de la récupération. L'énergie récupérée dépend dans ce cas de l'accélération induite par le déplacement du corps rigide de la structure.

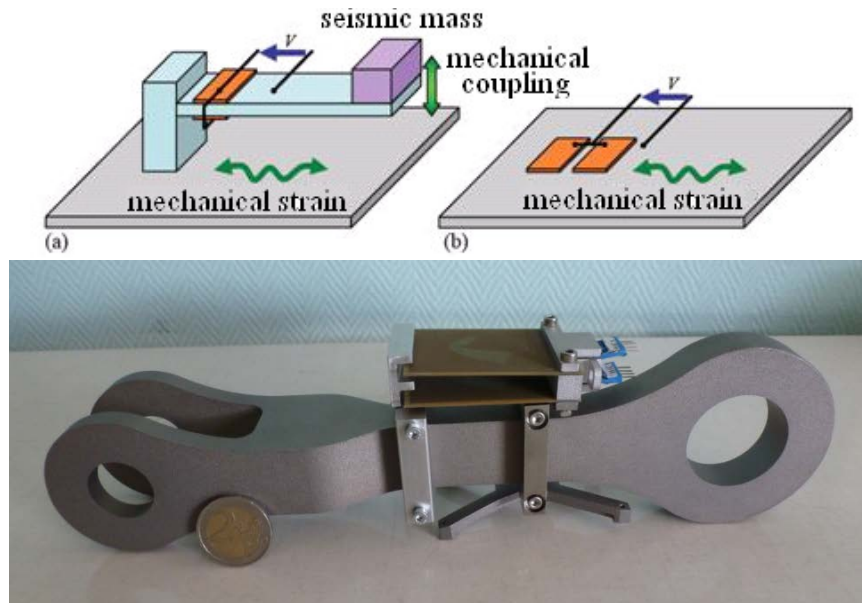


Figure 118. Couplage indirecte structure/transducteur piézoélectrique par oscillateur mécanique

Le projet a utilisé un modèle proposé par A.Badel [2] dans le cadre de sa thèse au LGEF, reposant sur l'utilisation d'une modélisation du second ordre de type masse-ressort-amortisseur avec couplage électromécanique. L'étude du dimensionnement ne sera pas détaillée dans le présent mémoire.

Au vu du dimensionnement du micro-générateur réalisé avec la simulation, deux fréquences ont été identifiées à 106 Hz et 183 Hz où la puissance récupérée est maximale.

#### 1.3.6.2. Sélection du transducteur et caractérisation

L'objectif de cette partie est de présenter les solutions actuellement disponibles, ainsi que les critères utilisés pour comparer les technologies. L'état de l'art effectué dans la présente section ne traite que des technologies matures conduisant à des dispositifs robustes et peu sensibles aux perturbations extérieures, sans passer par des étapes de dispositif sur mesure, applicables aux contraintes applicatives du projet.

Les matériaux présentant des propriétés piézoélectriques sont utilisés dans un grand nombre d'applications. Pour mieux guider le choix sur les principales caractéristiques à considérer pour la performance du matériau vis-à-vis de la récupération d'énergie, des figures de mérites (FOM) ont été définies. La FOM est basée sur des caractéristiques intrinsèques du matériau à savoir :

- Forte valeur du coefficient  $g$  et  $d$ ,
- Fort coefficient de couplage  $k$ ,
- Facteur de qualité  $Q_m$  élevée,
- Très bonne résistance à la dégradation des propriétés électriques ou mécaniques engendrées par de fortes contraintes mécaniques,
- Stabilité des propriétés en fonction de la température.

Richard et al. [113] ont déterminé la FOM de la conversion à l'aide d'éléments piézoélectriques. Ils se sont intéressés au rendement de ce dispositif lorsqu'il est excité à sa fréquence de résonance par une force d'amplitude constante. Ces travaux confirment l'existence d'une valeur de résistance qui maximise le rendement. Le rendement ( $\eta$ ) maximum est dépend du coefficient de couplage global  $k$  du micro-générateur et de son facteur de qualité mécanique  $Q$ , comme le traduit l'équation (1). Il est

intéressant de constater que le rendement augmente logiquement avec le couplage et le facteur qualité mécanique. En utilisant des structures suffisamment surtendues ( $Q$  élevé), il est possible d'obtenir des rendements très importants même pour des coefficients de couplage électromécanique faibles. Ainsi, pour  $Q=150$  et  $k^2=5\%$ , on obtient un rendement de 80%.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{2}{k^2 Q}} \quad (1)$$

Pour des raisons de commodité la  $FOM_{\text{convertisseur}}$  du convertisseur (élément piézoélectrique et structure) s'exprime sous la forme :

$$FOM_{\text{convertisseur}} = k^2 Q \quad (2)$$

Concernant les propriétés intrinsèques du matériau. La  $FOM_{\text{matériaux}}$  s'exprime en déterminant l'énergie récupérée sur un élément longitudinal soumis à une contrainte uniaxiale  $T_3$  (Figure 117).

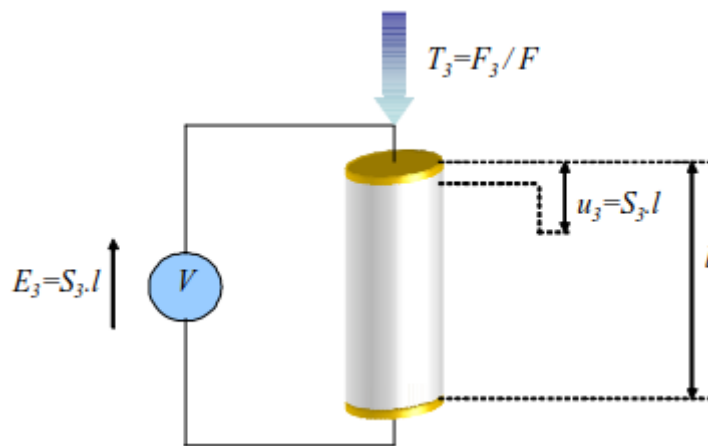


Figure 119. Élément piézoélectrique soumis à une contrainte

Lorsqu'un élément longitudinal piézoélectrique (Figure 119) est soumis à une contrainte uniaxiale  $T_3$ , une différence de potentiel  $V$  apparaît entre ses deux électrodes. Si l'élément fonctionne à vide, le potentiel à vide  $V_0$  est :

$$V_0 = E_3 \cdot l = g_{33} \cdot T_3 \quad (3)$$

où  $g_{33}$  est la constante de tension, caractéristique intrinsèque au matériau piézoélectrique utilisé. La capacité  $C$  de l'élément s'écrit sous la forme

$$C = \frac{\epsilon \phi}{l}$$

avec  $\phi$  et  $l$  sont respectivement la section et la longueur de l'élément et  $\epsilon$  la permittivité du matériau. L'énergie maximale stockée dans l'élément sous forme électrostatique est donc :

$$E_{\text{électrostatique}} = \frac{1}{2} C V_0^2 = \frac{1}{2} d_{33} g_{33} T_3^2 \phi l \quad (5)$$

où  $d_{33}$  est la constante de charge du matériau utilisé. Il est donc possible de déduire la densité d'énergie convertie ( $W_{\text{électrostatique}}$ ) :

$$W_{\text{électrostatique}} = \frac{1}{2} d_{33} g_{33} T_3^2 \quad (6)$$

L'équation (6) fait ressortir les paramètres rentrant en compte dans la conversion à savoir le rapport  $d_{33}g_{33}$ . La  $FOM_{matériaux}$  s'exprime alors sous la forme :

$$FOM_{matériaux} = d_{33}g_{33} \quad (7)$$

Il est possible de simplifier l'expression (7) comme  $d_{ijk}/g_{ijk} = \varepsilon_{ij} : FOM_{matériaux} = \frac{d^2}{\varepsilon}$  (8).

Les deux paramètres du matériau rentrant en compte dans la conversion mécano-électrique sont donc le coefficient piézoélectrique  $d$  et la permittivité  $\varepsilon$ . Maintenant que les FOM du transducteur et du matériau ont été identifiés, la prochaine partie de l'étude concerne un état de l'art sur les solutions du commerce capable de répondre aux contraintes applicatives du projet.

#### 1.3.6.3. Sélection d'une solution du commerce

Au vu de l'application visée dans le cadre du projet EPICE, les contraintes sur la technologie des micro-générateurs piézoélectriques sont les suivantes :

- Facilement intégrable,
- Température d'utilisation importante jusqu'à  $T_{max}=150^{\circ}C$ ,
- Densité de puissance importante.

Parmi les différents fournisseurs et fabricants de matériaux piézoélectriques, les produits de chez :

- Smart Material (<http://www.smart-material.com/>),
- Piezo Systems (<http://www.piezo.com/>),
- Volture (<http://www.mide.com/>).

se sont distingués comme des solutions intéressantes, pour plusieurs raisons présentées dans le Tableau 7 les trois technologies selon les critères intimement liés à l'application visée par le projet où sont comparées :

- a. Température d'utilisation
- b. Intégration
- c. FOM (équivalent d'une densité de puissance)
- d. Prix
- e. Fragile

Les produits de chez Volture ressortent, clairement grâce à leur tenue en température, mais aussi par les informations disponibles en lien direct avec la récupération d'énergie. L'avantage d'utiliser les solutions de chez Smart Material repose sur leur flexibilité permettant de les intégrer sur des structures courbes, mais qui ne correspond pas au cas du projet EPICE. Concernant le fabricant Piezo Systems, le problème réside dans une faible tenue en température du système de montage (Quick Mount) contrairement au cas de Volture. Pour l'ensemble de ces raisons, les produits de chez Volture ont été retenus pour être intégrés sur la bielle instrumentée.

	SMART MATERIAL	Piezo Systems	volture™
Température	☹️	☹️	😊
Intégration	☹️	😊	😊
FOM	☹️	😊	😊
Prix	☹️	☹️	😊
Fragile	😊	☹️	☹️

Tableau 7. Comparaison des différents produits

Les prochains paragraphes détailleront la procédure expérimentale pour caractériser les systèmes piézoélectriques de chez Volture, ainsi qu'une analyse des réponses obtenues. Au vu des informations constructeur, l'étude se focalise sur la référence V20W.

La technologie utilisée par Volture pour la réalisation des poutres est donnée en Figure 120. Il s'agit de patches sous forme de céramique massive pris en sandwich entre des feuilles de protection.

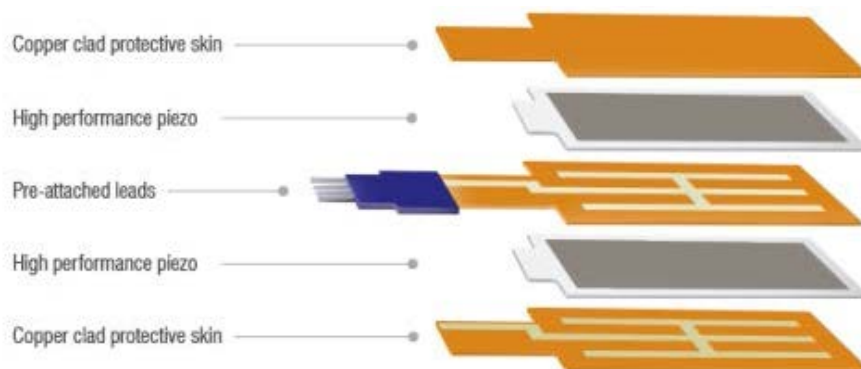


Figure 120. Principe de la technologie Volture (extrait de [5])

#### 1.3.6.4 Caractérisations expérimentales

Dans le but de vérifier les données avancées par Volture et de dimensionner l'étage d'optimisation de l'énergie, les mesures suivantes ont été effectuées :

- Tension et puissance en circuit ouvert en fonction de la fréquence pour une accélération constante et sans masse sismique
- Puissance pour la fréquence de résonance en fonction de l'accélération (ajout d'une masse de 5g en bout d'élément) et identification des paramètres électromécaniques
- Caractérisation en fonction de la température

#### Description du protocole expérimental

Pour les caractérisations (a) et (b) l'élément piézoélectrique V20W est encastré à une de ses extrémités dans un support rigide en acier. Le matériau piézoélectrique est positionné près de l'encastrement où le rayon de courbure est le plus faible (Figure 121(b)). L'ensemble est ensuite monté sur un pot vibrant (Bruel & Kjaer model V201) qui génère une excitation mécanique. La vitesse en bout de poutre sur l'extrémité libre est mesurée à l'aide d'un vibromètre laser (Polytec OFV3000). Un accéléromètre

(LIS344AL) est fixé sur le support afin d'avoir une information sur l'excitation mécanique appliquée au système. La tension générée par la structure ainsi que la vitesse sont visualisées sur un oscilloscope (Agilent DSO 6054A Mega Zoom). La Figure 121(b) illustre de façon schématique la structure du banc de caractérisation.

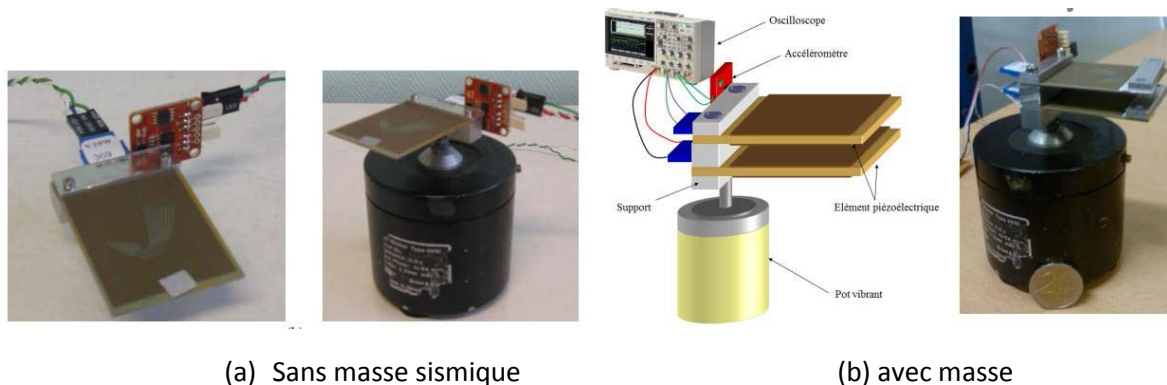


Figure 121. Principe de la méthode de caractérisation

Pour la caractérisation (c) le dispositif expérimental est représenté sur la Figure 122. Le module V20W est fixé sur un support. L'ensemble est ensuite mis dans un four (FURNACE 47900) pouvant faire évoluer la température 25°C à 150°C. La structure est reliée à un impédancemètre Agilent E5061B LF-RF permettant de déterminer les coefficients de couplage ( $k$ ) ainsi que le coefficient de qualité ( $Q_m$ ) de la structure en fonction de la température. Ces informations permettront ainsi de juger des propriétés de conversion sur une large gamme de températures, afin de valider le choix des matériaux de conversion.

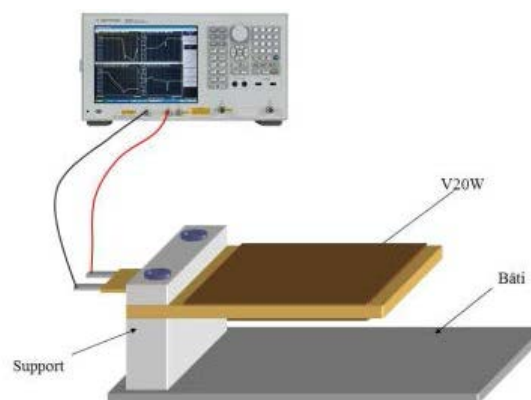


Figure 122. Principe de la caractérisation en température

#### (a) Mesure du système en circuit ouvert

La Figure 123(a) donne l'évolution de la vitesse en bout de poutre et de la tension en circuit ouvert (valeur RMS) en fonction de la fréquence, pour une accélération constante de 0.5g. Il est intéressant de noter que la fréquence de résonance de la structure est à 140 Hz ; la résonance du système correspond au maximum de tension ou de vitesse. La Figure 123 (b) donne l'évolution de la fréquence de résonance en fonction de la masse sismique ajoutée en bout de poutre. D'après ces informations, la fréquence de résonance est typiquement située à 180Hz, mais cette valeur dépend beaucoup des conditions aux limites imposées par le support. De plus, la valeur de la tension correspond aux indications du fabricant, donnant une tension en circuit ouvert de 7.7V pour une accélération de 0.5g à 180 Hz.



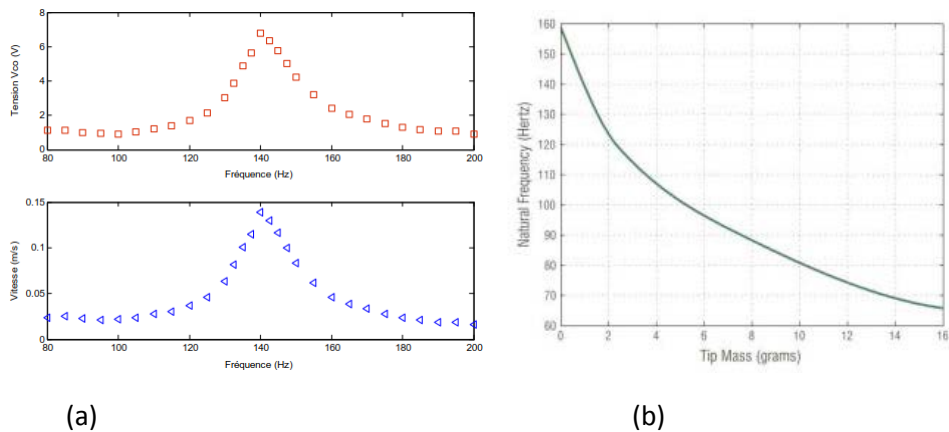


Figure 123. (a) Tension circuit-ouvert et vitesse à l'extrémité libre en fonction de la fréquence à accélération constante (0.5g), (b) Evolution de la fréquence de résonance en fonction de la masse sismique (extrait de [5])

### (a) Mesure de puissance

La seconde série de mesures effectuées consiste à mesurer la puissance récupérée en fonction de la fréquence et pour une accélération de 0.5g. Pour chaque fréquence la résistance optimale (R) est connectée à la sortie de l'élément piézoélectrique et la tension ( $V_{RMS\_AC}$ ) a ses bornes mesurées. La puissance générée a été déterminée à l'aide de la formule :

$$P_{RMS} = \frac{V_{RMS\_AC}^2}{R}$$

La Figure 124(a) donne les résultats de la manipulation. La puissance générée est maximale lorsque le système est à sa fréquence de résonance électromécanique, avec une puissance produite de 0.5mW. Par contre en dehors de la bande de fréquence 130Hz à 150Hz la puissance convertie est inférieure à 100μW.

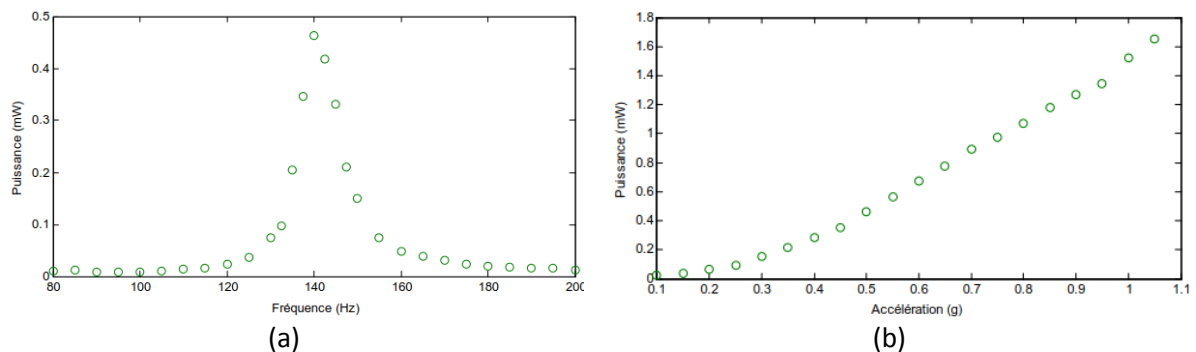


Figure 124. (a) Puissance en fonction de la fréquence à accélération constante (0.5g), (b) Puissance en fonction de l'accélération à la fréquence de résonance de 140Hz

Pour compléter la caractérisation du système, la puissance récupérée pour une résistance de charge optimale en fonction de l'accélération a été mesurée. Les données sont disponibles en Figure 124 (b). Il existe une dépendance quadratique entre l'accélération et la puissance récupérée.

La puissance produite pour 1g est de 1.5mW en prenant les informations fournies par Safran sachant que celles-ci sont sans doute optimistes, pour une accélération de 20g la puissance serait alors de 600 mW. Pendant les expériences menées au LGEF, il a été observé que le produit V20W ne peut pas supporter une excitation sinusoïdale d'amplitude supérieure à 6 à 8g qui est inférieure au gabarit de SAFRAN (Figure 106). Cette limite est liée au fait que des excitations supérieures induisent des

déformations plastiques de la poutre supérieures à la limite élastique. D'après les données du fabricant il ne faut pas dépasser une déflexion crête-crête de 2.3 mm. Lors de l'intégration sur la bielle, il faudra donc veiller à la mise en place de butées mécaniques pour limiter les débattements de la structure.

### (b) Caractérisation du V20W avec système de masse sismique

Les mesures se sont ensuite focalisées sur l'évolution des propriétés de conversion, lorsque la fréquence de résonance du système est adaptée pour être de 100Hz. Cette valeur de fréquence étant ressortie lors du dimensionnement du micro-générateur piézoélectrique. Pour cela, une masse sismique est ajoutée en bout de la poutre. Selon les informations disponibles dans la Figure 123, il faut rajouter une masse de 5 grammes. La photographie disponible en Figure 121 donne une vue du module V20W avec masse sismique montée.

Le principe de la manipulation consiste à mesurer la tension en circuit ouvert et la vitesse en bout de poutre en fonction de la fréquence pour une accélération constante. La Figure 125 fournit les résultats obtenus. Il est intéressant de noter que l'ajout de la masse sismique a permis de jouer tant sur la fréquence de résonance que sur la sélectivité du micro-générateur.

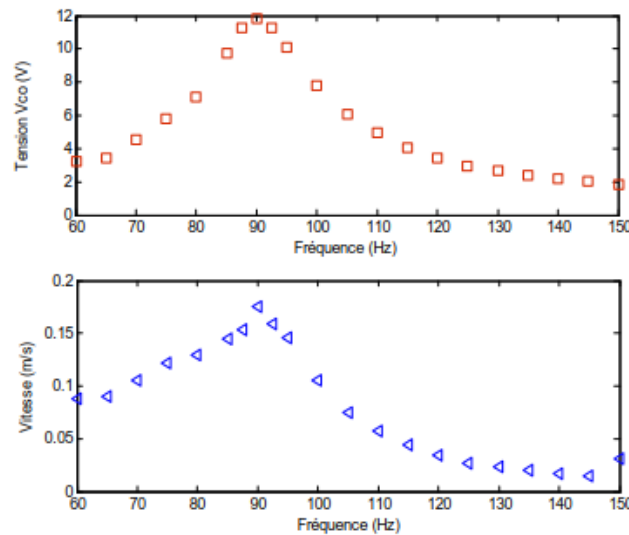


Figure 125. Tension circuit-ouvert et vitesse à l'extrémité libre en fonction de la fréquence à accélération constante (0.5g)

Afin de faciliter l'étape de conception des circuits de récupération d'énergie effectués par l'entreprise Oridao, un schéma équivalent du système est réalisé. En effet il est possible de représenter le micro-générateur au voisinage de sa fréquence de résonance par un circuit électrique équivalent. La forme la plus couramment adoptée est indiquée en Figure 126.

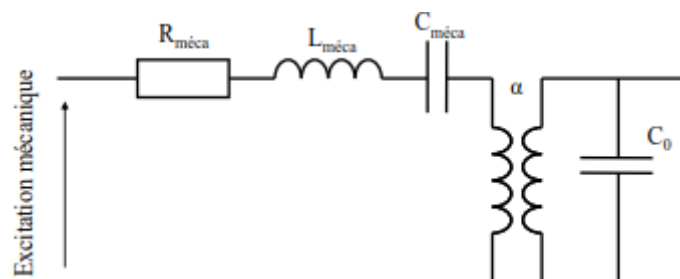


Figure 126. Schéma électrique équivalent au voisinage de la fréquence de résonance

La capacité  $C_0$  au secondaire du transformateur est la capacité de la céramique encastrée, autrement dit celle d'un condensateur dont le diélectrique supposé non piézoélectrique aurait la même

permittivité que la céramique. La branche au primaire du transformateur correspond à la partie motionnelle :

- Une self  $L_{meca}$  proportionnelle à la masse dynamique du système
- Une capacité  $C_{meca}$  proportionnelle à la raideur de la structure
- Une résistance  $R_{meca}$  qui traduit les pertes mécaniques

Le transformateur permet de modéliser la conversion d'énergie mécanique en électrique, avec le rapport de transformation  $\alpha$  (N/V). Pour identifier le système, le protocole suivant est réalisé lorsque le système est excité à l'aide d'un pot vibrant :

- Mesure de la fréquence de résonance en court-circuit ( $f_E$ ) et circuit ouvert ( $f_D$ )
- Mesure du coefficient de qualité mécanique  $QM = f_r / \Delta f$ , avec  $f_r$  la fréquence de résonance et  $\Delta f$  correspond à la largeur de la bande à -3dB.
- Mesure du coefficient  $\lambda$  (V/m) de proportionnalité entre la tension en circuit ouvert et le déplacement à l'extrémité libre de la poutre à la fréquence de résonance
- Mesure au pont d'impédance de la capacité  $C_0$ .

A partir de ces mesures les paramètres mécaniques de la structure sont extraits à l'aide des formules suivantes, où  $K_E$ ,  $M$  et  $C$  représentent respectivement la raideur du système,  $M$  la masse dynamique,  $C$  coefficient d'amortissement.

$$\alpha = \lambda C_0$$

$$K_E = \alpha \lambda \frac{f_D^2}{f_D^2 - f_E^2}$$

$$M = \frac{K_E}{4\pi^2 f_E^2}$$

$$C = \frac{2\pi M f_D}{Q_M}$$

Pour obtenir les valeurs du schéma électrique équivalent, il suffit d'utiliser les relations disponibles dans le Tableau 8. Le Tableau 8 fournit aussi les valeurs des paramètres ainsi identifiés.

Electrique	Relation	Valeur	Unité SI des grandeurs électriques
$R_{meca}$	$R_{meca} = \frac{1}{Q_m} \sqrt{\frac{L_{meca}}{C_{meca}}}$	0.69	$\Omega$
$L_{meca}$	$L_{meca} = M = \frac{K_E}{4\pi^2 f_E^2}$	$9.28 \cdot 10^{-3}$	H
$C_{meca}$	$C_{meca} = \frac{1}{K_E} = \frac{f_D^2 - f_E^2}{\alpha \lambda f_E^2}$	$2.81 \cdot 10^{-4}$	F
$\alpha$	$\alpha = \lambda C_0$	$2.11 \cdot 10^{-3}$	N/V
$C_0$	$C_0$	32	nF

Tableau 8. Paramètres du modèle de la structure V20W

Les mesures de la puissance en fonction de la fréquence, pour une accélération constante sur charge adaptée, sont disponibles en Figure 127 a. Lorsque le système travail a sa fréquence de résonance, une puissance de 1.2 mW est produite, correspondant aux données de chez Volture.

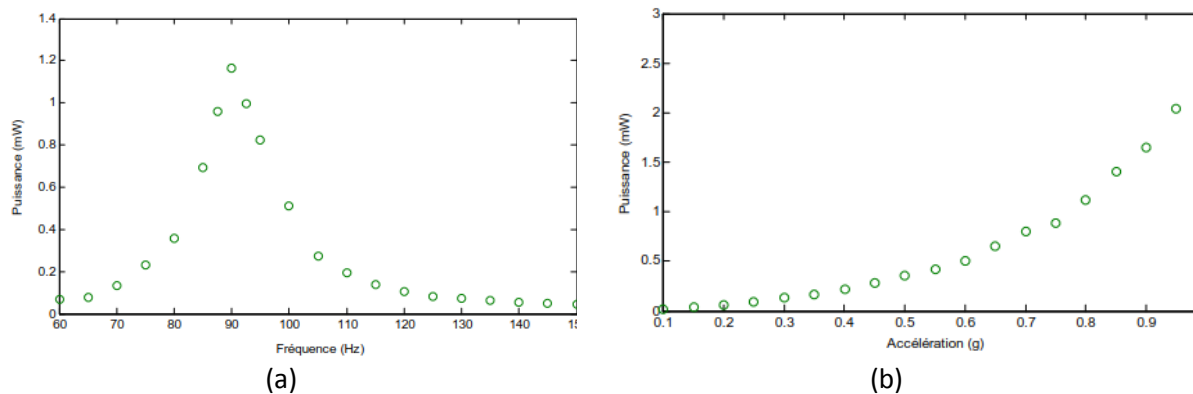


Figure 127. (a) Puissance en fonction de fréquence à accélération constante (0.5g), (b) Puissance en fonction d'accélération à fréquence résonance de 140Hz

La puissance en fonction de l'accélération a été mesurée (Figure 127 b), une dépendance quadratique entre les deux grandeurs physiques est notée en cohérence avec la théorie.

#### Synthèse des mesures à température ambiante

L'ensemble des expériences réalisées à l'échelle du laboratoire ont montré que la puissance récupérée pour un module V20W de chez Volture est de 3mW, permettant donc le fonctionnement du système de mesure développé par Oridao. Afin de garantir un fonctionnement du système, il semble nécessaire d'intégrer au minimum deux micro-générateurs piézoélectriques afin d'avoir une marge de sécurité.

#### Caractérisation du système en fonction de la température

Le système de récupération d'énergie va être intégré dans un environnement avec des températures évoluant de 80°C à 150°C. Il est donc nécessaire d'analyser le comportement du module V20W dans cette gamme de température. Les modules de chez Volture sont vendus pour fonctionner jusqu'à 90°C. Cette limitation en température est induite par la présence du connecteur électrique en bleu (Figure 128). Dans le but de pouvoir monter plus haut en température, cette structure est supprimée, comme le montre la Figure 128. D'après les données techniques, il est alors possible de monter jusqu'à une température de 150°C.

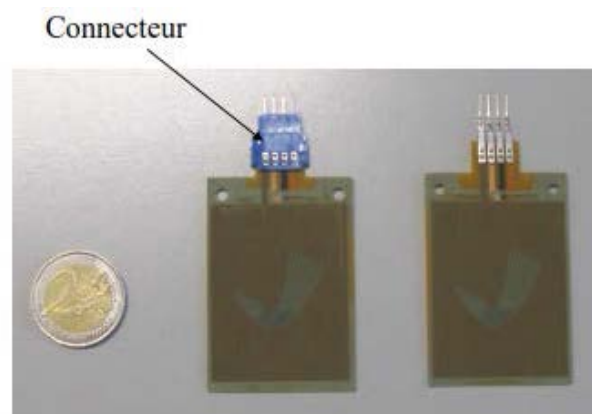


Figure 128. Module V20W avec et sans connecteur électrique

Les données présentées en Figure 129 (a) montrent une certaine indépendance des coefficients de couplage ( $k$ ) et de qualité ( $Q_m$ ) en fonction de la température. Ce phénomène est intéressant car il

démontre la possibilité de convertir de l'énergie mécanique en électrique dans un environnement sévère en termes de température correspondant à l'application visée par le projet. Par contre pour les températures supérieures à 100°C,  $Q_m$  diminue sans à cause de la dilatation du support.

Dans l'objectif de connaître les propriétés de récupération d'énergie du produit V20W de chez Volture, le produit  $k^2Q_m$  est tracé en fonction de la température (Figure 129 b). Les meilleurs résultats obtenus pour le produit  $k^2Q$  sont de 0.33, justifiant ainsi l'utilisation de technique non-linéaire afin d'augmenter les propriétés de conversion du micro-générateur piézoélectrique. En effet A. Badel [6] et M. Lallart [7] dans leurs travaux de thèse, ont montré que les performances des techniques SSH sont toujours supérieures à celles de la technique classique et que le gain apporté par les techniques SSH est d'autant plus important que le produit  $k^2Q$  est faible.

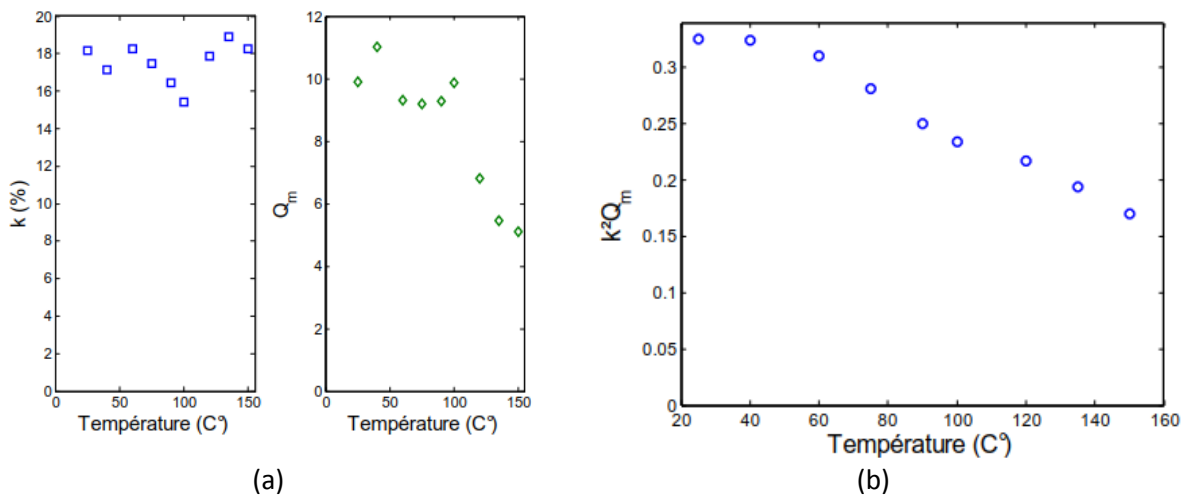


Figure 129. (a) Evolution du coefficient de couplage  $k$  et de qualité  $Q_m$  en fonction de la température, (b) Evolution du produit  $k^2Q_m$  en fonction de la température pour le produit de chez Volture

### 1.3.7. Architecture électronique du microgénérateur mécanique

Le type d'architecture et l'élément piézoélectrique étant sélectionnés, ce paragraphe est consacré à la conception de la carte électronique. Le schéma bloc est présenté en Figure 130, il s'agit d'une architecture classique en six blocs de bases :

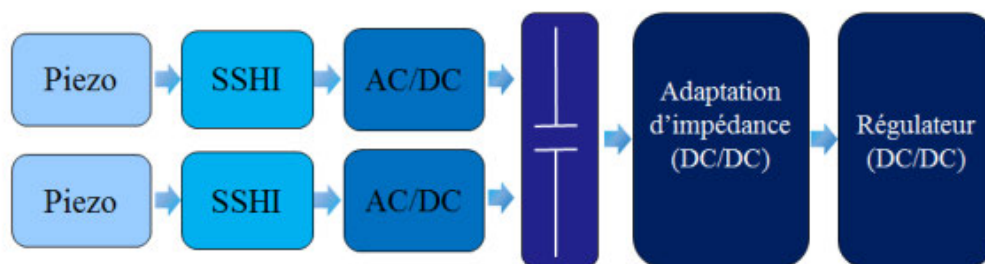


Figure 130. Schéma bloc de la carte de conversion pour les éléments piézoélectrique

- 1 Système piézoélectrique, structure assurant la conversion d'énergie mécanique en électrique.
- 2 SSHI, étage électronique assurant une optimisation de la conversion.
- 3 Module AC/DC, pont de diode permettant d'avoir un signal redressé.

- 4 Capacité de filtrage, pour obtenir une tension continue. Le condensateur empêche les variations brutales de tension.
- 5 Convertisseur DC/DC, jouant le rôle d'adaptation d'impédance, permettant de maximiser le transfert d'énergie entre une source et une charge
- 6 Régulateur de tension, afin de fournir une alimentation constante au circuit électronique, pour éviter par exemple les remises à zéro du microcontrôleur.

La Figure 131 donne les schémas électroniques des différents étages de la carte de conversion réalisée. Il est intéressant de noter que la fonction d'adaptation d'impédance est réalisée par un convertisseur de type buck-boost commandé avec une fréquence et rapport cyclique fixe. Contrairement à la solution mise en œuvre sur le premier prototype utilisant un composant de type « Touchstone » TS3003 pour générer la commande de l'étage buck-boost. Le composant LTC6962 a été utilisé car il peut fonctionner sur une large gamme de température, par contre il consomme bien plus d'énergie que la solution initiale. La fonction de régulation de la tension est assurée par le composant LTC 3388, un hacheur de type élévateur. Pour les switches autoalimentés nécessaires au fonctionnement des techniques SSHI, leurs structures correspondent à l'architecture classique proposée au paragraphe 1.3.5.1.

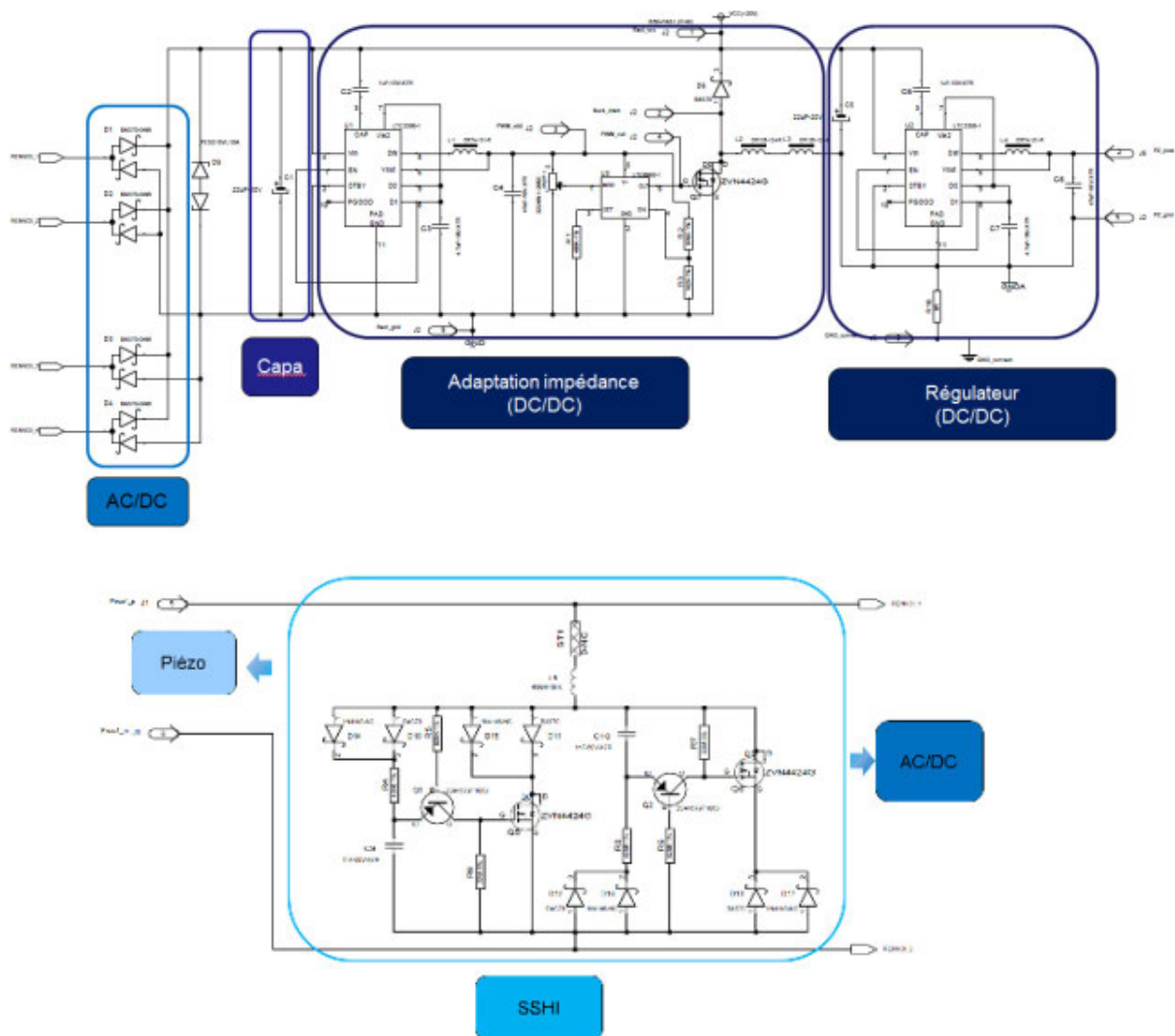


Figure 131. Schéma électronique de la carte de conversion développée par Oridao et le LGEF

Les mesures effectuées sur le tag RFID, ont montré que la puissance évoluait entre 2.88mW à température ambiante et 4mW pour une température de 125°C. D'où la nécessité d'avoir deux

modules V20W pour garantir un fonctionnement pour une accélération de 1g à 100Hz. Dans le but de réduire l'encombrement de la structure afin de pouvoir s'intégrer facilement dans l'environnement de la nacelle. Les éléments piézoélectriques ont été superposés, comme l'illustre la Figure 132.

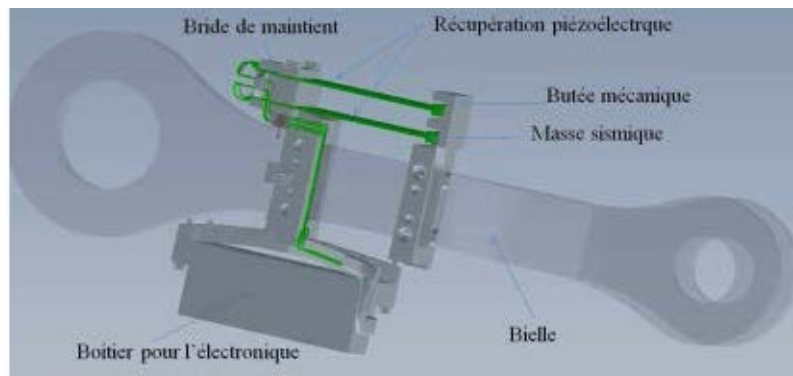


Figure 132. Structure superposée de microgénérateurs piézoélectriques

Pour remonter au rendement de la carte de conversion, les mesures de la puissance disponible en sortie de l'élément piézoélectrique en fonction de l'accélération avec et sans technique non-linéaire ont été effectuées selon un protocole défini dans le précédent paragraphe.

La Figure 133 donne l'évolution de la puissance produite par un élément en fonction de l'accélération. Pour les essais une masse sismique de 5 grammes a été ajoutée afin d'ajuster la fréquence résonance du système à environ 100Hz. Il existe une dépendance quadratique entre la puissance générée et l'accélération. En combinant les deux modules piézoélectriques, la puissance de sortie pour une accélération de 1 g atteint 6mW, correspondant bien aux spécifications disponibles dans la documentation du fabricant, à savoir 3mW pour 1g à 95Hz. La puissance en sortie est bien supérieure au besoin du module, permettant donc d'envisager une auto-alimentation du dispositif.

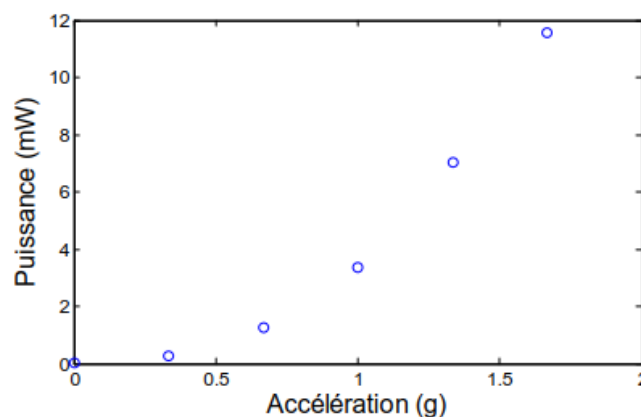


Figure 133. Puissance en fonction de l'accélération pour un étage

Toujours dans l'objectif de remonter au rendement de la carte de conversion et de déterminer la plage de fonctionnement en fonction de l'excitation mécanique, des mesures avec les techniques non-linéaires ont été effectuées.

La Figure 134(a) donne l'évolution de la puissance en fonction de l'accélération avec et sans technique SSHI. Le ratio entre les deux méthodes est en moyenne de 1.4. Il est intéressant de remarquer que pour des accélérations importantes, le gain apporté par les techniques SSHI est élevé. Cela est logique, car pour les faibles amplitudes d'accélérations, la puissance générée par l'élément piézoélectrique est faible et une partie de cette énergie est nécessaire pour faire fonctionner le switch. La consommation

du switch restant ensuite constante avec l'accélération, le gain devient alors plus important sachant qu'il y a plus d'énergie disponible. La Figure 134b donne l'évolution temporelle de la tension en sortie du switch en et de l'accélération démontrant un bon fonctionnement du système, avec des allures proches de la théorie. Au vue des niveaux de puissances générées, l'alimentation du système à partir d'énergie vibratoire semble possible.

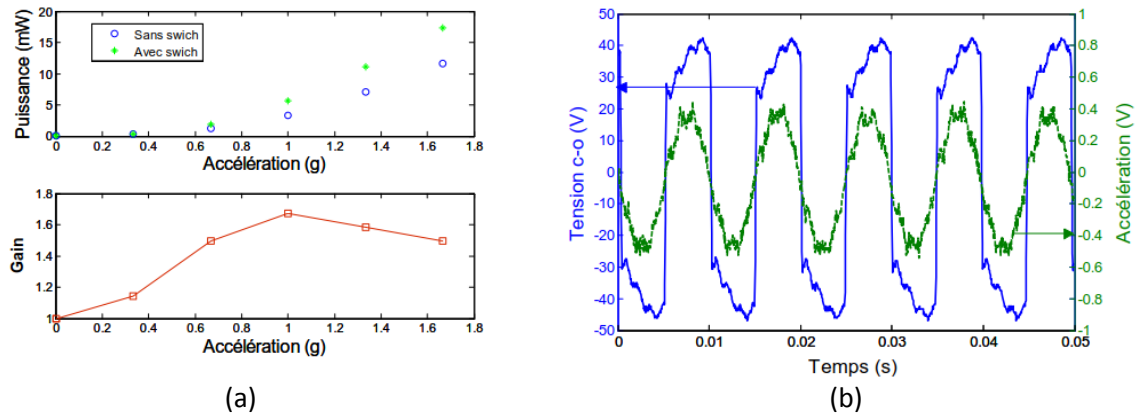


Figure 134. (a) Puissance en fonction de l'accélération avec et sans technique SSHI pour un étage, (b) Evolution temporelle de la tension et de l'accélération avec la méthode SSHI

Les mesures préliminaires en vue de l'intégration de la carte sur la bielle, ont permis de valider les aspects standards :

- Le fonctionnement de la carte de conversion est possible à partir d'une accélération de 1g à 100 Hz
- Le rendement ainsi que la plage de fonctionnement peuvent être augmentés grâce à l'utilisation des techniques SSHI

### 1.3.8. Module de récupération thermoélectrique

Ce paragraphe présente les travaux réalisés pour l'intégration d'un thermogénérateur récupérant l'énergie thermique. Pour dimensionner de façon appropriée le dispositif, il est nécessaire d'étudier globalement le système. Les contraintes électriques et thermiques liées au matériau, à la conception du module et à son environnement sont interdépendantes, et demandent une étude spécifique pour la conception du microgénérateur selon le type de transfert thermique considéré (température imposée ou puissance thermique imposée).

Les deux principaux effets thermoélectriques notables pour un matériau conducteur ou semi-conducteur sont l'effet Seebeck et l'effet Peltier [2]. L'effet Seebeck permet de convertir une énergie thermique en énergie électrique, et l'effet Peltier l'énergie électrique en flux de chaleur. Dans le cadre de cette étude sur les systèmes auto-alimentés, seule la génération d'énergie par effet Seebeck sera réalisée.

#### 1.3.8.1. Transducteur thermoélectrique

L'effet Seebeck consiste en la création d'une différence de potentiel aux extrémités d'un conducteur ou semi-conducteur lorsque celui-ci est soumis à un gradient de température. Les porteurs de charge (électrons ou trous) diffusent alors du point chaud vers le point froid et génèrent un champ électrique interne  $E$  (V/m) qui s'oppose à cette diffusion (Figure 135). L'effet thermoélectrique d'un matériau est caractérisé par son coefficient de Seebeck ( $S$  (V/K)). Ce coefficient quantifie la tension générée pour un gradient de température ( $\Delta T$  (K)) de 1°K entre deux points [3], [4] :



$$\bar{E} = S \frac{\partial T}{\partial \bar{r}} \quad (1)$$

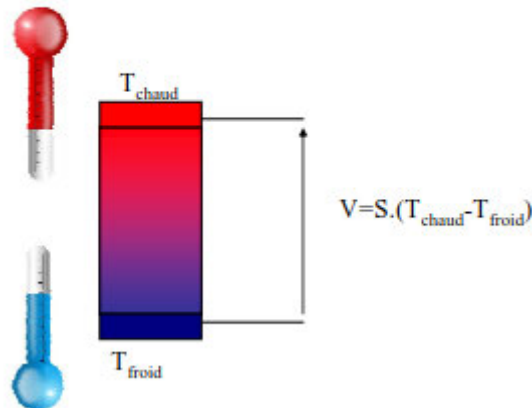


Figure 135. Principe de l'effet Seebeck

En intégrant l'équation (1)

$$\Delta V = S \cdot (T_{chaud} - T_{froid}) = S \cdot \Delta T \quad (2)$$

Où  $\Delta V$  est la différence de potentiel mesurée (V),  $S$  est le coefficient de Seebeck du matériau thermoélectrique (V/K),  $T_{chaud}$  et  $T_{froid}$  sont respectivement la température de la jonction chaude et de la jonction froide (Figure 1). Cette équation est valide uniquement si la variation de température est suffisamment faible pour pouvoir négliger la dépendance en température du coefficient de Seebeck.

Un générateur thermoélectrique simplifié consiste en un thermocouple élaboré à partir d'une jonction entre deux éléments thermoélectriques semi-conducteurs de type n et p (Figure 136). Le rendement de conversion ( $\eta$ ) de ce générateur est donné par le ratio entre la puissance électrique produite par le dispositif ( $P_{elec}$ ) et la puissance thermique émise par la source chaude ( $Q_{chaud}$ ) [5] :

$$\eta = \frac{P_{elec}}{Q_{chaud}} \quad (3)$$

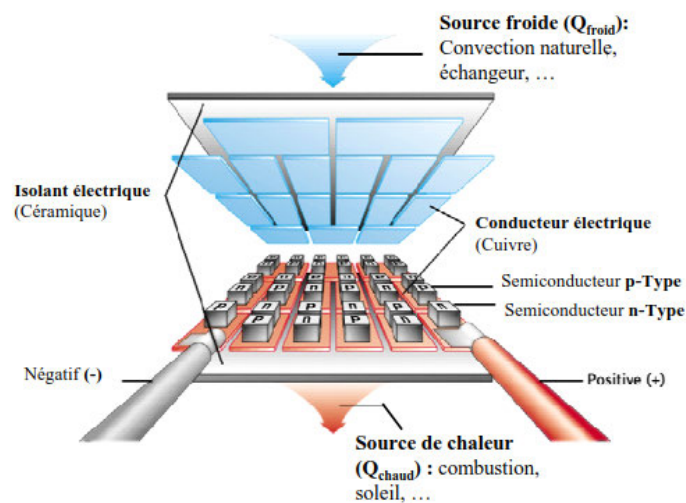


Figure 136. Illustration d'un générateur thermoélectrique formé de jonction p-n de semi-conducteur

En supposant que la conductivité électrique, la conductivité thermique et le coefficient Seebeck des éléments thermoélectriques sont constants et que les résistances de contacts sont négligeables, la puissance électrique est donnée par :

$$P_{elec} = R_C \cdot I^2 \quad (4)$$

Et le courant (I) par :

$$I = \frac{(S_n - S_p) \cdot (T_{chaud} - T_{froid})}{R_n + R_p + R_c} = \frac{S_{np} \cdot (T_{chaud} - T_{froid})}{R_n + R_p + R_c} \quad (5)$$

$R_n$ ,  $R_p$ , et  $R_c$  étant respectivement les résistances électriques des éléments thermoélectriques n, p et la résistance de charge du système et  $S_n$  et  $S_p$  les coefficients Seebeck des éléments n et p. La puissance électrique disponible dans le générateur thermoélectrique est alors de :

$$P_{elec} = R_C \left( \frac{S_{np} \cdot (T_{chaud} - T_{froid})}{R_n + R_p + R_c} \right)^2 \quad (6)$$

La puissance thermique ( $Q_c$ ) au niveau de la source chaude est égale à la somme de la puissance thermique absorbée par effet Peltier côté chaud ( $Q_p$ ), de la puissance thermique transmise par conduction dans le dispositif thermoélectrique ( $Q_\lambda$ ) et de la chaleur perdue par effet Joule dans les thermoéléments côté chaud ( $P_j$ ) [4] :

$$Q_c = Q_\lambda + Q_p - P_j \quad (7)$$

Avec  $Q_\lambda = (K_n + K_p) \cdot (T_{chaud} - T_{froid})$ ,  $Q_p = T_{chaud} \cdot S_{np} \cdot I$  et  $P_j = \frac{1}{2} (R_n + R_p + R_c) I^2$

$K_n$  et  $K_p$  sont respectivement les conductances thermiques des matériaux n et p. Le rendement de conversion défini par l'équation (3) s'exprime sous la forme :

$$\eta = \frac{R_C \left( \frac{S_{np} \cdot (T_{chaud} - T_{froid})}{R_n + R_p + R_c} \right)^2}{T_{chaud} \cdot S_{np} \cdot I + (K_n + K_p) \cdot (T_{chaud} - T_{froid}) - \frac{1}{2} (R_n + R_p + R_c) I^2} \quad (8)$$

Il est possible d'introduire le coefficient de mérite ( $Z_{np}$ ) du couple n/p :

$$Z_{np} = \frac{S_{np}^2}{(K_n + K_p) \cdot (R_n + R_p)} \quad (9)$$

Le coefficient  $Z_{np}$  ( $K^{-1}$ ) fournit une information quantitative sur les caractéristiques thermoélectriques du matériau. Dans la pratique, c'est le facteur de mérite adimensionnel ZT qui est utilisé pour quantifier sur les performances globales des matériaux thermoélectriques [6] :

$$Z_i T_i = \frac{\sigma_i S_i^2}{\lambda_i} T_i \quad (10)$$

$Z_i$ ,  $\sigma_i$ ,  $S_i$ ,  $\lambda_i$  et  $T_i$  sont respectivement le coefficient de mérite, la conductivité électrique, le coefficient de Seebeck, la conductivité thermique et la température du matériau thermoélectrique i. Le rendement de conversion devient alors :

$$\eta = \frac{T_{chaud} - T_{froid}}{T_{chaud}} \frac{\frac{R_c}{R_n + R_p}}{\frac{R_c}{R_n + R_p} + 1 + \frac{\left( \frac{R_c}{R_n + R_p} + 1 \right)^2}{Z_{np} \cdot T_{chaud}} \frac{T_{chaud} - T_{froid}}{2 \cdot T_{chaud}}} \quad (11)$$

Dans l'équation (11), le premier terme correspond au rendement de Carnot et le second terme dépend uniquement d'effets irréversibles dus au matériau thermoélectrique (effets Joule et Peltier). Le

rendement de conversion d'un module thermoélectrique dépend donc fortement du facteur de mérite ( $Z_{np}$ ) du matériau thermoélectrique utilisé (équation (11)). Or l'équation (9) montre que le facteur de mérite est lié à la géométrie du module, et que  $Z_{np}$  est maximisé lorsque le produit  $(R_n+R_p) \times (K_n+K_p)$  est minimum. Cette condition est obtenue pour :

$$\frac{a_n}{a_p} = \sqrt{\frac{\rho_n \cdot \lambda_n}{\rho_p \cdot \lambda_p}} \quad (12)$$

Avec  $a_i$ ,  $\rho_i$ , et  $\lambda_i$  sont respectivement la section, la conductivité thermique et la conductivité électrique de l'élément thermoélectrique  $i$ . Dans ces conditions le coefficient de mérite  $Z_{np}$  s'exprime sous la forme :

$$Z_{np} = \frac{S_{np}^2}{(\sqrt{\rho_n \cdot \lambda_n} + \sqrt{\rho_p \cdot \lambda_p})^2} \quad (13)$$

Le rendement de la conversion thermoélectrique est maximal pour :

$$\frac{d\eta}{dR_c} = 0 \quad (14)$$

Après dérivation de l'expression (11), la solution est :

$$r_0 = \sqrt{1 + Z_{np} \cdot T_m} \quad (15) \text{ où } T_m = \frac{T_{chaud} + T_{froid}}{2}$$

Le rendement de conversion maximale d'un module thermoélectrique est défini par :

$$\eta = \frac{T_{chaud} - T_{froid}}{T_{chaud}} \cdot \frac{\sqrt{1 + Z_{np} \cdot T_m} - 1}{\sqrt{1 + Z_{np} \cdot T_m} + \frac{T_{chaud}}{T_{froid}}} \quad (16)$$

La Figure 137(a) représente le rendement de la conversion thermoélectrique en fonction du gradient de température pour différentes valeurs du coefficient de mérite ( $Z_{np}$ ). Le rendement de Carnot est illustré dans la Figure 137(b).

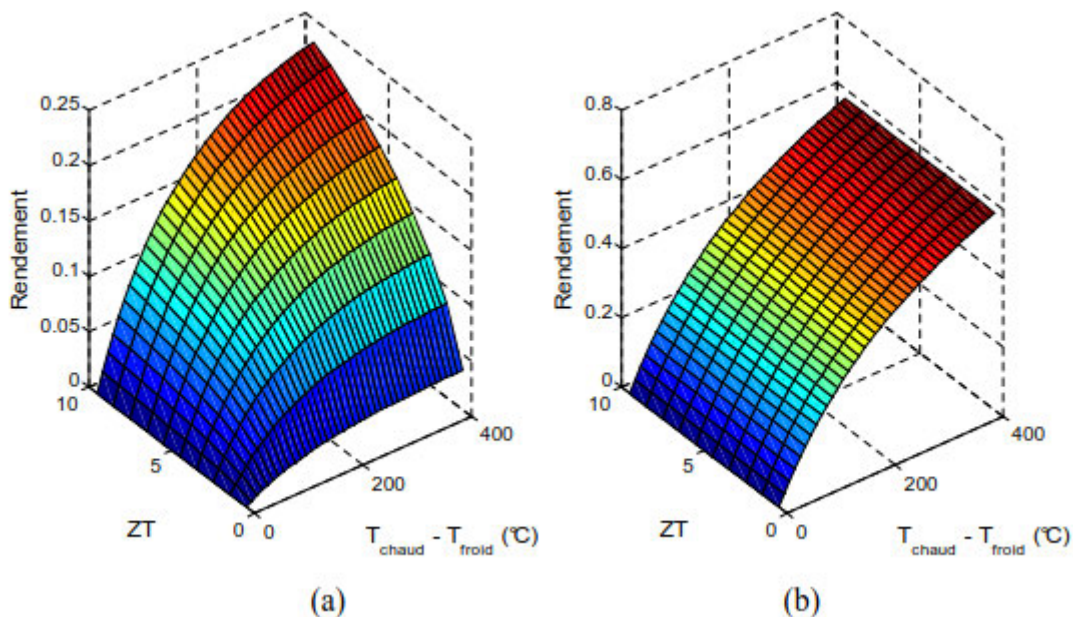


Figure 137. Evolution du rendement en fonction de la température chaude et du coefficient  $ZT$  pour une température froide de 25°C (a). Rendement de la conversion thermoélectrique (b). Rendement de Carnot

La Figure 137(b) démontre qu'une augmentation du facteur de mérite et du gradient de température entraîne une augmentation du rendement de conversion. Ceci illustre l'importance de travailler avec des différences de température importante et des ZT élevés.

#### Puissance électrique générée pour un thermogénérateur

Un convertisseur thermoélectrique est présenté en Figure 138, usuellement appelé module thermoélectrique, celui-ci est constitué de N couples de thermoéléments semi-conducteurs de type n et p disposés thermiquement en parallèle. Les éléments sont reliés électriquement en série par des bandes métalliques conductrices et encastrés entre des plaques électriquement isolantes et thermiquement conductrices.

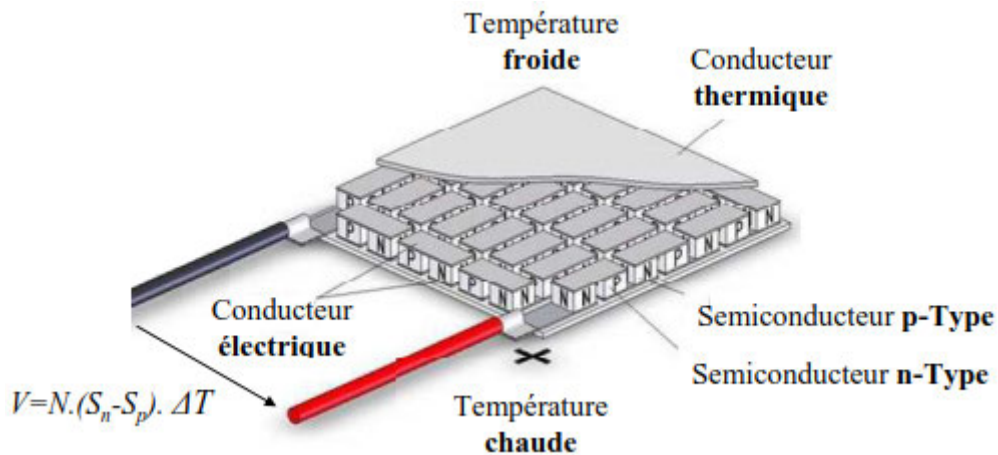


Figure 138. Configuration classique d'un générateur thermoélectrique

Un générateur thermoélectrique peut être représenté pour le schéma électrique de la Figure 139. La puissance électrique maximale délivrée par le générateur lorsque  $R_c = R_{int}$ , donc lorsque la résistance de charge est égale à la résistance interne du module thermoélectrique. La puissance électrique maximale délivrée par un générateur thermoélectrique est alors de :

$$P_{elec} = \frac{V_{seebeck}^2}{4.R_{int}} = \frac{N.S_{np}.\Delta T}{4.N.(R_n + R_p)} \quad (17)$$

Avec N le nombre d'éléments semi-conducteurs et  $\Delta T$  la différence entre la température chaude et la température froide. D'après l'équation (17) et en ne tenant pas compte des interactions thermiques avec l'environnement du dispositif ( $\Delta T$  imposé entre les deux surfaces), il semble souhaitable d'augmenter la densité d'éléments thermoélectriques (N) et de diminuer la résistance interne du dispositif, par exemple en diminuant la hauteur des éléments (H), pour maximiser la puissance produite. Par ailleurs il est aisé de montrer que la puissance électrique ( $P_{elec}$ ) est aussi proportionnelle au taux d'occupation des éléments thermoélectriques ( $t_x$ ) [7] :

$$t_x = \frac{2.N.A_{np}}{A_{TG}} \quad (18)$$

Avec  $A_{np}$  et  $A_{TG}$  représente respectivement la section des éléments thermoélectriques et la surface du module thermoélectrique.

Pour un même taux d'occupation, il est possible de concevoir des modules thermoélectriques équivalents avec des géométries différentes. Ainsi, en diminuant la section des éléments et en augmentant proportionnellement leur nombre, il est possible d'obtenir un générateur produisant une plus grande tension de sortie pour une même puissance électrique. Or, dans les cas des systèmes autoalimentés, le facteur limitant des systèmes thermoélectriques est souvent leur faible tension de

sortie pour des faibles gradients de température. Dans l'absolu, dans le cas de la récupération d'énergie, il serait préférable de travailler avec un grand nombre d'éléments de faible section, afin d'augmenter la tension de sortie.

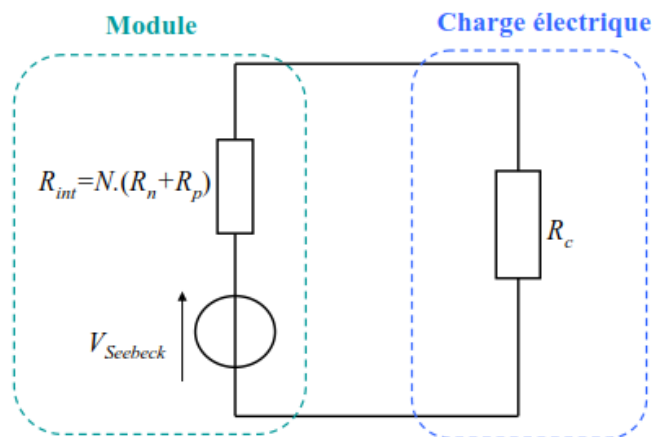


Figure 139. Schéma électrique équivalent d'un module thermoélectrique

Les modules thermoélectriques couches minces sont compatibles avec les technologies de type MEMS et offrent une forte densité d'éléments thermoélectriques par unité de surface. Les trois principaux acteurs dans ce domaine sont Nextreme, Micropelt et Infineon. Le Tableau 9 recense les principaux acteurs commerciaux qui développent des modules thermoélectriques pour la récupération d'énergie.

Entreprise	Provenance	Applications
Hi-Z	USA	Module Peltier
Micropelt	Allemagne	Récupération d'énergie
Taihuaxing	Chine	Module Peltier
Nextrem	USA	Module Peltier et récupération d'énergie
Komatsu	Japon	Module Peltier
Infineon	Europe	Module Peltier et récupération d'énergie

Tableau 9. Principaux acteurs commerciaux dans le marché des modules thermoélectriques.

### Conclusion sur la conversion thermoélectrique

Les paragraphes précédents ont introduit le principe de la conversion d'énergie à l'aide d'éléments thermoélectriques. La prochaine partie du rapport consiste à expliquer les principales contraintes existantes autour de l'application de cette méthode de récupération d'énergie dans le cas de l'application du projet.


Pour dimensionner de façon appropriée un dispositif thermoélectrique en vue d'une application donnée, il est nécessaire d'étudier globalement le système. Les contraintes électriques et thermiques liées au matériau, à la conception du module et à son environnement sont interdépendantes demandant une étude spécifique pour la conception d'un micro-générateur, selon le type de transfert thermique (température imposée ou puissance thermique imposée). Dans un premier temps les contraintes thermiques et électriques dans un contexte général seront introduites. Puis l'étude se focalisera sur la phase de dimensionnement à proprement parlé.

### 1.3.7.2. Sélection du transducteur et caractérisation

La caractérisation de l'énergie ambiante a permis de mettre en avant le comportement thermique de la bielle instrumentée. Il est ressorti que les gradients thermiques aux bornes du module étaient relativement faibles. L'objectif de cette partie est d'étudier les caractéristiques du module thermoélectrique de chez Nextrem à savoir le HV56 qui sera utilisé pour la génération d'énergie. Pour cela plusieurs séries de tests et de mesures seront effectuées à l'échelle laboratoire.

#### Module Nextrem HV56

Il est ressorti que les solutions de chez Micropelt et Nextrem, possédaient les meilleures densités de puissances. Le choix s'est orienté pour les produits de Nextrem, en raison d'une gamme de tenue en température plus importante. Le HV56 a été sélectionné parmi les produits de chez Nextrem, en raison de son faible encombrement et de ses propriétés de conversion (Figure 140). D'après l'extrait de la documentation constructeur disponible en Figure 140, il semble que la température froide du module ne doit pas dépasser 50°C. Après discussion avec le fabricant il est ressorti que le module pouvait fonctionner avec une température froide allant jusqu'à 150°C.



Operating Range			
Hot Side Temperature	$T_{hot}$	25-200°C	298-473K
Cold Side Temperature	$T_{cold}$	0-50°C	273-323K
Delta T	$\Delta T$	10-200°C	10-200K
Maximum Mean Temperature	$T_{m,max}$	150°C	423K
Thermal Parameters			
Thermal Resistance	R	13.1 K/W	
Thermal Conductance	K	0.076 W/K	

Figure 140. Vue et propriétés du module thermoélectrique eTEG HV56 de chez Nextrem

Dans le but de correspondre au design typique d'un module thermoélectrique, le système est équipé d'un dissipateur thermique comme l'illustre la Figure 141.

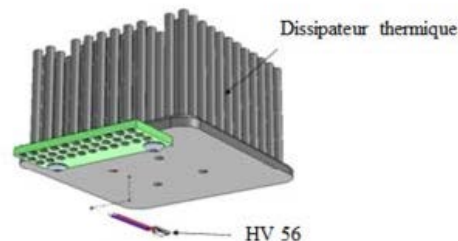


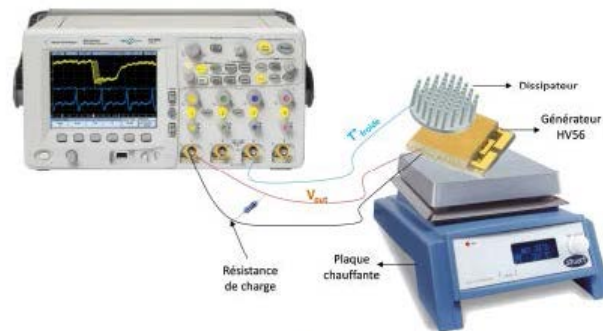
Figure 141. Architecture du module de test

#### Protocole de caractérisation du module HV-56

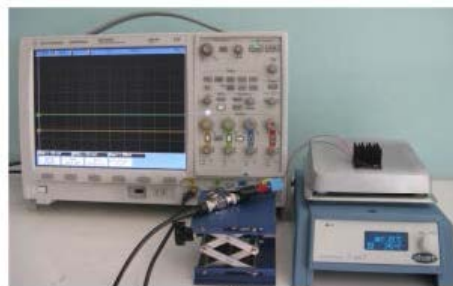
La première série de mesure consiste à vérifier le fonctionnement du module HV56 dans des conditions typiques de fonctionnement, afin de comparer les informations par rapports aux données constructeurs, disponibles au lien ([http://www.nextreme.com/pages/power\\_gen/eteg\\_hv56.shtml](http://www.nextreme.com/pages/power_gen/eteg_hv56.shtml)).

Pour cela le banc de test présenté en Figure 142.a a été développé. Le principe de fonctionnement est le suivant un côté du module est maintenu à une température chaude à l'aide de la plaque chauffante Stuart SD160, permettant de contrôler la température chaude à 1°C. La tension générée par le module thermoélectrique est directement visualisée sur un oscilloscope. La température en deux points de la structure (surface chaude et froide) est contrôlée à l'aide de thermocouples et de conditionneurs (Fluke 80TK). L'ensemble des données sont visualisées sur un oscilloscope (Agilent DS0 6054A Mega

Zoom). Les mesures sont effectuées à température ambiante (25°C). La Figure 142.b montre une photographie du montage.



(a)



(b)

Figure 142. Principe de la mesure à l'aide d'une plaque chauffante

### Résultats et discussions pour les essais à température ambiante

Pour vérifier le bon fonctionnement du prototype de la Figure 142, la tension en circuit ouvert ainsi en fonction du gradient entre la source chaude et froide est mesurée. Les mesures sont réalisées en régime permanent une fois que les températures aux bornes du module se sont stabilisées. La Figure 143, donne l'évolution de la tension en circuit ouvert du module en fonction du gradient de température (correspondant à la différence entre la température du collier et du dissipateur). La variation du gradient a été obtenue en faisant varier la température de la source chaude donc de la plaque chauffante.

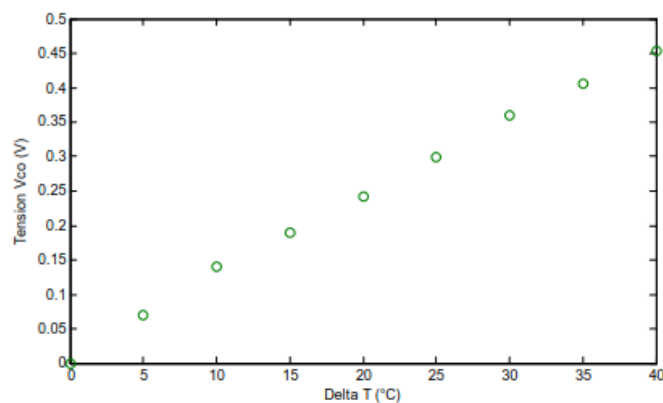


Figure 143. Tension en circuit ouvert en fonction du gradient thermique, mesure réalisée pour une température ambiante de 25°C

Une dépendance linéaire existe entre la tension en circuit ouvert et le gradient thermique aux bornes du module thermoélectrique. Cette observation correspond bien aux équations théoriques de la thermoélectricité à savoir :  $\Delta V = S \cdot (T_{chaud} - T_{froid}) = S \cdot \Delta T$

Où  $\Delta V$  est la différence de potentiel mesurée (V),  $S$  est le coefficient de Seebeck module thermoélectrique (V/K),  $T_{chaud}$  et  $T_{froid}$  sont respectivement la température chaude et froide de la structure. Cette équation est valide uniquement si la variation de température est suffisamment faible pour pouvoir négliger la dépendance en température du coefficient de Seebeck, et correspond au cas des mesures réalisées.

Le coefficient directeur de la droite correspond au coefficient de Seebeck du module qui vaut d'après les mesures 12 mV/K et la documentation constructeur 25mV/K (Figure 144). Il existe un facteur 2 entre les valeurs constructeur et mesurée au laboratoire. Après discussion avec le fabricant Nextrem il s'est avéré qu'une dispersion existait sur leur module (typiquement 20% à 30%). Mais aussi que pour leur caractérisation leur module était placé de façon verticale favorisant la circulation du flux thermique.



Figure 144. Données constructeur des propriétés thermoélectriques du module HV-56

Pour compléter la caractérisation du module une mesure de la puissance récupérée en fonction du gradient thermique a été réalisée pour une résistance de charge adaptée, les résultats sont donnés en Figure 15. La puissance ( $P_{RMS}$ ) est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$P_{RMS} = \frac{V_{RMS}^2}{R_{charge}}$$

Avec  $V_{RMS}$  la tension efficace mesurée aux bornes de la résistance ( $R_{charge}$ ). La résistance de charge a été choisie pour correspondre à la puissance maximale ( $P_{max}$ ) à savoir lorsque  $R_{charge} = R_{module}$  est égale à :

$$P_{max} = \frac{(S \cdot \Delta T)^2}{4 \cdot R_{module}}$$

Dans cette équation  $S \cdot \Delta T$  correspond à la tension en circuit ouvert.

Une dépendance quadratique de la puissance avec le gradient thermique est observée comme la laissait présager la théorie. De plus les niveaux puissance disponible sont en-dessous des indications constructeurs (Figure 144) d'un facteur 4, correspondant à la dispersion des modules la position du module thermoélectrique. Le tag RFID pour fonctionner à besoin d'une tension en entrée comprise entre de 2V et 3V. Or, le coefficient de Seebeck global du HV-56, se situe généralement 15mV/K, soit une tension en charge de 100mV pour un gradient de 15°C. Un convertisseur DC/DC est donc nécessaire afin d'obtenir des niveaux compatibles de tension pour garantir le fonctionnement du système.



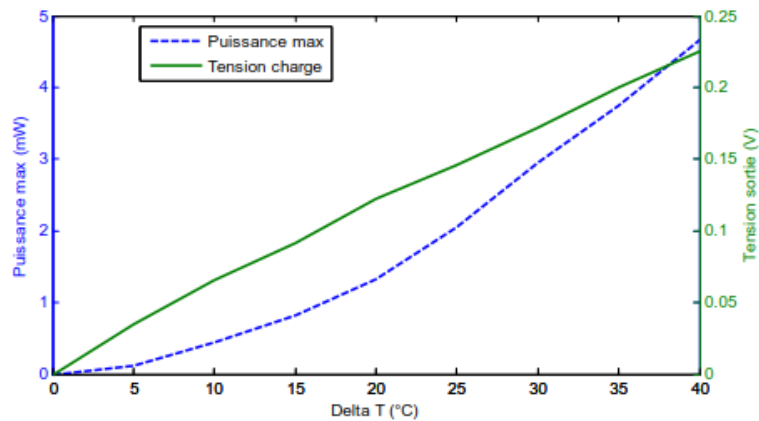


Figure 145. Puissance et tension en fonction du gradient thermique pour une température ambiante de 25°C

Au vue de l'état de l'art réalisé le rendement moyen de ce type d'architecture pour des applications de récupération d'énergie est de 30%. D'après cette remarque sur les convertisseurs DC/DC la puissance nécessaire pour garantir un fonctionnement correct du module RFID est de 3mW. Cette valeur est obtenue pour un gradient thermique de 30°C (Figure 145). Or au vue des résultats de simulation présentés dans le paragraphe précédent, les gradients typiques seront inférieurs à 10°C, d'où la nécessité d'intégrer plusieurs modules thermoélectrique (4 modules) ou d'augmenter les surfaces d'échanges pour couvrir le besoin énergétique.

### Synthèse des mesures

L'ensemble des mesures ont permis de remonter aux propriétés énergétiques du module thermoélectrique envisagé pour la conversion. Au vue des impératifs de puissances pour assurer le fonctionnement du système de mesures, et des contraintes de tailles. Il semble nécessaire d'intégrer au minimum 8 modules sur la bielle avec des surfaces d'échanges suffisantes pour garantir un gradient thermique d'au moins 10°C.

La prochaine étape de caractérisation s'attachera à tester le fonctionnement global de la structure bielle et module de mesure, à l'échelle du laboratoire.

#### 1.3.8.3 Architecture électronique

Le synoptique de la carte de conversion est disponible en Figure 146. Le système est composé de 3 blocs à savoir :

- Système thermoélectrique, assurant la conversion du gradient thermique spatial en énergie électrique.
- Alimentation à découpage augmentant la tension de sortie du module thermoélectrique, en effet le coefficient de Seebeck est faible typiquement 10 à 20 mV/K.
- Régulateur de tension, afin de fournir une alimentation constante au circuit électronique, pour éviter par exemple les remises à zéro du microcontrôleur.

Le micro-générateur thermoélectrique correspond à un assemblage de 8 modules thermoélectrique.

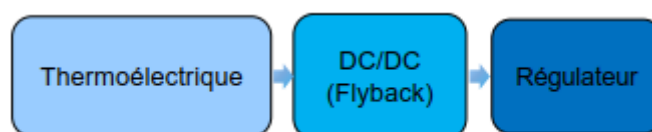


Figure 146. Synoptique étage de conversion thermoélectrique

La Figure 147 donne les schémas électroniques des différents étages de la carte de conversion. Il est intéressant de noter que la fonction d'élévation de tension et de régulation est assurée par le composant LTC 3108. Ce circuit de Linear Technology utilise un transformateur à fort rapport de conversion (100), associés à une pompe de charge pour gérer des tensions de démarrage de 20mV. Ces circuits disposent de plusieurs sorties dont une sortie à 2.2V régulée par un LDO1 (pour l'alimentation de microprocesseur) et une sortie de plus haute tension sélectionnable de 2.35V à 5V (pour alimenter d'autres composants ou recharger une batterie).

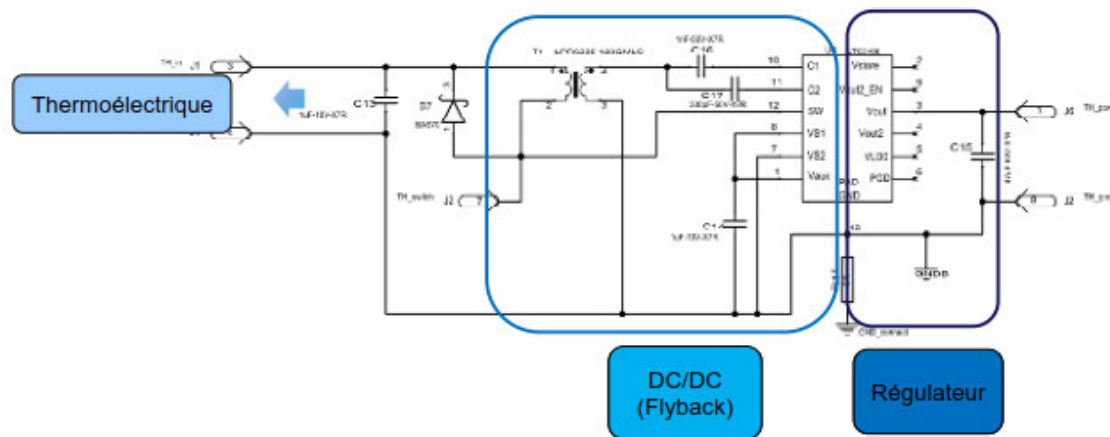


Figure 147. Schéma électronique de la partie conversion thermoélectrique

Ces circuits disposent en outre de fonctions annexes de gestion d'alimentation très utiles pour la conception de capteur autonome (signal de validation d'alimentation, gestion d'alimentation de charge à faible rapport cyclique, etc.). Ce circuit affiche des rendements de conversions maximum compris entre 30% et 60% selon le rapport de transformation désiré.

Les gammes de puissance s'étendent de la centaine de microwatts à la dizaine de milliwatts. Convertisseur thermoélectrique Au vue de l'état de l'art réalisé dans le paragraphe précédent, il est ressorti que les solutions de chez Micropelt et Nextrem, possédaient les meilleures densités de puissances. Le choix s'est orienté pour les produits de Nextrem, en raison d'une gamme de tenue en température plus importante. Le HV56 a été sélectionné parmi les produits de chez Nextrem, en raison de son faible encombrement et de ses propriétés de conversion (Figure 140).

D'après l'extrait de la documentation constructeur disponible en Figure 140, il semble que la température froide du module ne doit pas dépasser 50°C. Après discussion avec le fabricant il est ressorti que le module pouvait fonctionner avec une température froide allant jusqu'à 150°C. Les mesures réalisées pour leur caractérisation ont montré que la puissance disponible pour un gradient de 10°C est d'environ 1mW. Dans le cas de la bielle et d'après les spécifications du projet un gradient de 20°C au maximum peut être escompté. Il est donc nécessaire d'intégrer 8 modules thermoélectriques afin de pouvoir espérer couvrir les besoins énergétiques. En effet pour un gradient de 10°C il est envisageable de récupérer en sortie 6mW en prenant un rendement du convertisseur 0.3, une puissance de 2mW serait alors disponible. La puissance générée correspondrait à la consommation base du module (puissance à température ambiante). L'hypothèse de calcul prend le cas le plus critique avec un coefficient de Seebeck correspondant à la borne inférieure chez le fabricant Nextrem.

Dans le but de remonter au rendement de la carte de conversion, les mesures de la puissance disponible en sortie du module thermoélectrique en fonction du gradient thermique ont été effectuées selon un protocole présenté dans le paragraphe précédent.

La caractérisation de la puissance récupérée en fonction du gradient thermique a été réalisée pour une résistance de charge adaptée, les résultats sont donnés en Figure 148a. Pour les mesures un seul module HV 56 est intégré dans un le système. En effet lors des tests l'ensemble des modules n'était pas encore arrivé. La photographie de la Figure 148b donne une vue du module caractérisé. La Figure 144 est un extrait de la documentation constructeur, les niveaux de puissances mesurés sont plus faibles à cause de la dispersion des composant, ainsi que la position du module, placé horizontalement ne favorisant par les échanges thermiques.

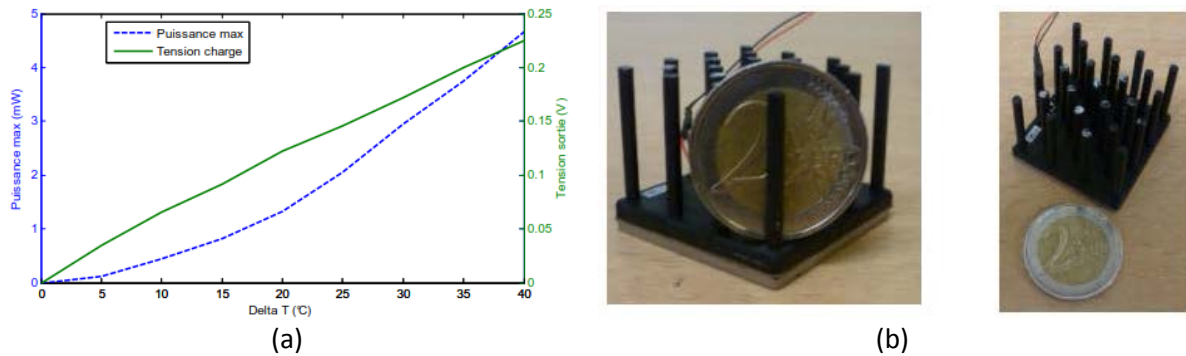


Figure 148. (a) Puissance en fonction du gradient thermique, (b) Photographie du module caractérisé

Pour correspondre au besoin énergétique de la plateforme, huit modules HV-56 sont nécessaires en prenant un gradient moyen compris en 10°C et 20°C. Le principe de fonctionnement des modules thermoélectriques impose de maintenir un gradient thermique entre une surface chaude et une surface froide. Cela implique de placer les composants le plus près possible de la source chaude de la bielle, ils échangeront à l'environnement à l'aide d'un dissipateur thermique.

*En raison du grand nombre de composants, il a été choisi de les regrouper par quatre sur une structure de base en contact avec la surface comme l'illustre la Figure 149. Structure du récupérateur thermoélectrique*

. De plus chaque module est connecté en parallèle, cette configuration a été choisie pour assurer le fonctionnement du dispositif en cas de casse d'un module.

*L'ensemble composé de la semelle, de quatre modules et des dissipateurs, est dupliqué en deux exemplaires et disposé de chaque côté de la bielle en contact avec le point chaud comme le montre la Figure 150. Architecture du module de test*

. Encore une fois la disposition des composants est le fruit de compromis avec l'environnement de la nacelle.

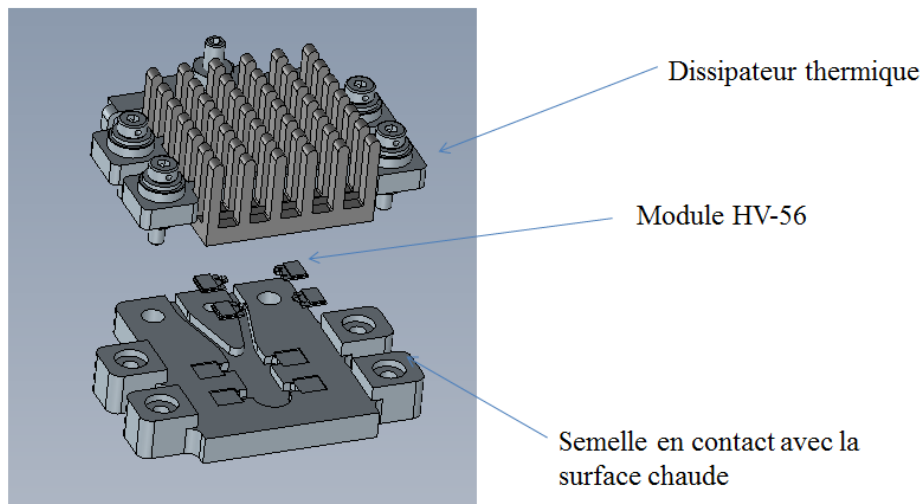


Figure 149. Structure du récupérateur thermoélectrique

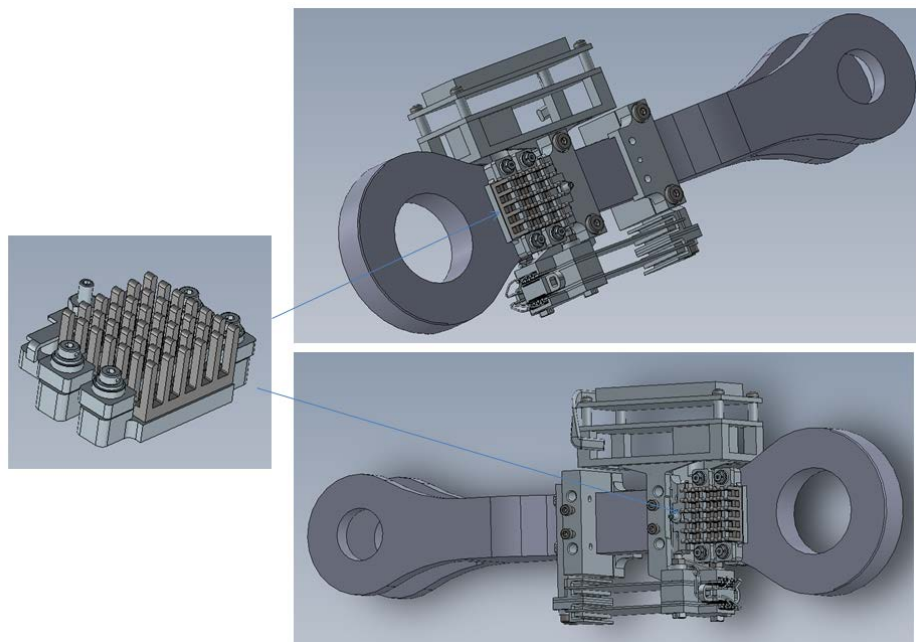


Figure 150. Architecture du module de test

### 1.3.9. Caractérisation de la transmission RFID à travers la nacelle

Un autre bloc crucial à caractériser correspond à la transmission de la liaison RF dans la nacelle. Pour cela des essais de transmission radio de tag RFID représentatifs ont été réalisés sur Nacelle avec le support de SAFRAN Aircraft Engine. Un tag RFID dont le circuit radio front end correspond exactement au prototype EPICE a été installé au sein d'une nacelle moteur disponible dans une école formant les mécaniciens de maintenance. Les essais ont eu lieu au mois d'octobre 2014. La chaîne de mesure utilisée lors des essais est présentée en Figure 151 et son installation en Figure 152.



Figure 151. Chaîne de mesure puissance RF

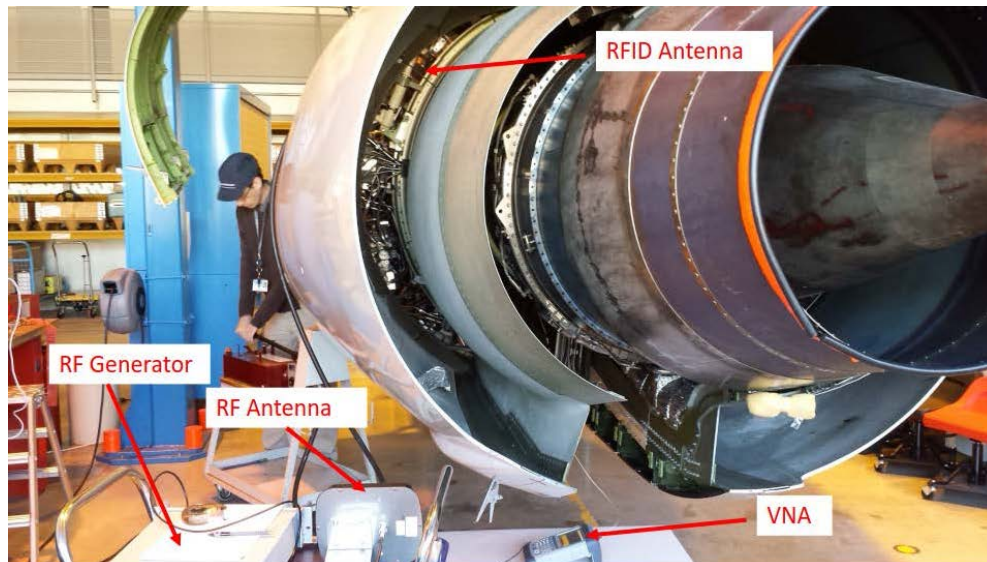


Figure 152. Installation sur la nacelle

La chaîne de mesure comporte les éléments suivants :

- Générateur RF : il fournit la puissance radio à travers une antenne à polarisation circulaire de 8dB. Sa puissance est fixée à 25bBm (maximum autorisé par la norme).
- Antennes : deux types d'antenne ont été testée, une antenne dipôle accordée à 856 MHz, et une antenne patch commerciale pour environnement métallique.
- Le VNA est connecté au tag et permet la mesure de l'impédance de l'antenne avec le couplage de l'environnement métallique, ainsi que la puissance reçue au tag.

Ces tags ont été installé sur un système d'attache moteur représentatif de l'application visée (CFM56-5b). La communication est vérifiée avec la lectrice du système (Figure 153).



Figure 153. Installation et lecture avec une lectrice portable

Les résultats de mesure sur le VNA sont les suivants :

- Antenne dipôle : impédance d'entrée :  $21-j35$  Ohm, Puissance reçue pour une charge de 50 Ohms : -22dBm pour une puissance attendue à -20dBm.
- Antenne patch : impédance d'entrée :  $21-j7$  Ohm, Puissance reçue pour une charge de 50 Ohms : -10dBm pour une puissance attendue à -9dBm.

La conclusion des essais est la suivante :

Il n'y a pas de problème de transmission nacelle ouverte. L'antenne patch a donné les meilleurs résultats, la puissance reçue n'est pas suffisante pour alimenter le tag de manière passive, le signal est perdu quand la nacelle est refermée.

Ces essais ont permis d'identifier la nécessité d'étudier précisément le design de l'antenne par rapport à l'application. L'antenne patch ne présente pas une résistance suffisante en température pour être utilisée pour l'application. Pour des questions de planning, il a été convenu de conserver l'antenne dipôle.

#### 1.4. Intégration et essais de validation

Le dimensionnement des principaux modules a été présenté. Cette partie présente les principaux résultats des essais de validation. Le prototype a été validé par essais en laboratoire, puis a été testé dans un moteur d'avion sur banc.

##### 1.4.1. Présentation du banc de caractérisation

L'objectif de cette partie est de présenter les protocoles mis en œuvre pour valider le fonctionnement du dispositif.

##### 1.4.1.1. Présentation de la bielle instrumentée

Une vue schématique de la bielle instrumentée est disponible en Figure 154. Elle est composée de 6 sous-ensembles à savoir :

- Des éléments piézoélectriques pour la récupération d'énergie sur les vibrations.
- Des modules thermoélectriques pour la conversion d'un gradient thermique en électricité par effet Seebeck.

- De cartes électroniques pour la conversion et la gestion de l'énergie, ainsi que pour le traitement et la sauvegarde des données et l'émission selon le protocole RFID.
- De jauges de déformations câblées en pont-complet pour mesurer les sollicitations mécaniques subies par la pièce.
- De pièces mécaniques assurant le maintien de l'ensemble autour de la bielle de tests.

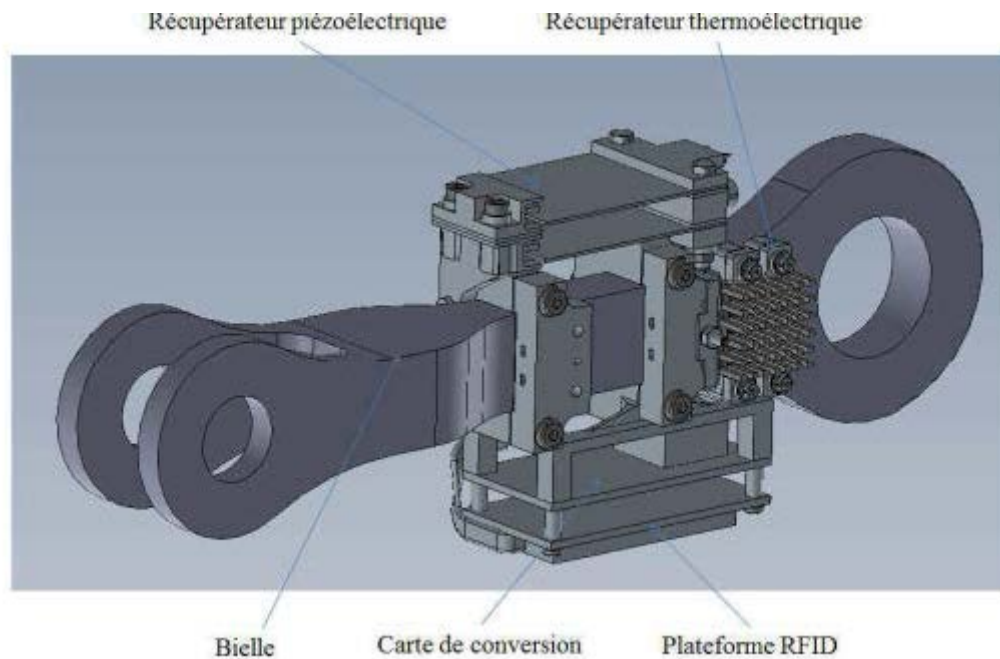


Figure 154. Vue graphique du prototype de bielle instrumentée communicante

### Présentation de la carte de conversion

La Figure 90 présente les différents étages de la carte de conversion pour la partie récupération d'énergie. Le micro-générateur piézoélectrique est constitué de deux lames en montage sismique. Il est intéressant de noter que la fonction d'adaptation d'impédance est réalisée par un convertisseur de type buck-boost commandé avec une fréquence et rapport cyclique fixe. La fonction de régulation de la tension est assurée par le composant LTC 3388, un hacheur de type élévateur. Pour les switches autoalimentés nécessaire au fonctionnement des techniques SSHI, leurs structures correspondent à l'architecture classique développée par le LGEF.

Le micro-générateur thermoélectrique correspond à un assemblage de 2 modules thermoélectrique type OptoTEC TM Series HOT12,65, F2A, 1312. Ces modules remplacent les modules de Nextrem détruit lors de l'intégration. Il est intéressant de noter que la fonction d'élévation de tension et de régulation est assurée par le composant LTC 3108. Ce circuit de Linear Technology utilise un transformateur à fort rapport de conversion (100), associés à une pompe de charge pour gérer des tensions de démarrage de 20mV. Ces circuits disposent de plusieurs sorties dont une sortie à 2.2V régulée par un LDO<sup>1</sup> (pour l'alimentation de microprocesseur) et une sortie de plus haute tension sélectionnable de 2.35V à 5V (pour alimenter d'autres composants ou recharger une batterie).

<sup>1</sup> LDO : Low dropout Tapez une équation ici.



Figure 155. Carte de conversion du projet

#### 1.4.1.2. Montage sous presse de la bielle

Pour être le plus proche des conditions de tests, la bielle instrumentée a été disposé dans une presse hydraulique de type Carver 3851CE, afin de pouvoir simuler différent palier d'effort (Figure 156). En effet elle est capable des générer une force en compression de 11 tonnes.

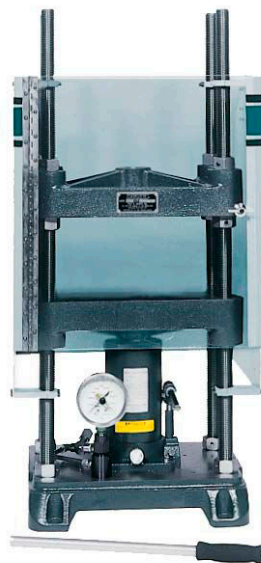


Figure 156. Photographie de la presse manuelle carver

#### Génération d'un gradient thermique

La Figure 154 donne une vue de la bielle qui sera utilisée pour les essais au sol sur banc moteur. D'un point de vue thermique la température chaude à l'extrémité gauche est de 120°C et la température froide de 80°C pour la partie à gauche. La bielle est réalisée en matériau de type Ta6V – DMD776, avec une conductivité thermique 6.7W/m.

Par contre aucune information concernant l'environnement thermique de la bielle n'est disponible. La plus grande inconnue restant la température ambiante ainsi que les flux d'air pouvant circuler dans la nacelle. Afin d'être dans un cas défavorable, le coefficient d'échange entre la bielle et l'air de son environnement sera pris comme égale à 10 W/ (m<sup>2</sup>. K). Cette valeur correspond au cas typique d'un échange thermique par convection libre.



Pour pouvoir simuler le gradient thermique présent dans la bielle, la presse est équipée de deux plateaux chauffants, régulé en température et refroidi par circulation d'eau. Des thermocouples sont intégrés pour pouvoir contrôler la température en différent points clés à savoir :

- La température chaude sous des modules thermoélectrique ;
- La température du dissipateur ;
- La température chaude et froide.

Une caméra thermique NEC G120W2 est utilisée pour visualiser et contrôler l'ensemble des températures sur la structure.

#### Excitation mécanique

Le système assurant la conversion d'énergie mécanique en électricité, est réalisé à l'aide d'élément piézoélectrique. Il s'agit de structure sous forme de poutre encastree libre. À la vue de la masse et du volume du prototype, ainsi que des conditions aux limites mécaniques, il est complexe de générer les vibrations à l'aide d'un pot vibrant de laboratoire. Dans le but de pouvoir tout de même valider le fonctionnement du dispositif de génération d'énergie, le module piézoélectrique est excité à l'aide d'un électroaimant, lorsque la bielle est mise sous presse, comme l'illustre la Figure 157. L'excitation mécanique appliqué pas l'électroaimant est mesurée à l'aide d'un vibromètre laser (Polytech).

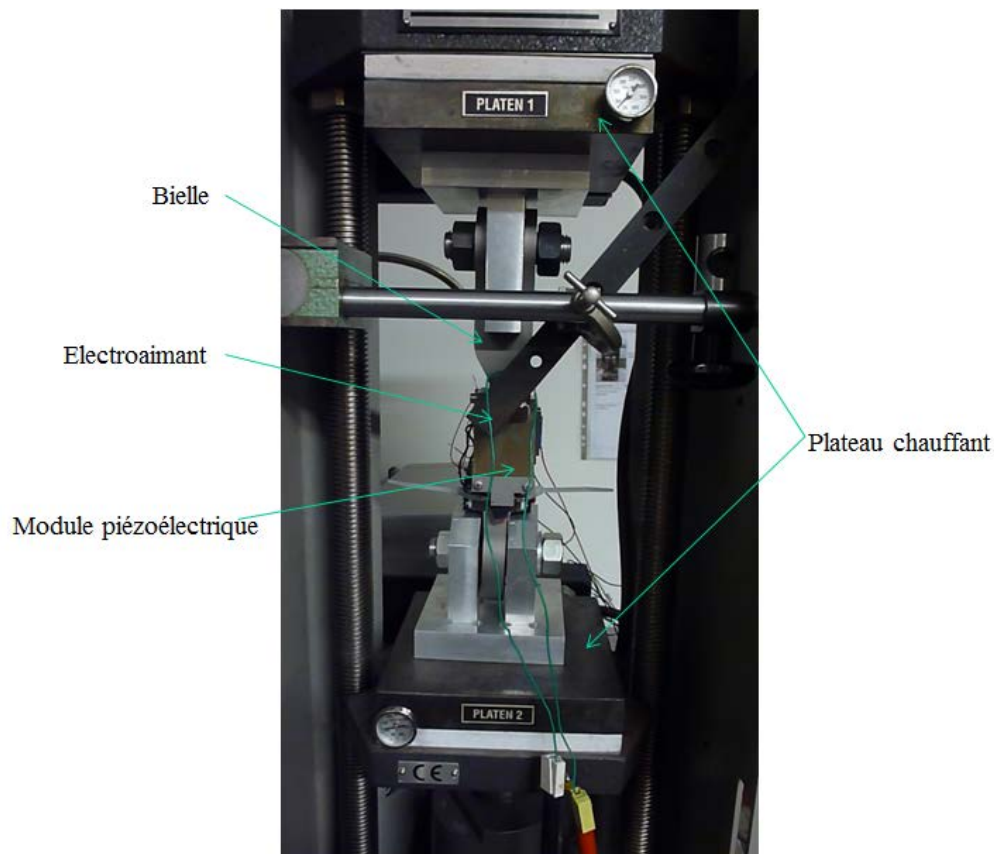


Figure 157. Photographie de la bielle instrumentée et du dispositif d'excitation mécanique

### Vue globale du banc de caractérisation

Le banc de caractérisation développé permet à l'échelle laboratoire de se rapprocher des conditions sur banc moteur, afin de pouvoir valider l'ensemble des fonctions mise en œuvre. L'ensemble des grandeurs physiques sont monitorer sur un oscilloscope de type Aglient DSO 6034A. La Figure 158 donne une vue du banc de tests.

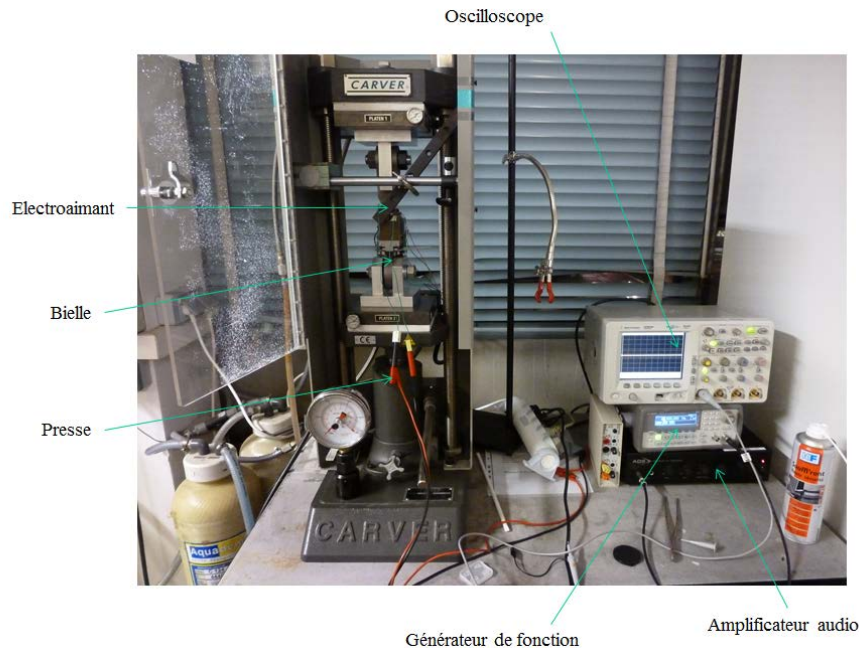


Figure 158. Photographie du l'ensemble de caractérisation

### 1.4.2. Résultats et discussion

L'objectif de cette partie est de présenter les mesures effectuées, permettant ainsi de valider le fonctionnement global de la bielle instrumentée communicante.

#### 1.4.2.1. Fonctionnement avec les modules piézoélectrique

##### Protocole de tests et analyse des résultats

Les premières séries de tests ont consisté à mesurer les grandeurs électriques en différents point clés de la carte lorsque les éléments piézoélectriques sont excités à l'aide de l'électroaimant. Pour être le plus proche des conditions de tests sur banc moteur les plateaux chauffant de la presse ont été mis en fonctionnement avec une température chaude à 120°C et une température froide à 80°C. Pour cette série de test la récupération d'énergie à l'aide de module thermoélectrique a été désactivée. Afin que seuls les éléments piézoélectriques alimentent l'électronique.

La Figure 159 adonne l'évolution temporelle de la tension en sortie du régulateur alimentant l'électronique. Le fonctionnement de la carte de conversion est validé, la tension étant régulée à 2.8V avec une faible ondulation. De plus l'énergie générée par les modules piézoélectriques est suffisante pour garantir le fonctionnement du système pour une accélération comprise à 1g à 100Hz, comme l'illustre la Figure Figure 159 b donnant l'évolution de la puissance générée en fonction de l'accélération.

Pour vérifier le fonctionnement du système le signal échantillonné (Figure 159.c) est monitoré et aucune remise à zéro du microcontrôleur n'est observée même pendant les phases d'écriture en EPROM (Figure 159.d).

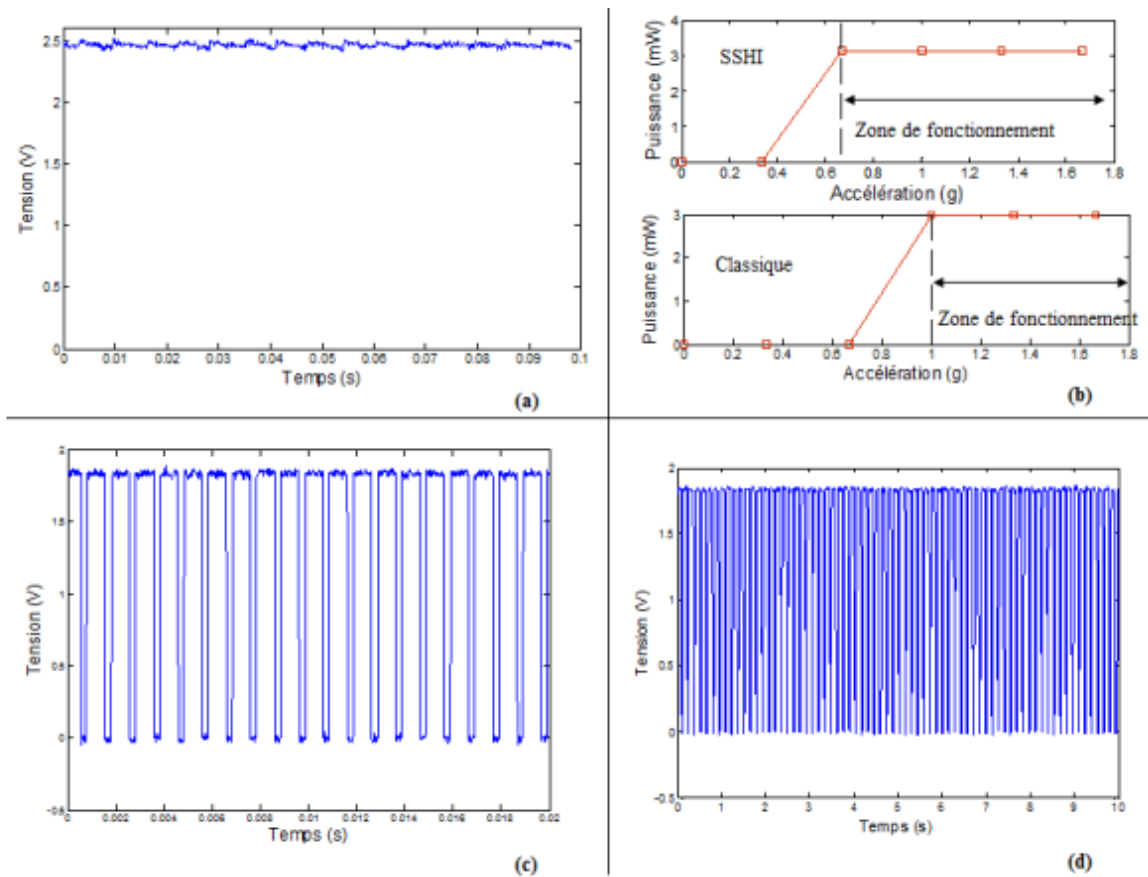


Figure 159. Validation de l'étage de récupération piézoélectrique : (a) allure temporelle de la tension en sortie du régulateur, (b) puissance en sortie de la carte de conversion (comparaison entre la technique classique et la méthode SSHI), (c) visualisation du signal échantillonné à 1 kHz, (d) visualisation de l'écriture en EPROM

Pour valider la robustesse du système, à savoir la tenue des éléments de conversion (piézoélectrique) induite par les vibrations mécaniques et le flux de chaleur produit pour les deux plateaux chauffant. Le système est laissé pendant 12 heures en fonctionnement continu, les données enregistrées indiquent une bonne stabilité de l'ensemble aucune remise à zéro du microcontrôleur n'a été noté.

Le thermographe disponible en Figure 160 indique que la température des modules piézoélectrique est loin de la limite d'utilisation fixé à 150°C, expliquant ainsi la stabilité des résultats obtenus.

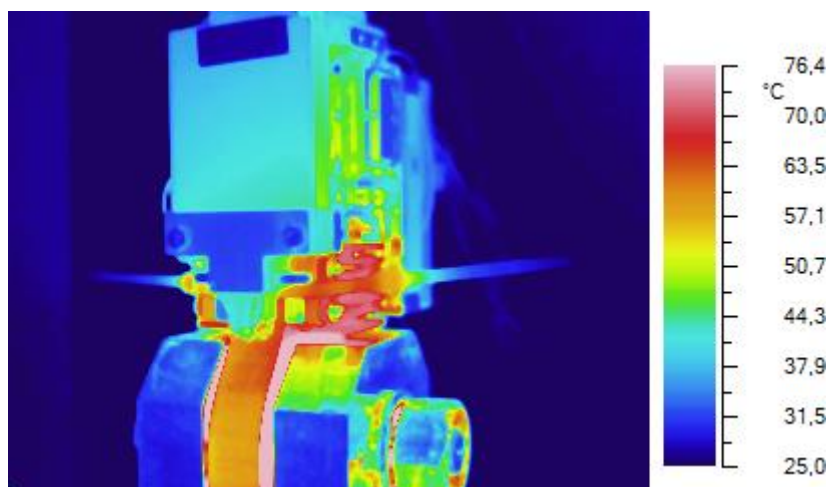


Figure 160. Thermographe des modules piézoélectrique après 12 heures de fonctionement

### 1.4.2.2. Fonctionnement avec les modules thermoélectriques

#### Protocole de tests et analyse des résultats

Dans l'objectif de caractériser les propriétés de conversion de la structure, les plateaux chauffant de la bielle sont maintenus à une température chaude de 120°C et une température froide de 80°C. Pour vérifier le bon fonctionnement du prototype, la tension en circuit ouvert ainsi que les températures du support des modules et du dissipateur sont mesurées en fonction du temps à l'aide de thermocouples et de conditionneurs (Fluke 80TK), lorsque le régime transitoire de la structure (bielle plus micro-générateur est atteinte) (Figure 161). La structure développée permet d'avoir un gradient d'environ 5°C entre les deux surfaces du thermogénérateur de façon permanente, produisant en sortie du module une tension constante de 100mV. Les fluctuations observées sur la tension et les températures sont dues à la régulation des plateaux chauffant et celle de l'environnement ambiant.

La Figure 162, donne l'évolution de la tension en circuit ouvert du module en fonction du gradient de température (correspondant à la différence entre la température du collier et du dissipateur). La variation du gradient a été obtenue en faisant varier la température de la source chaude. L'ensemble des mesures a été réalisé lorsque le régime permanent est atteint (gradient de température stable). Une dépendance linéaire existe entre la tension en circuit ouvert et le gradient thermique aux bornes du module thermoélectrique. Cette observation correspond bien à la théorie. Le coefficient directeur de la droite correspond au coefficient de Seebeck du module qui vaut d'après les mesures 17.5mV/K et la documentation constructeur 18mV/K. Par contre pour des gradients plus importants des non-linéarités pourraient être observées, en raison des dépendances des coefficients de Seebeck des jonctions p et n avec la température. Mais ces températures sont supérieures aux contraintes applicatives. Cette série de mesure a été effectuée pour les deux modules, permettant ainsi de valider leur fonctionnement. Un thermographe d'un module thermoélectrique est disponible en Figure 163, il est intéressant de noter le gradient qui existe entre la bielle et le dissipateur thermique (pour information l'outillage de maintien apparait comme froid car la correction d'émissivité n'a pas été réalisé)

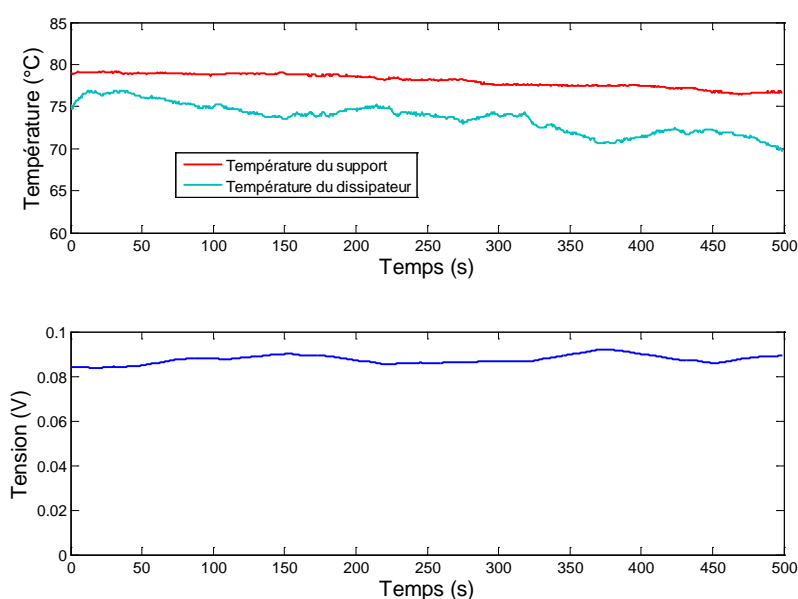


Figure 161. Evolution du gradient thermique et de la tension en circuit ouvert du module thermoélectrique en fonction du temps pour une température chaude de 120°C, une température froide de 80°C et une température ambiante de 25°C.

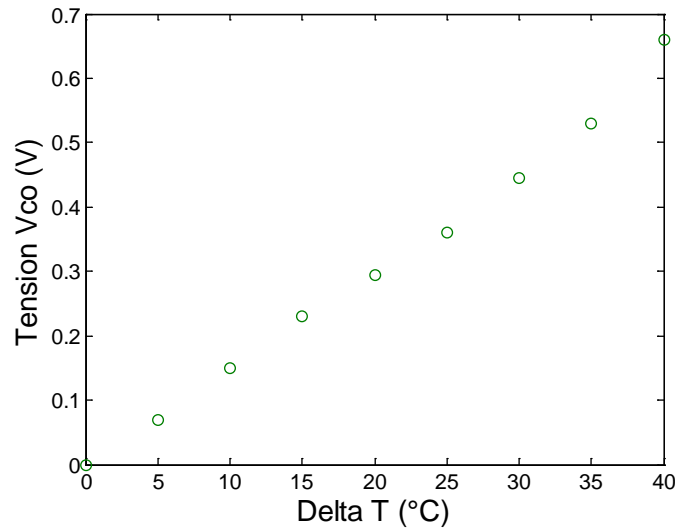


Figure 162. Evolution de la tension en circuit ouvert en fonction du gradient thermique

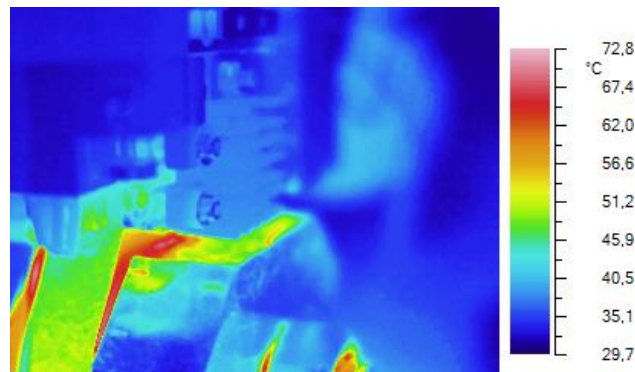


Figure 163. Thermographe du module thermoélectrique en régime permanent.

Des mesures analogues au cas de la récupération d'énergie à l'aide d'éléments piézoélectriques ont ensuite été effectuées pour valider le fonctionnement de la carte de conversion et du système de mesures. Le système démarre pour des gradients thermiques compris entre 16°C et 20°C.

#### 1.4.3.3. Fonctionnement avec les deux sources d'énergie

La dernière série de tests effectués consiste à vérifier le fonctionnement du système, lorsque les deux sources d'énergie sont présentes, et pendant une durée de 12 heures. Les mesures ont été réalisées pour une excitation mécanique de 1g à 100Hz, et pour des températures de source chaude à 120°C et source froide de 80°C. Les enregistrements n'ont pas indiqué de remise à zéro du système, indiquant un bon fonctionnement complet.

#### Caractérisation de la bielle

Dans le but d'être le plus proche de la réalité des mesures de déformation en fonction de la force appliquée ont été effectuées sur une bielle de vol (Figure 164). La courbe en compression donnant l'évolution de la déformation en fonction de la force appliquée est disponible en Figure 165. Une dépendance linéaire est observée indiquant un fonctionnement dans la zone élastique du matériau.

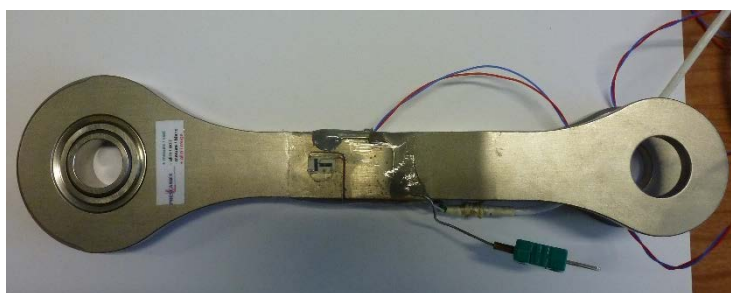


Figure 164. Bielle utilisée pour la caractérisation

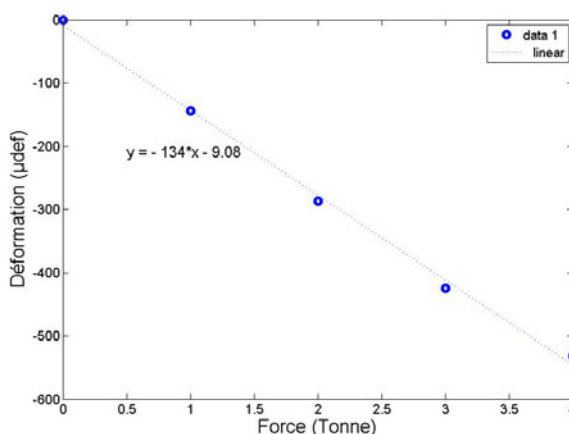


Figure 165. Réponse du pont de jauge

### 1.4.3. Synthèse des mesures

L'étude s'est focalisée autour de la caractérisation du système complet à savoir une bielle instrumentée, le système fonctionne grâce à la récupération d'énergie sur deux sources :

- Mécanique
- Thermique

Les mesures réalisées à l'échelle du laboratoire, ont montré qu'il était possible de récupérer 3mW pour une accélération de 1g à 100Hz, correspondant au besoin énergétique du module.

### 1.5. Essais au banc moteur au sol

La photographie disponible en Figure 166 donne un aperçu du moteur utilisé pour les essais. L'intégration des modules (Figure 167) nécessite de détacher le moteur du système d'attache. Les jauges de contraintes pour la mesure des déformations sont préalablement installées sur la bielle et connectées lors du montage des modules sur la bielle. L'ensemble est ensuite installé sur le moteur (Figure 168) lors de son remontage sur la structure d'attache. Les modules électroniques ont été encapsulés dans un silicone d'instrumentation afin de les protéger de l'environnement extérieur (température, vibrations, pollutions).



Figure 166. Moteur utilisé pour les essais

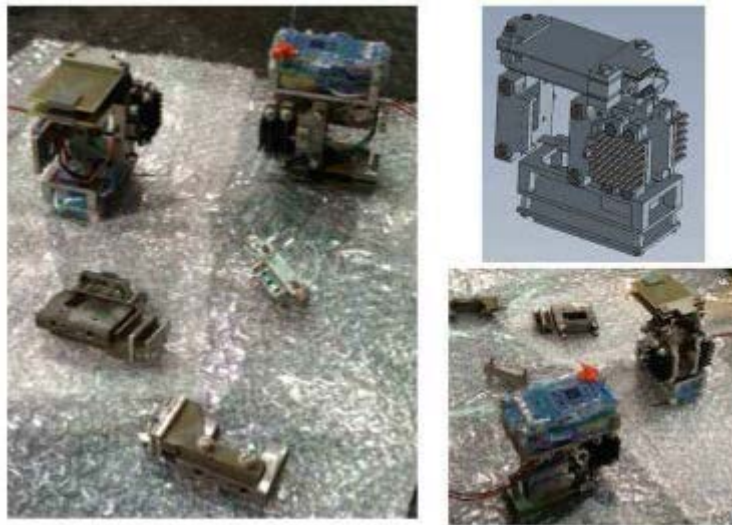


Figure 167. Modules du système à vide

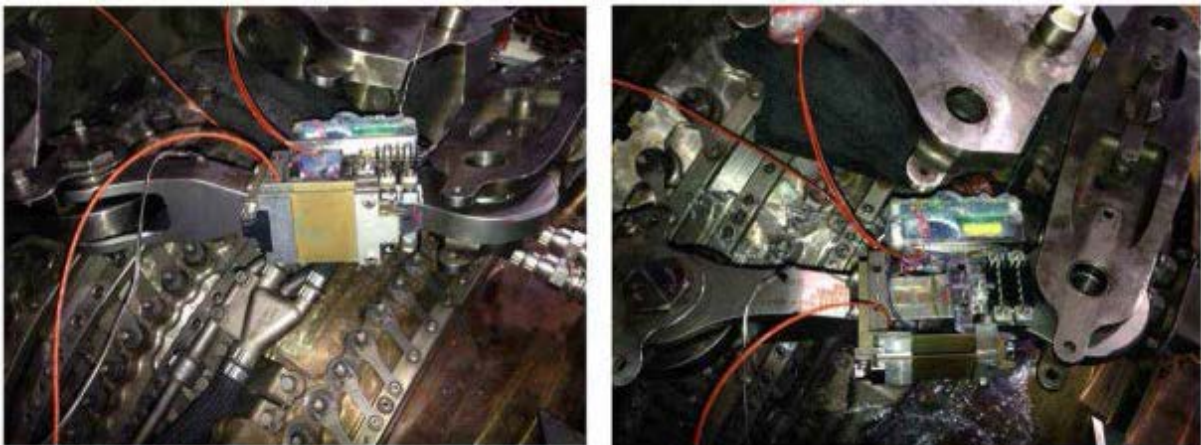


Figure 168. Intégration des prototypes sur le moteur

### 1.5.1. Instrumentation de référence

Pendant les essais, chaque bielle était équipée de capteurs de référence afin de pouvoir comparer les résultats de mesure à ceux du système et de pouvoir vérifier l'environnement extérieur du moteur par rapport aux spécifications. Sur chaque bielle est installé (Figure 169) :

- Des jauges de contraintes montées en pont complet
- Un thermocouple de masse
- Un thermocouple d'air (~1cm au-dessus de la bielle)
- Un accéléromètre collé sur la chape de la bielle droite.

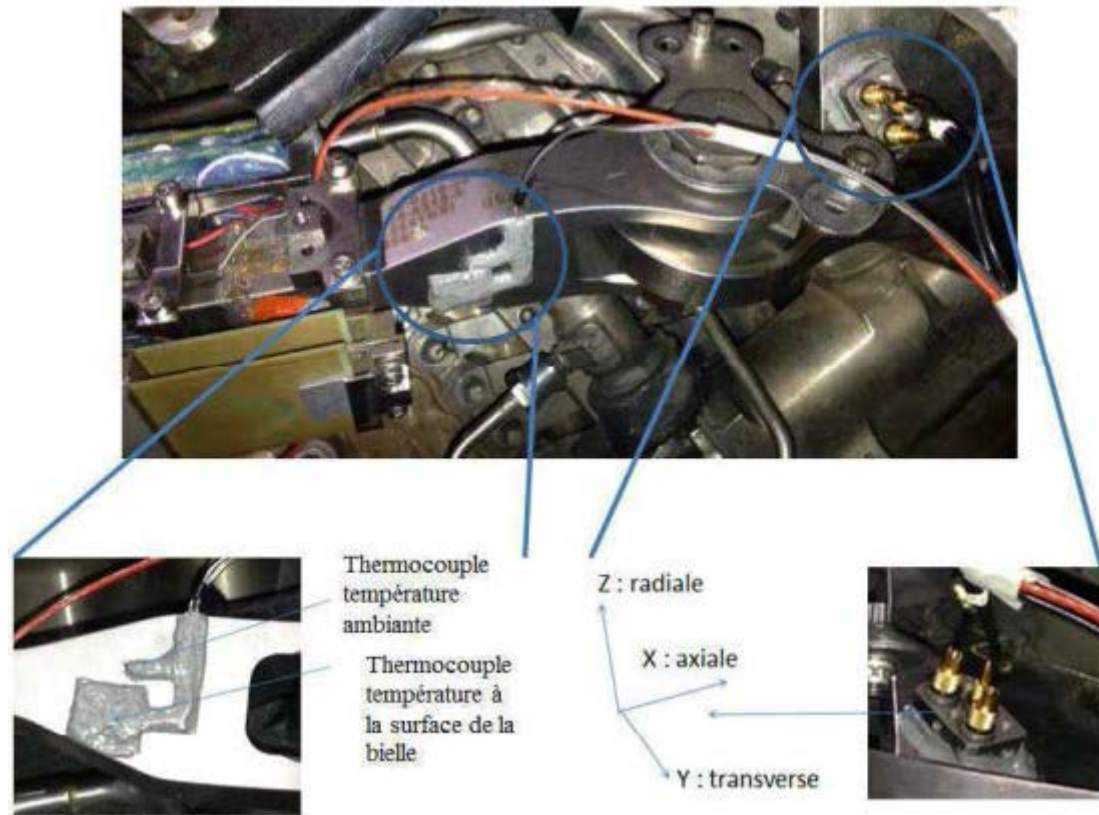


Figure 169. Instrumentation de référence : positions et type de capteurs

### 1.5.2. Déroulement de l'essai

Le système a été monté sur un CFM56-5B et testé au banc SMES de Safran Aircraft Engines de mi-avril à mi-mai pendant 705 cycles. Un cycle moteur est présenté en Figure 170. Safran Aircraft Engines était présent pour les 98 premiers cycles et a pu réaliser des interrogations RFID régulières ainsi qu'une lecture visuelle du capteur. Les données de déformation ont été acquises de manière régulière.

Pour les 607 cycles restants, les équipes sur place ont réalisé des interrogations par RFID (Figure 171) à intervalles plus ou moins espacés. L'acquisition des capteurs de référence ne pouvait pas être réalisée en permanence, et seuls quelques enregistrements ont été effectués en général le lundi matin moteur froid, jusqu'au lundi midi. A chaque fois, une lecture RFID était effectuée avant et après l'acquisition des capteurs de référence.



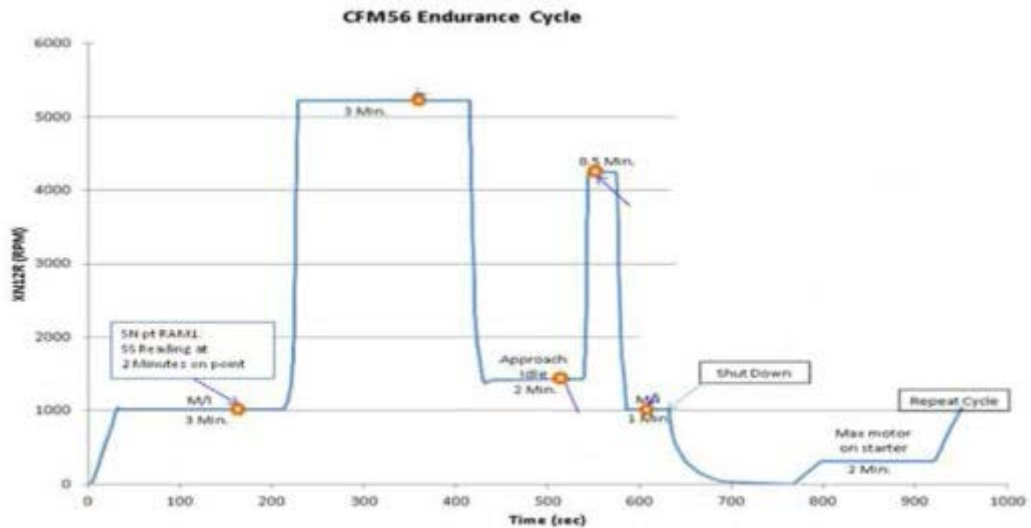


Figure 170. Cycle d'essais moteur

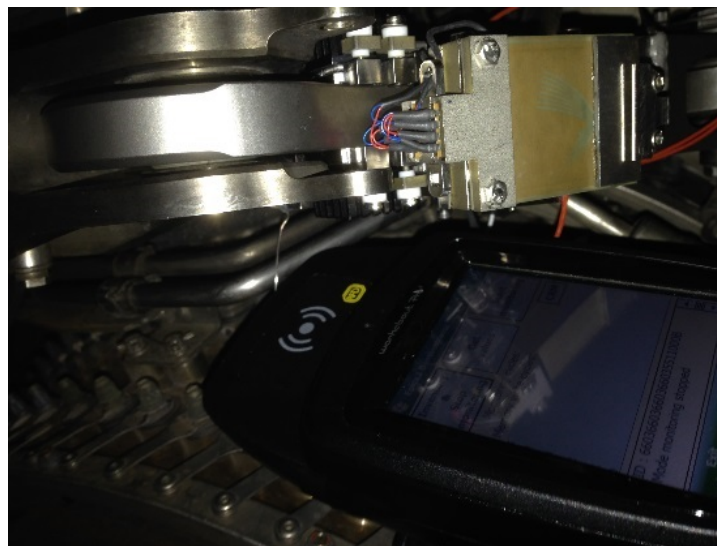


Figure 171. Interrogation RFID du système

### 1.5.3. Résultats des essais sols

#### 1.5.3.1. Tenue du système

Lors du montage :

- L'accrochage du moteur à l'adaptateur peut être effectué à l'aide d'outils tels que des marteaux avec embout plastique.

A l'environnement moteur :

Le système a tourné pendant 705 cycles d'une durée d'environ 20 minutes chacun. Entre le début et la fin des essais, il n'y a pas eu de changement de comportement. Le système a bien résisté à l'environnement et aux essais réalisés pendant 3 mois. Une fois les prototypes démontés du banc moteur des mesures analogues à la validation au laboratoire ont été réalisés avec obtention de résultats équivalents.

### 1.5.3.2. Test de la transmission sans fils

Les lectures RFID ne pouvaient pas être effectuées de manière régulière lors des essais. La portée sur table du système avant essai était d'environ 2cm au lieu de plusieurs dizaines de cm attendus et annoncé lors des tests préliminaires par SKF. L'hypothèse la plus vraisemblable est que l'antenne a été abîmée au cours des différents tests et manipulations préliminaires. On peut voir sur la Figure 172 que l'antenne dipôle est tordue et impossible à remettre parfaitement droite.

L'antenne étant dimensionnée pour de l'UHF RFID, La déformation de l'antenne a dégradé sa performance.



Figure 172. Antenne du TAG lors de l'intégration

L'influence du moteur dans la transmission n'a pas pu être testée : on avait à peu près la même portée sur table et sur moteur, mais on ne peut pas dire qu'à une si courte distance l'environnement moteur ait une vraie influence.

Si c'est l'hypothèse la plus probable, il reste quand même des incertitudes : l'antenne du système monté à droite du moteur était trop endommagée et une nouvelle antenne a été ajoutée sur place. La carte avait en effet un connecteur SPI pour pouvoir lire ses données de façon filaire en cas d'échec de lecture : à partir de ce connecteur, on a fait sortir un câble qui a servi d'antenne en son extrémité. La portée a été améliorée de 1 à environ 3-4 cm. On est toutefois loin d'une portée de plusieurs dizaines de cm. Cette antenne n'était pas tordue mais la portée n'était pas ce qu'elle aurait dû être (~10cm). Une anomalie de la lectrice est a priori exclue, Cette dernière étant restée fonctionnelle après essais.

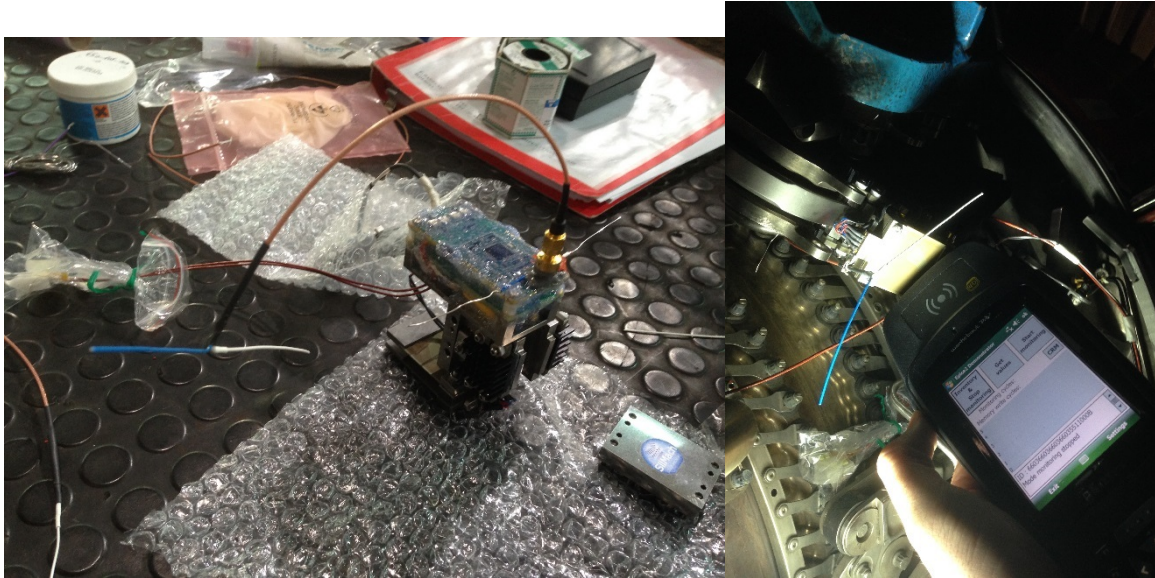


Figure 173. Réparation de l'antenne

### 1.5.3.3. Test de la récupération d'énergie

Le capteur testé lors des essais sol est composé des jauges auto-alimentées ayant besoin d'environ 3 mW pour fonctionner. Ce besoin devait être couvert avec 1g de vibration autour de 100Hz ou 10°C de deltaT entre la bielle et l'air. Le boîtier électronique enregistre combien de fois le capteur est passé au-dessus du seuil.

A la fin de l'essai, on constate que l'histogramme des seuils est exactement le même qu'avant l'essai quel que soit le capteur (Figure 174). Les compteurs 'Monitoring Cycles' et 'Memory write cycles' sont restés à la valeur initiale (zero) indiquant que le microcontrôleur du système n'a pas réussi à démarrer. Les jauges ayant été vérifiées, le problème peut provenir d'une insuffisance d'énergie, un problème de connexion ou un problème sur le boîtier électronique. Un problème sur le boîtier électronique est possible, même s'il fonctionnait bien sur les autres fonctionnalités. Le système a été vérifié après les essais. Il a pu fonctionner à nouveau dans l'environnement du laboratoire.

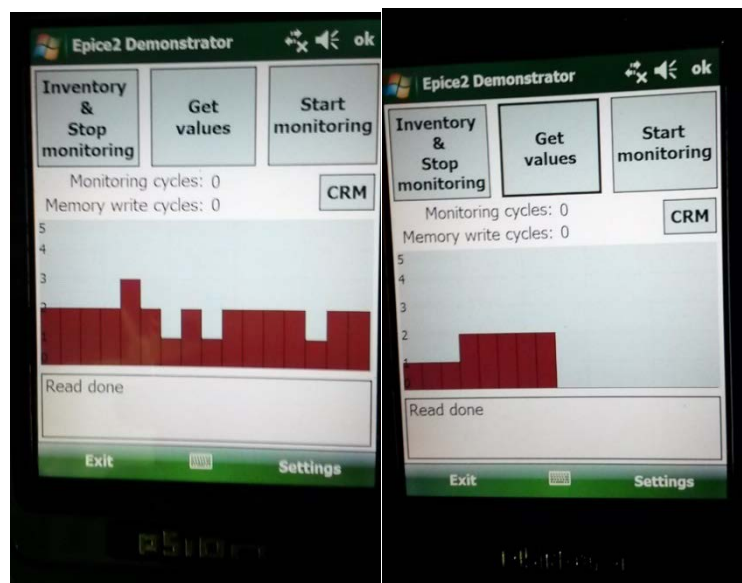


Figure 174. Affichage valeur lectrice

L'hypothèse la plus probable (et confirmée après analyse des essais) est qu'il n'y ait pas eu assez d'énergie ou du moins qu'il n'y en ait pas eu de façon constante

La récupération d'énergie n'a pas été efficace durant les essais sol.

Les enregistrements des températures pour la bielle sont disponibles en Figure 175. On remarque que les températures évoluent de la même façon. Par contre pour la température de surface de la bielle, les transitoires sont lissés en raison de l'inertie thermique du support. Afin de pouvoir estimer le gradient disponible à l'interface des modules thermoélectriques, la différence entre les deux températures (ambiante et surface) est calculée comme le montre la Figure 175.

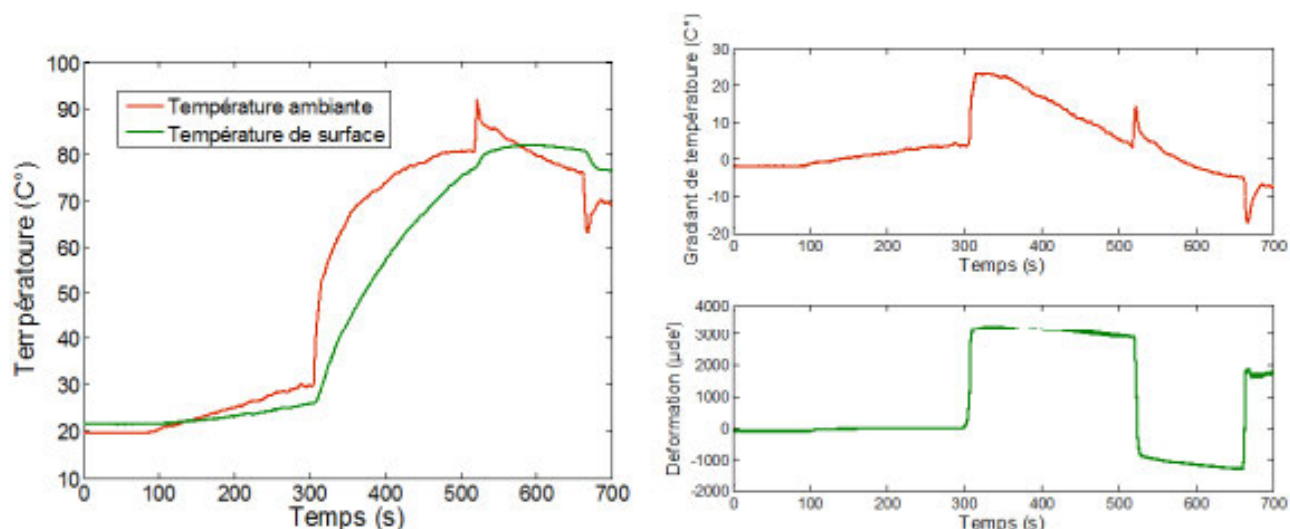


Figure 175. Mesures de l'environnement thermique de la bielle

Les mesures montrent que le gradient thermique dépend du régime du moteur, que l'on peut également voir sur l'enregistrement des déformations de la bielle (en vert). La Figure 176 donne l'évolution de la puissance DC/DC en fonction du temps. La valeur maximale est de 3.7 mW avec une valeur moyenne à 600µW une fois le régime permanent établi. Cette dernière valeur ne correspond pas aux besoins énergétiques du TAG RFID.

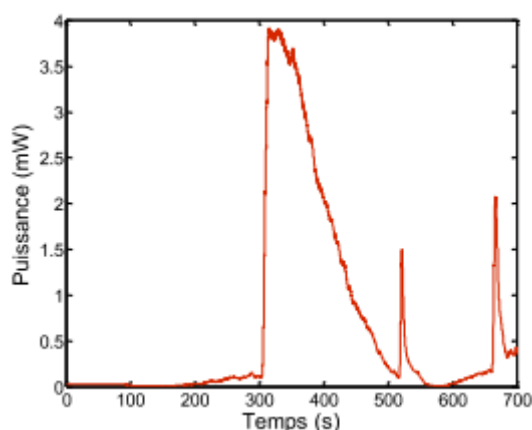


Figure 176. Puissance en sortie du microgénérateur thermoélectrique en fonction du temps.

Concernant les gisements vibratoires, les enregistrements sont donnés en Figure 177. Ces mesures montrent que l'accélération dépend fortement de la direction, mais aussi du régime du moteur. Cette variabilité a une influence importante sur les performances des microgénérateurs piézoélectriques dans leur configuration en sismique.

Le signal temporel a été par la suite décomposé en série de Fourier pour les différents régimes de fonctionnement (zone 1 à 4), comme illustré en Figure 178. Les spectres de raies obtenus montrent la présence d'harmoniques pouvant être exploités pour la récupération d'énergie. Par contre il y a une variation de cette fréquence en fonction du régime moteur comme l'indique les données disponibles dans le Tableau 10, avec une fréquence fondamentale variant sur une octave (147Hz à 240Hz). Cette bande de fréquence correspond aux bandes de vibration exploitables pour des éléments piézoélectriques. Par contre elles ne correspondent pas au réglage du prototype, qui avait été accordés entre 80 et 100Hz, par rapport aux spécifications techniques disponibles.

De plus l'amplitude est moindre que celle initialement escomptée, à savoir 480 mg à 234Hz contre 1g à 100Hz donc un facteur 4 sur la puissance récupérée, car il y a une dépendance quadratique entre l'accélération et la puissance. Les amplitudes des vibrations sont fortement liées avec l'orientation, la majorité étant dans la direction axiale, et non radiale comme réalisé sur l'intégration.

La réalité donc est bien différente des spécifications. En effet, la fréquence  $F_f$  du fondamental est liée à la vitesse de rotation de la soufflante du compresseur basse pression qui génère des vibrations périodiques et donc le spectre de raies.

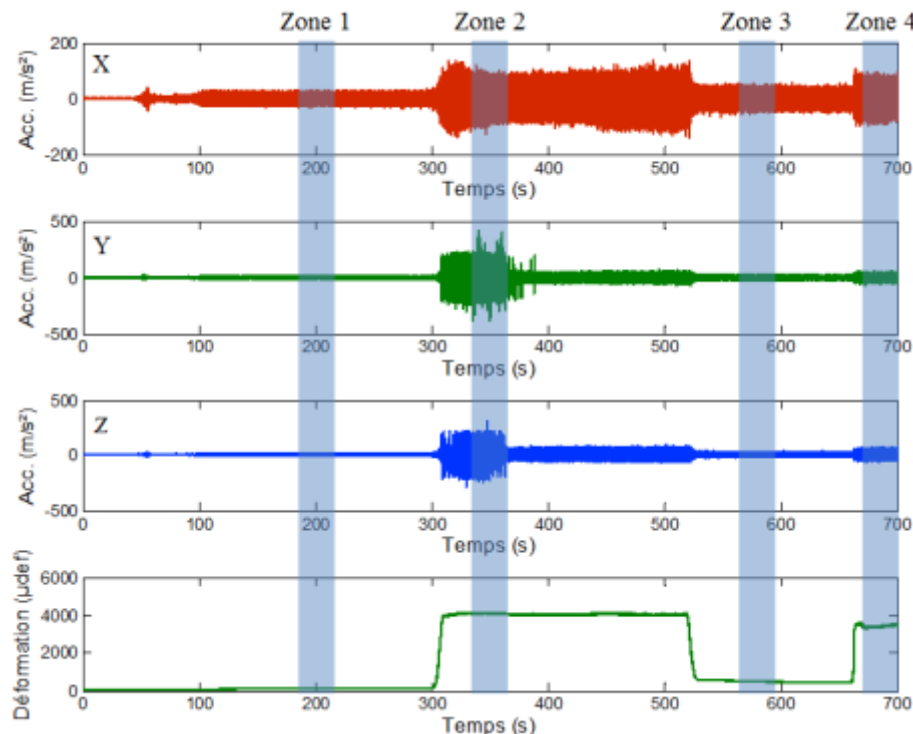


Figure 177. Mesures d'accélération et de déformation en fonction du temps

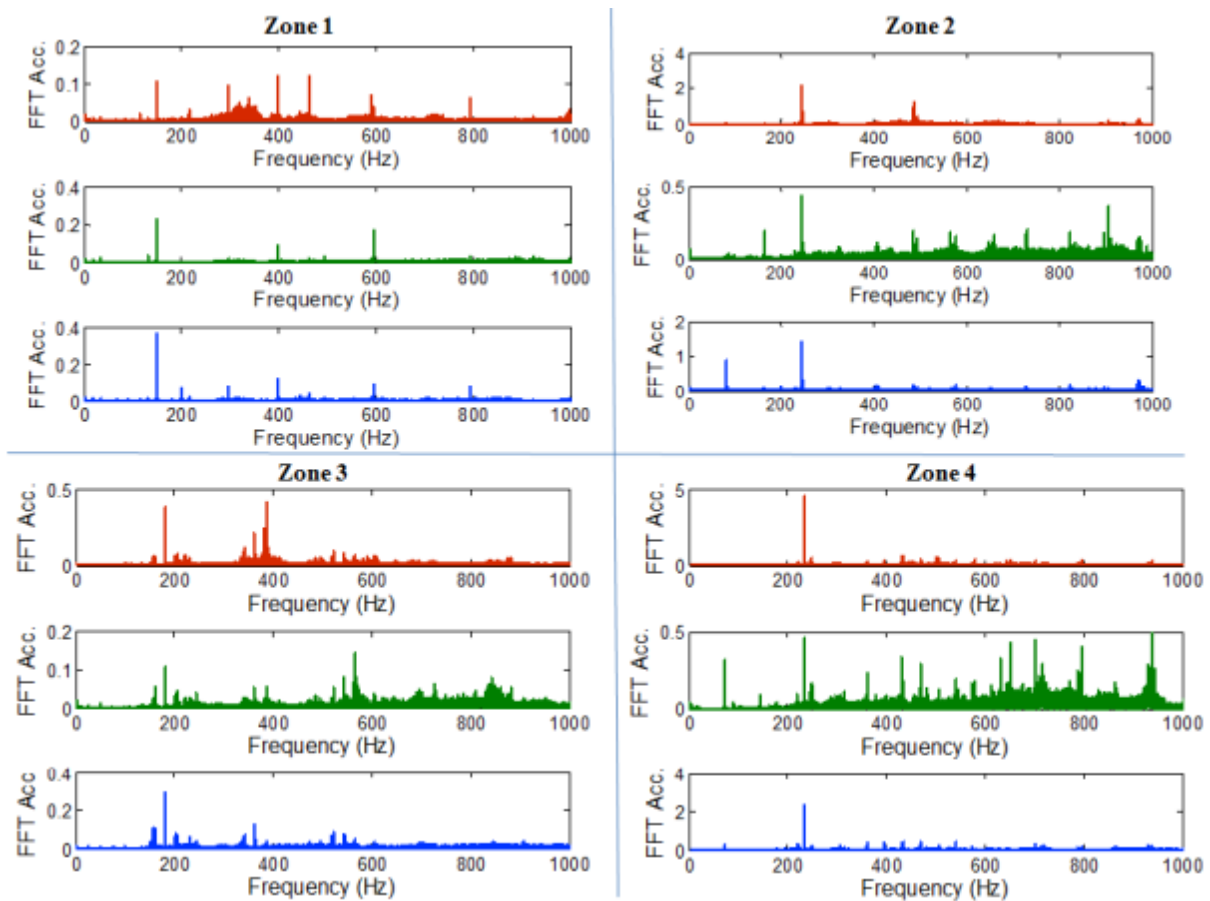


Figure 178. FFT du signal accélérométrique

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
<b>Fréquence (Hz)</b>	147	242	180	234
<b>Amplitudes (x, y, z) (mg)</b>	11, 24, 37	232, 45, 163	41, 12, 30	480, 48, 255

Tableau 10. Fréquence et accélération pour différent régime moteur

La récupération de cette énergie vibratoire a été malheureusement rendue difficile du fait points suivants :

- Il n’y a d’énergie à récupérer qu’au niveau des pics, or la position de ceux-ci est fonction du régime moteur, ce qui implique un transducteur à bande passante suffisamment large (voir infra). Ce point est en parti couvert par la méthode SSHI implémentée, mais pas suffisamment.
- En régime permanent, il n’y a quasiment pas de pics de puissance ni d’énergie à récupérer, or cette phase constitue souvent l’essentiel du cycle du moteur ;
- Pour des positions éloignées du moteur (fuselage par exemple) la densité spectrale d’énergie est beaucoup plus faible ;
- Sur d’autres position dans l’avion, lorsqu’un pic est présent (fondamental par exemple) il peut être décalé de quelques hertz par rapport à Ff mesurée près du moteur (effet de filtrage de la structure).

Au final la puissance générée par les dispositifs de récupération d'énergie n'est pas suffisante pour alimenter en continu le Tag, sauf pendant les transitoires thermique comme illustré en Figure 179. Ce risque avait été identifié au lancement du programme de recherche. Les données environnementales ne pouvaient pas être disponible au démarrage car ces dernières nécessitent de réaliser des mesures sur banc moteur au sol et en vol.

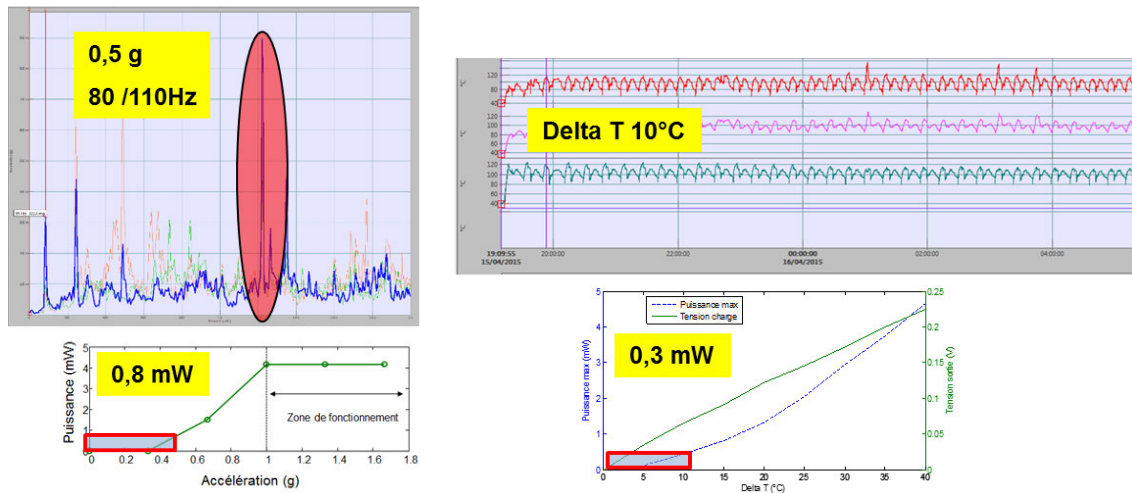


Figure 179. Energie récupérable

Malgré cette validation partielle du fonctionnement, il n'était pas possible de retarder les essais en vol. Il a été décidé de retirer le prototype, et de pousser l'analyse de l'environnement. La solution complète a résisté à l'environnement des bielles de reprise de poussée. La récupération d'énergie en environnement moteur est complexe, il y a de faibles niveaux de vibration, sur des plages variables de fréquence, et de forts gradients de températures, le gradient est limité. La transmission sans fil en environnement moteur est également difficile : la transmission en environnement clos métallique est complexe et difficilement modélisable. Seule la transmission RFID via téléalimentation a fonctionné, et avec une distance bien plus faible que prévu.

L'instrumentation de référence est conservée durant les essais vols pour recueillir l'environnement thermique et l'environnement vibratoire, afin de pouvoir réaliser des analyses en laboratoire optimiser les récupérateurs pour cet environnement.

## 1.6 Essais en vol

### 1.6.1. Instrumentation de référence

L'instrumentation de référence réalisée est la suivante :

Au niveau des bielles :

- Un accéléromètre
- Température de surface
- Température de l'air
- Un pont de Jauge (sous la forme de deux demi ponts de jauges – voir Figure 180)

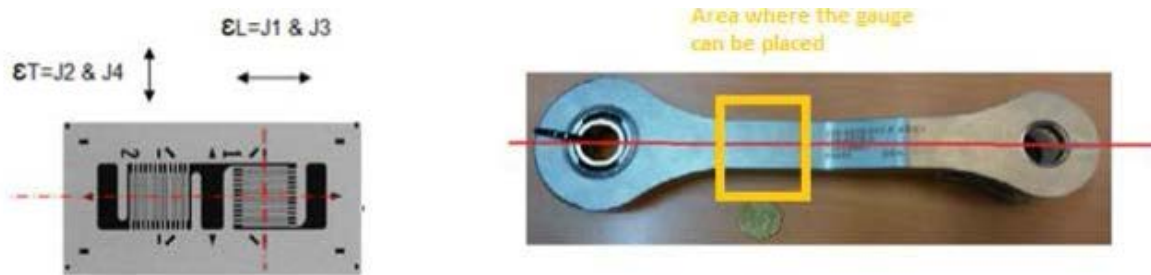


Figure 180. Instrumentation pour les essais en vol

D'autres données relatives au vol ont également été enregistrées.

Les bielles ont été montées et instrumentées sous la responsabilité d'Airbus. Des tests ont été effectués chez Airbus concernant la calibration des ponts de jauges sur chacune des bielles.

A la suite de l'intégration sur le moteur, le contrôle du fonctionnement des capteurs a été effectué (capteur de température, capteur de vibration, capteur jauge de contraintes) par Airbus. Le pont de jauge de la bielle gauche s'est avéré dysfonctionnel lors des contrôles de fonctionnement. Il n'était malheureusement pas envisageable de démonter la bielle de reprise de poussée et son capteur pour la réinstrumenter dans le délai prévu. La Figure 181 ci-dessous présente une photographie de l'instrumentation réalisée.

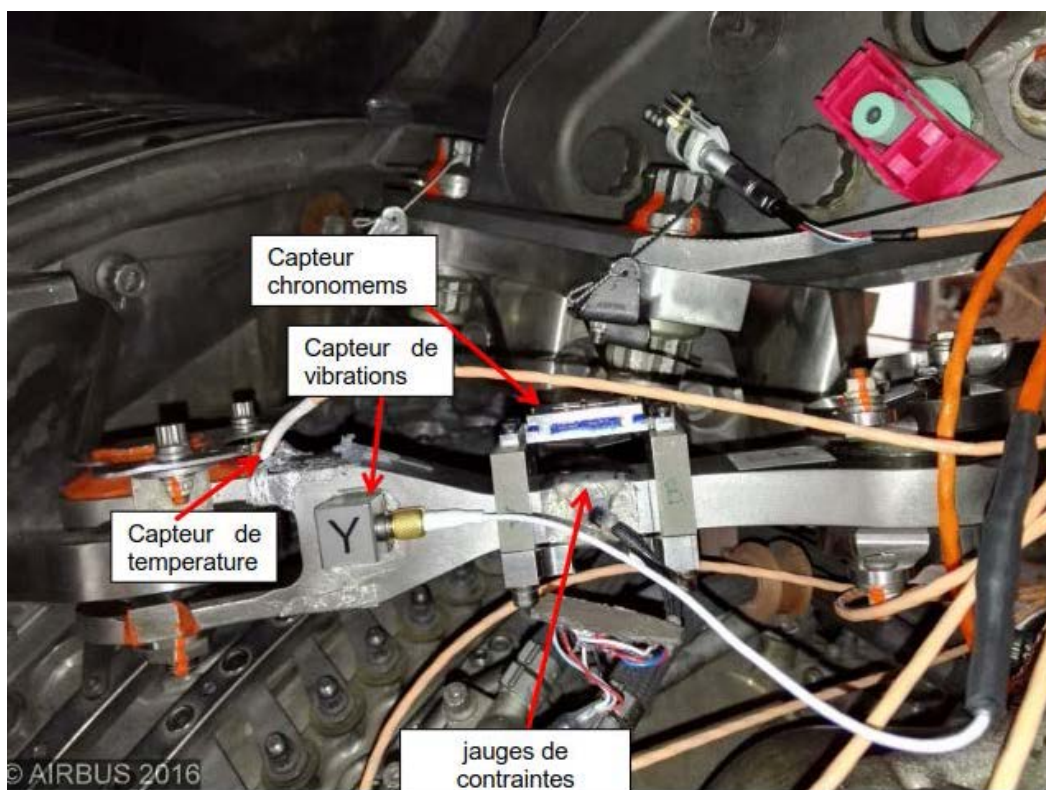


Figure 181. Instrumentation des essais vol

### 1.6.2. Déroulement de l'essai vol

Il était prévu au démarrage de faire 6 journées d'essais. Les données enregistrées ont été capitalisées à la fin de chaque journée de vol. Au final, nous avons pu avoir 5 essais, comportant au total 6 vols du 21 juin au 29 juillet 2016 avec 6 décollages/atterrissages.



### 1.6.3 Résultats et analyse

La Figure 182 illustre les données typiques de l'environnement avec les informations d'altitude et de vitesse :

- Déformation de la bielle
- Température de la structure
- Accélération sur la bielle

Concernant les températures, les mesures indiquent la présence d'un gradient important avec une moyenne à 18°C. Ceci valide la possibilité d'alimenter avec un thermogénérateur. Les analyses vibratoires pendant les différentes phases du vol correspondant au décollage, à la phase de croisière et l'atterrissage sont présentées en Figure 183. On remarque une différence avec les mesures réalisées sur le banc moteur au sol, la fréquence fondamentale est à 430 Hz et varie sur une plage de 30 Hz avec des amplitudes d'accélération maximales à 2.5g et une moyenne à 0.6g. Ces valeurs permettent d'envisager une alimentation avec un récupérateur piézoélectrique, mais avec des éléments différents que ceux intégrés au système (Figure 184).

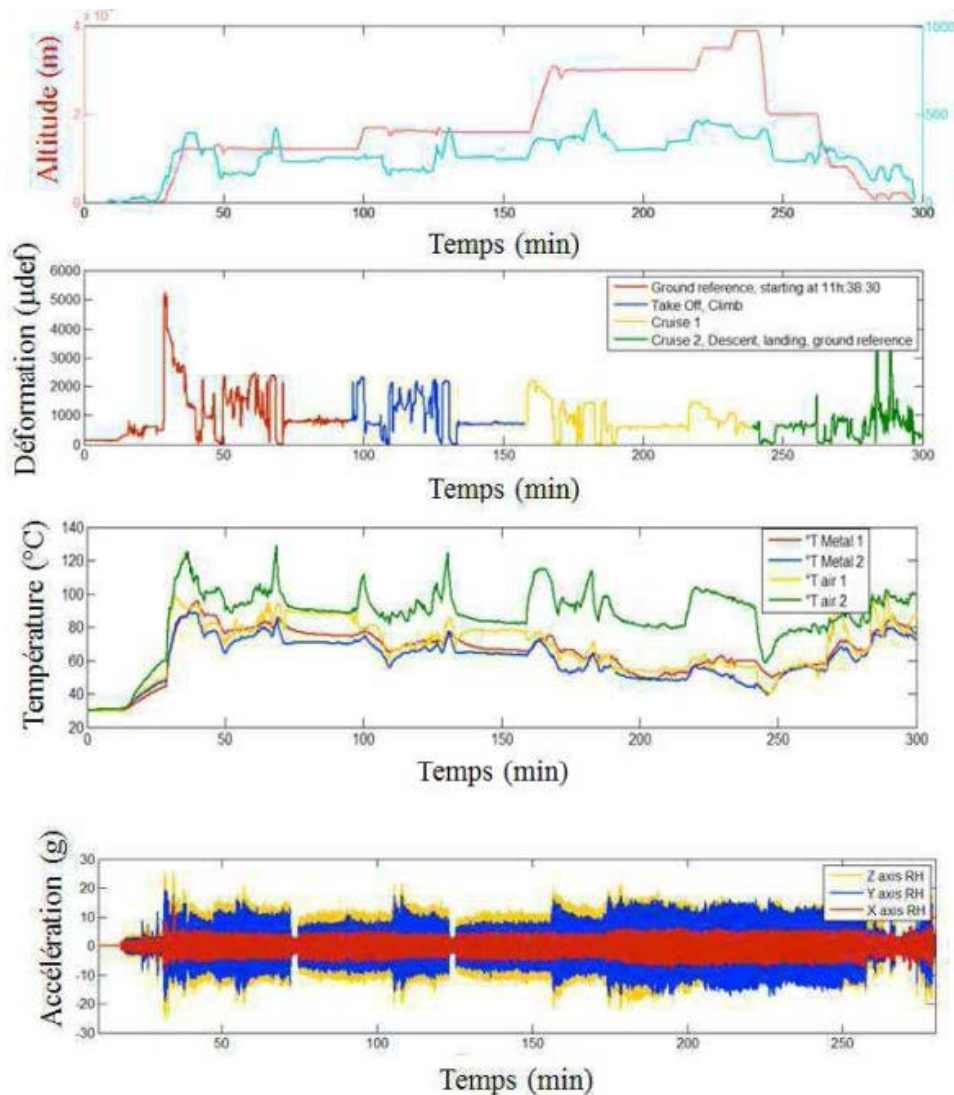


Figure 182. Mesures des essais en vol

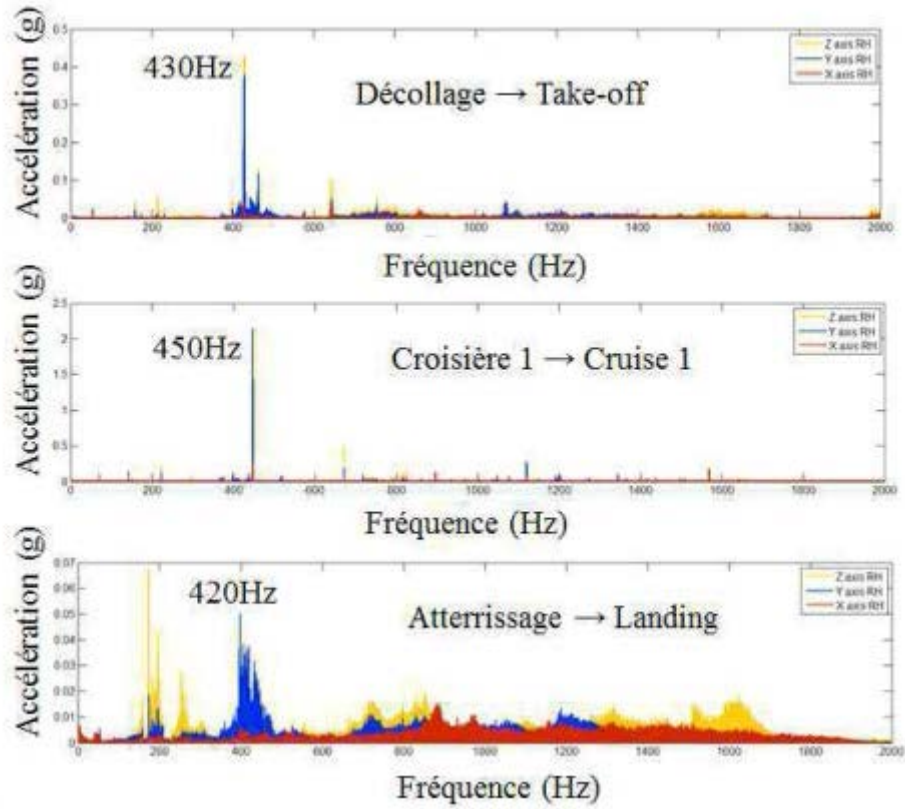


Figure 183. FFT signal de vibration

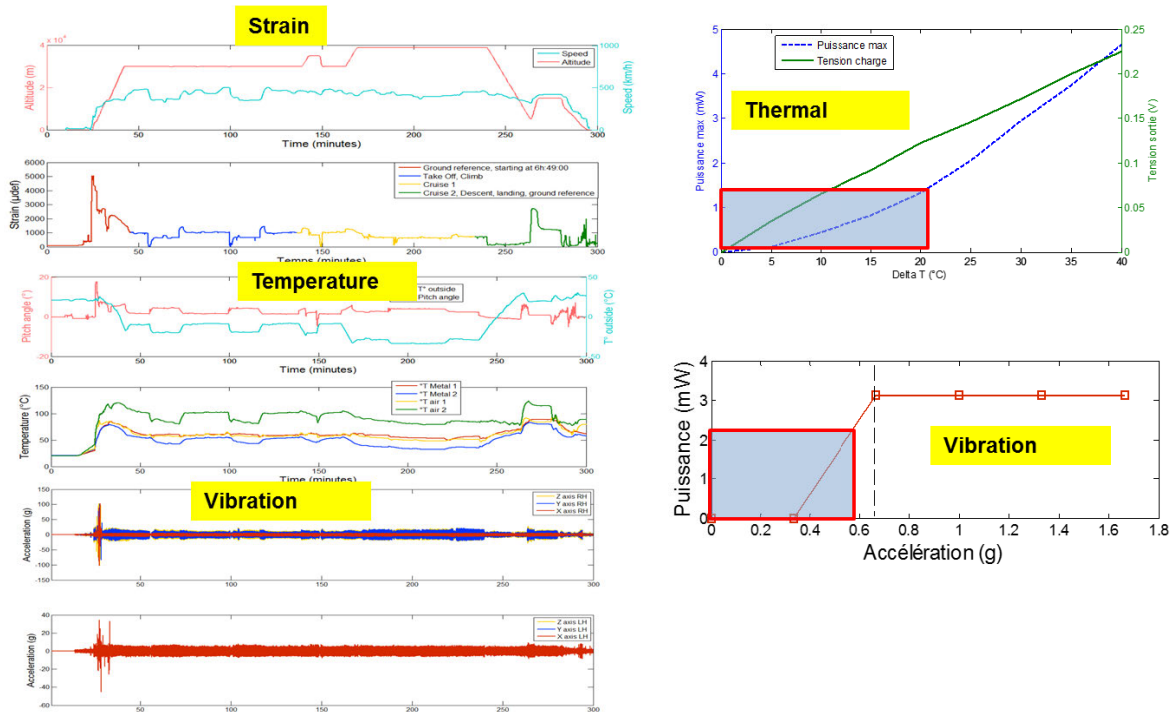


Figure 184. Estimation des puissances récupérables

## 1.7. Synthèse du projet et axe d'optimisation

L'ensemble des travaux ont permis de déboucher sur le développement et la validation de briques technologiques avec des niveaux de maturité important.

Les microgénérateurs sont une brique technologique importante pour l'introduction de systèmes de capteurs autonome sans fil dans les applications aéronautiques. De nombreuses études prospectives prévoient une très importante croissance du marché de ces systèmes autonomes et des récupérateurs d'énergie ambiante associés : tous secteurs applicatifs confondus, les volumes financiers anticipés atteignent des milliards d'euros à l'horizon 2020 pour l'ensemble des composants (transducteurs, stockage, gestion et conversion de l'énergie).

Pour ne considérer que l'aéronautique, il est certain que si les attentes sont là aussi nombreuses, les applications à court terme porteront sur des scénarios dans lesquels la sécurité des vols d'aéronefs transportant des passagers n'est pas impliquée. En effet, la fiabilité à la fois du système de gestion de l'énergie, mais aussi celle du système alimenté, devra présenter un niveau très élevé.

En termes d'énergie ambiante récupérable et de charge à alimenter, les situations sont extrêmement diverses. Toutefois des similitudes architecturales existent. Il en est de même dans le processus de développement qui nécessairement incorporera une étape d'identification et de caractérisation des énergies ambiantes disponibles, une détermination du profil de consommation de la charge (profil de mission) et enfin, avant tout choix définitif, une étude de faisabilité avec éventuellement une adaptation du scénario d'usage lorsque la demande énergétique excèdera ce qui pourra être fourni afin de parvenir à l'équilibre illustré en Figure 185.

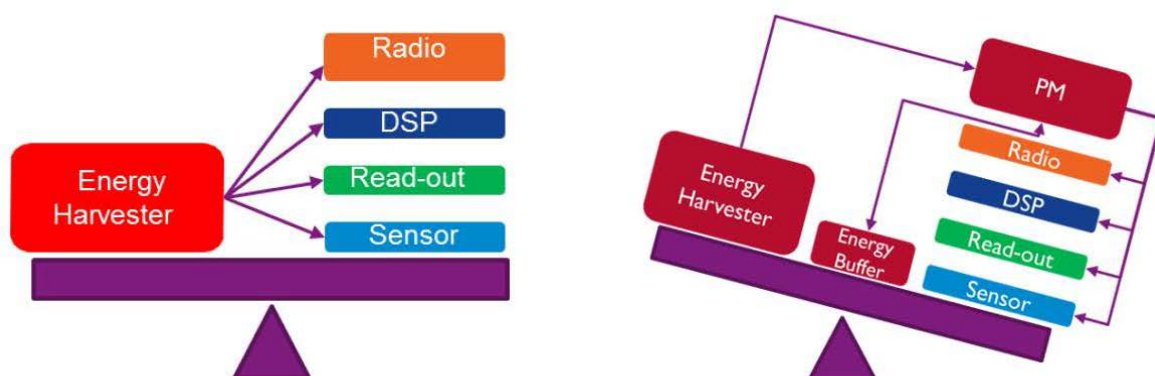


Figure 185. Bilan énergétique

Vis-à-vis de l'application majeure présentée dans ce chapitre (SHM) il est certain que la récupération d'énergie pour systèmes sans fil, une maturité plus grande des technologies (non seulement des techniques de récupération d'énergie, mais également de tous les éléments de la chaîne) est sans doute requise pour un usage opérationnel du SHM sans fil et sans batterie.

En parallèle des travaux sur la récupération d'énergie dans le cadre du projet EPICE, des travaux de recherche ont été effectués ou de concept de micro-générateurs tourants pour des applications roulement. Un résumé des travaux est disponible en Anne 3.

## Chapitre 2 : Capteur de température sans fil

### 3.1. Introduction

Conçu pour casser le paradigme de l'efficacité, la prochaine génération de moteurs d'avion promet des réductions de carburant à deux chiffres, ainsi qu'une amélioration sans équivalent des émissions et un faible niveau de bruit pour atteindre les objectifs des moteurs durables et verts du programme SAGE dans CleanSky. Pour atteindre ces sauts significatifs dans l'efficacité thermodynamique et propulsive de la prochaine génération de moteurs, la génération émergente de moteurs d'aéronef à deux ou deux voies utilise une gamme innovante de nouveaux matériaux et technologies en conception. Ils sont également conçus pour fonctionner à des niveaux de pression et de température jamais vus en service commercial et proposent pourtant les mêmes niveaux de fiabilité et de durées de vie que les turbofans de génération actuelle.

Relever le défi de ces objectifs du point de vue de l'ingénierie des roulements signifie une augmentation de la vitesse et des capacités des contrainte de contact pour les roulements de rotor principal. Comme on peut le voir sur la figure 1, les vitesses de du rotor principal de moteur d'aéronef (caractérisé par l'indice de vitesse du palier ( $d_m \times n$ ), qui est le diamètre moyen du palier  $d_m$  en mm multiplié par la vitesse d'arbre de rotation  $n$  en r / min, ont augmenté de façon continue avec le temps, et il n'y a aucune raison de croire que cette tendance ne se poursuivra pas à l'avenir pour améliorer encore la performance, la fiabilité et l'économie du futur moteur d'avion.

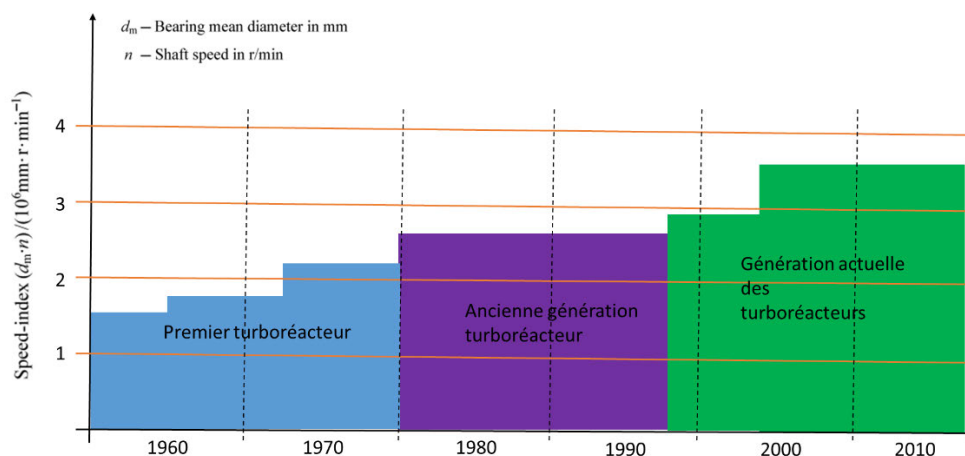


Figure 186. Evolution des indices NdM des roulements pour le secteur des moteurs d'avions

La haute vitesse et la température associées à la nécessité de composants à faible poids sont combinés avec un environnement d'exploitation avec des produits d'échappement corrosifs, une contamination de l'huile par des débris et des contraintes cycliques et vibratoires élevées. Les roulements sont des composants clés dans les turbomoteurs. De manière générale plus de 10 paliers (roulements à billes et à rouleaux) sont positionnés le long de l'arbre principal pour supporter la charge et assurer la rigidité. Ils sont conçus pour supporter des charges importantes tout en offrant des mouvements de rotation à faible frottement et nécessitant des tolérances strictes devant durer sur des millions de cycles de stress sans défaillance. Lors de la rotation à 20 000 rev / min, un roulement contenant 20 éléments roulants fonctionnera sur 5 et 10 cycles de contraintes avant qu'une inspection ne soit réalisée (équivalent à 5 000 FH). La fiabilité d'un moteur aéronautique moderne est très élevée, malgré des conditions de fonctionnement très exigeantes. Les roulements fonctionnent de manière fiable à des indices de vitesse jusqu'à environ  $2,8 \times 10^6$  et cette limite a été augmentée à environ  $3,2 \times 10^6$  pour les nouveaux moteurs entrant en service sur de nouveaux avions au cours des dernières années.

Les besoins actuels de l'industrie aéronautique exigent une plus grande densité de puissance, une durée de vie accrue, une robustesse et une fiabilité accrues dans le but d'un « design pour la vie », ce

qui signifie une durée de vie utilisable pendant toute la durée de vie d'un moteur d'avion ou d'un autre système avec un entraînement pour réduire les cycles de développement pour l'introduction de nouveaux systèmes ou de nouvelles technologies. Pour répondre à ces exigences, l'optimisation des propriétés des matériaux et le développement de nouveaux matériaux pour les roulements resteront un défi continu à être développés à l'avenir. Cependant, cela ne peut être réalisé que s'il existe une connaissance précise des conditions réelles et de fonctionnement, ce qui nécessite l'introduction de technologies de surveillance innovantes. La chaleur induite par la friction est l'un des principaux facteurs limitant la vitesse nominale des roulements à grande vitesse. Outre le fait que des températures de palier excessives peuvent conduire à la déformation ou à la destruction des composants de palier, la chaleur induite par le roulement affecte également le comportement de fonctionnement de l'arbre et de la machine. En outre, les roulements avec un petit angle de contact, qui est nul pour les roulements à rouleaux cylindriques, ont tendance à se rigidifier si la dilatation thermique radiale de la bague intérieure excède largement celle de la bague extérieure. La surveillance de la température des paliers avec des thermocouples a été utilisée pendant de nombreuses années. Dans des conditions de fonctionnement stables, la température d'une machine est surveillée, les changements pouvant indiquer un problème. L'expérience a montré que la température est un bon indicateur de charge, de vitesse ou de lubrification que de santé des roulements. Une augmentation de température peut avertir de conditions de panne, telles que la surcharge et une mauvaise lubrification. Le risque de défaillance peut être diminué si ces conditions sont identifiées et corrigées. Cependant, les défauts des roulements doivent être à un stade avérés pour entraîner une augmentation appréciable de la température.

La température de fonctionnement des roulements dans un système mécanique est déterminée par la quantité de chaleur générée dans le roulement et la quantité de chaleur qui est transférée ou éloignée du roulement. Le système dans lequel les roulements sont utilisés peut-être très complexe. Cependant, le principe de l'analyse de la température reste le même. Le principe repose sur la loi de conservation de l'énergie, connue sous le nom de première loi de la thermodynamique, et sur les équations de débit du transfert de chaleur. La perte de puissance due à la force traîne aérodynamique agissant sur les éléments roulants reste difficile à estimer en raison du mouvement d'huile complexe dans le roulement. Historiquement, il a été déterminé de manière empirique afin que les pertes de puissance globales calculées soient ajustées aux données expérimentales. Cela explique pourquoi, de nos jours, il existe toujours un écart quant à la prise en compte ou non des forces de traction hydrodynamique.

Pour évaluer le niveau de température auquel un roulement fonctionne, la chaleur générée et la chaleur transférée durant les phases de fonctionnement doivent être déterminées. Les problèmes liés à la chaleur sont la cause principale de défaillance de roulements dans les applications à grande vitesse. Une analyse thermique avec un outil de simulation est une étape importante dans les conceptions de tels systèmes. Pour le développement et la validation d'un modèle thermique, il est nécessaire de mesurer la température du roulement. Cependant, il existe peu de données de température de roulement mesurée à grande vitesse, en particulier la température des bagues sur les parties tournantes. Dans un palier, pendant la rotation, la chaleur est générée aux points de contact entre les billes / rouleaux et les chemins de roulement. En raison de l'inertie thermique, il faut un certain temps pour que cette énergie atteigne les capteurs positionnés à l'extérieur de la machine. Un bon endroit pour une mesure de température provoquée par la friction serait sur la cage. La cage est à l'intérieur du roulement et est une partie tournante, de sorte que les solutions câblées présentent un problème majeur d'accessibilité. Les solutions sans fils sont pertinentes, mais doivent respecter des contraintes de coût.

Les capteurs de température sans fil pour la surveillance de la santé des roulements ont démontré leur capacité à mesurer les températures sur les parties tournantes. Le principe de ce capteur est basé sur le changement de fréquence de résonance d'un circuit réservoir LC induit par la température. Un condensateur variable suivant la température est utilisé pour rendre la fréquence de résonance dépendante de la température. Ce principe de la mesure de température sur cages a été investigué par l'Université de Purdue depuis 1997. Grâce à un transfert de technologie entre l'université et SKF, SKF a décidé de redémarrer l'étude de ce concept de mesure au début de 2013 sur la base des derniers résultats de l'Université de Purdue.

### 3.2. Principe de fonctionnement

Dans sa forme la plus simple (Figure 187), le système est composé d'un circuit primaire qui comporte une source de tension sinusoïdale associée à une bobine. Il est associé à un circuit secondaire qui consiste en une autre bobine et un condensateur. Lorsqu'ils sont mis côte à côte, le circuit secondaire commence à générer de l'énergie à partir du primaire à une fréquence dépendant de la bobine et du condensateur, la fréquence de résonance. A cette fréquence, l'impédance combinée du condensateur et de la bobine s'approche de zéro et mettent le circuit primaire en un court-circuit. Selon la distance entre les bobines primaires et secondaires, l'énergie est dissipée dans le secondaire. La fréquence et les valeurs d'énergie absorbée peuvent être lues à partir du circuit primaire.

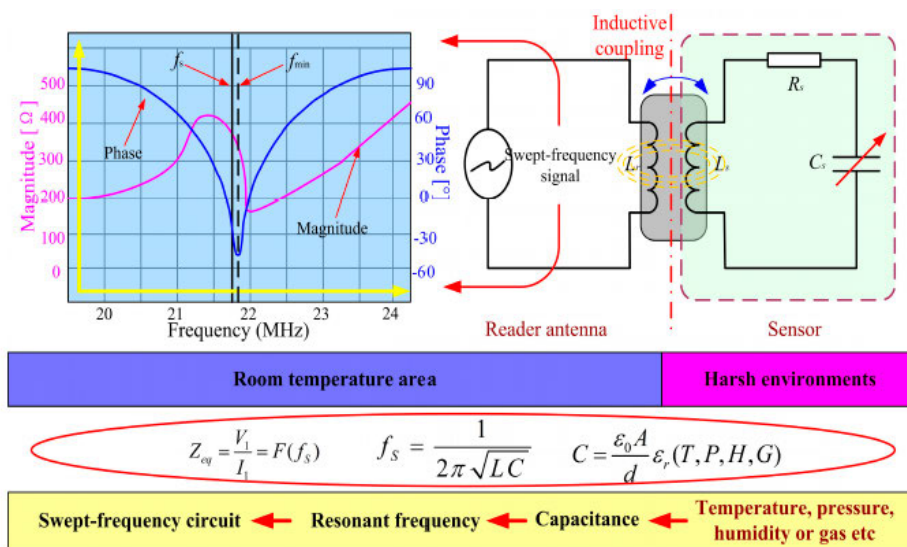


Figure 187. Principe de fonctionnement capteur de température sans fil

Le système de détection fonctionne sur la base de l'oscillation électronique, plus pratiquement appelée la baisse de fréquence. Un oscillateur électronique à course libre émet de l'énergie à travers une bobine (circuit primaire). Lorsqu'un autre circuit de bobine et de condensateur (circuit secondaire) est placé à côté du primaire, le circuit secondaire commence à générer de l'énergie à partir du primaire à une certaine fréquence. Outre tous les autres paramètres, la fréquence dépend de la valeur du condensateur du circuit secondaire. En sélectionnant un condensateur sensible à la température, la température du circuit secondaire peut être mesurée à partir du circuit primaire. Pour l'application, le circuit secondaire est intégré à la cage (Figure 189), tandis que le joint du roulement est utilisé comme bobine du circuit primaire. Le concept est présenté en Figure 188.

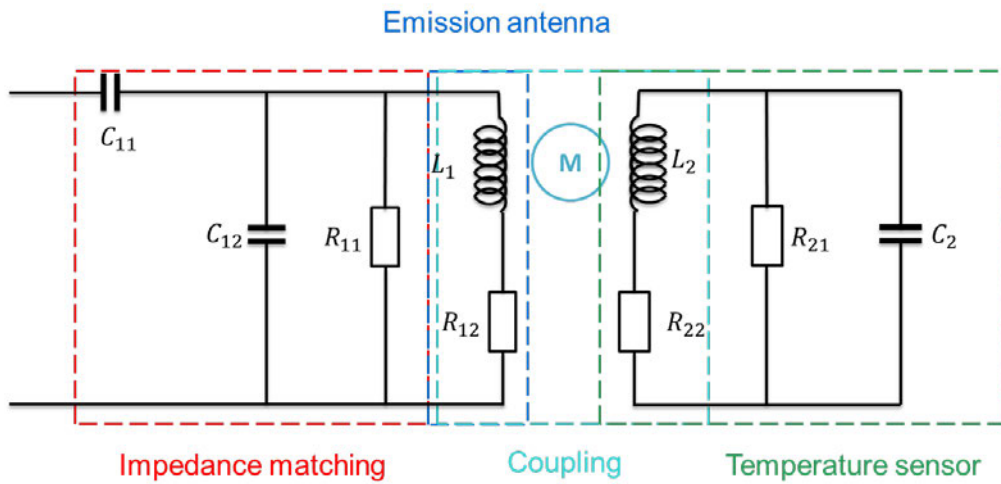


Figure 188. Circuit du capteur



Figure 189. Circuit secondaire sur la cage

Le système développé est une preuve de concept de ce principe de mesure. Il est présenté en Figure 190

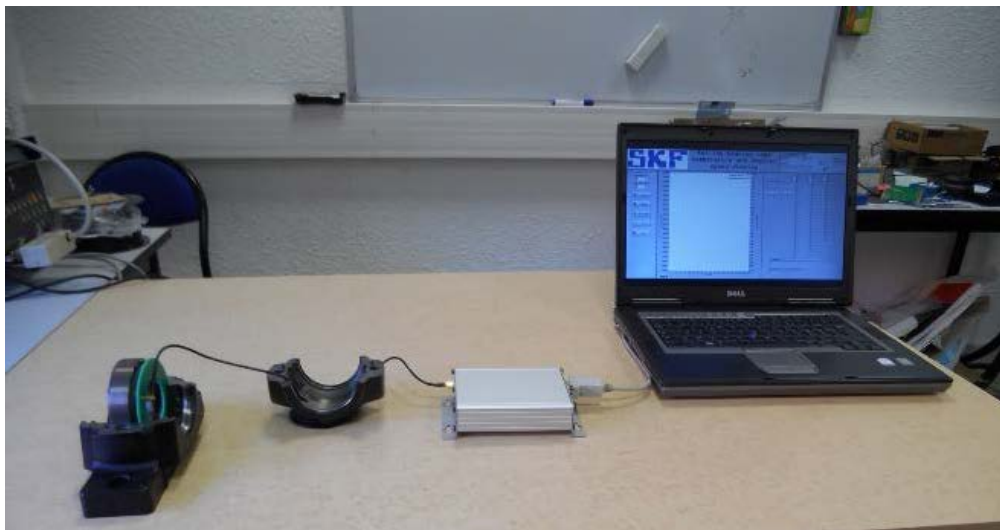


Figure 190. Système de mesure

### 3.3. Circuit de mesure au primaire

#### 3.3.1. Architecture

Le schéma de la Figure 293 illustre les différents blocs nécessaires au fonctionnement du dispositif :

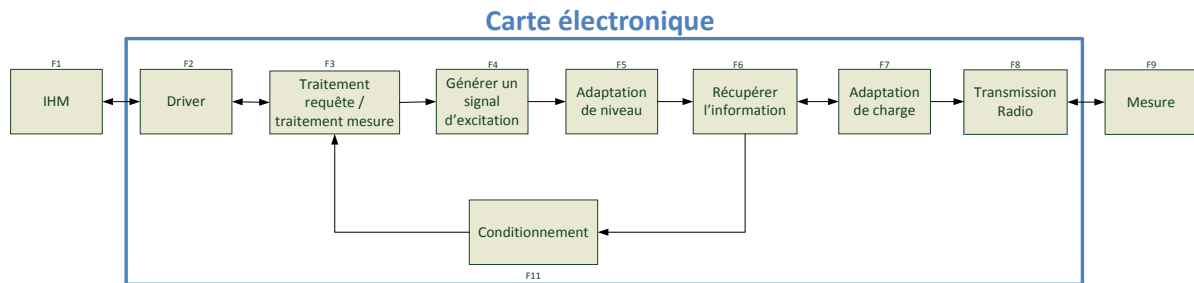


Figure 191. Architecture de la carte

Une contrainte dans le dimensionnement de l'électronique concerne un point de fonctionnement à 75°C. Les prochains paragraphes s'attacheront à détailler le dimensionnement et fonctionnement des différentes sous-fonctions.

#### 3.3.1. Choix des composants

Le schéma ci-dessous représente l'architecture du système sous forme de blocs de composant. Chaque fonction décrite précédemment a été remplacée par le composant qui doit remplir la fonction :

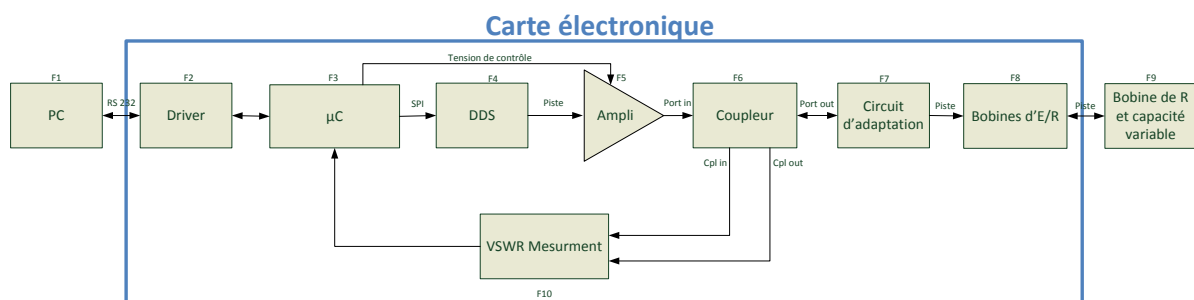


Figure 192. Composants de la carte

#### **Rôle des blocs de l'architecture :**

F1 : Le pc est l'unité de contrôle principale de la chaîne d'acquisition car il héberge l'IHM qui prend les décisions et configure les prises de mesure.

F2 : Le driver permet d'interfacer le PC et la carte cible car les niveaux de signaux ne sont pas les mêmes.

F3 : Le microcontrôleur joue un rôle central dans la chaîne d'acquisition car il joue le rôle de chef d'orchestre. Il doit contrôler la DDS, le gain de l'amplificateur, convertir le signal transmis par le VSWR mètre, faire la conversion fréquence de résonance/température et communiquer avec le PC.

F4 : La DDS programmée par le microcontrôleur permet d'effectuer un balayage fréquentiel utile pour la détection de fréquence de résonance.

F5 : En sortie de la DDS il faut amplifier le signal pour récupérer une quantité de signal réfléchi (au niveau du circuit primaire) détectable par la chaîne de mesure



F6 : Le coupleur permet à la fois d'envoyer le signal vers le primaire et aussi, grâce aux propriétés des lignes de transmission, de récupérer une partie du signal réfléchi.

F7 : Le circuit d'adaptation permet de régler l'impédance du primaire afin d'optimiser l'impédance vu par le générateur.

F8/F9 : La bobine d'émission excite le circuit secondaire : le capteur. Cette excitation provoque une variation d'impédance au primaire et c'est ce que l'on souhaite mesurer.

F10 : La mesure de VSWR permet d'obtenir la différence de gain qu'il y a entre les ports 3 et 4 du coupleur. En calculant cette différence sur un domaine spectral choisi, on peut distinguer un minimum/maximum qui sera utile pour la prise de mesure.

## 1. Le driver

La liaison entre le PC hôte de l'IHM et le microcontrôleur se fait via un bus RS232 qui est un standard pour la communication série. Comme expliqué précédemment les signaux envoyés par le PC ne sont pas directement compatibles avec ce que peut accepter le microcontrôleur. Il est donc nécessaire d'utiliser un driver pour interfacier le PC et le microcontrôleur. Ce driver convertit les signaux de la liaison RS232 (Tx, Rx, RTS et CTS) en signaux appropriés à l'entrée UART du microcontrôleur (Tx, Rx). Le choix est fait d'utiliser un driver MAX232, couramment utilisé dans ce genre d'application.

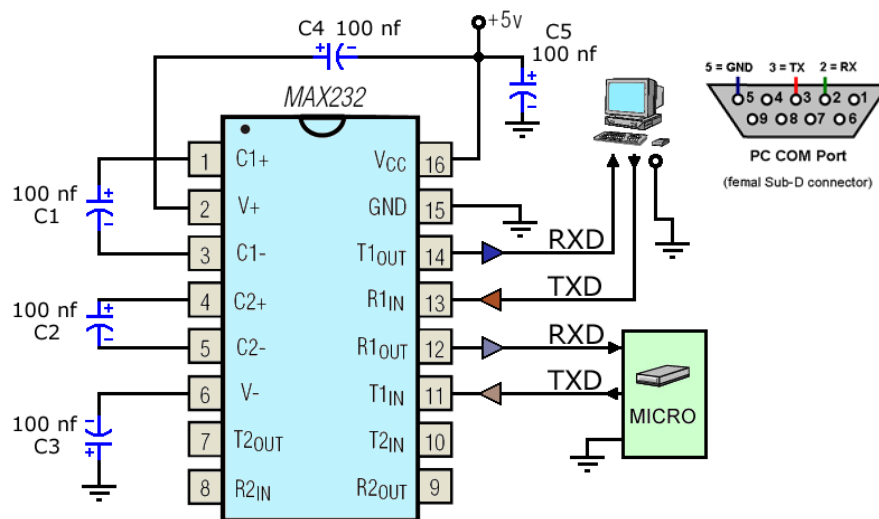


Figure 193. Câblage du driver

## 2. Le microcontrôleur

Le microcontrôleur traite les requêtes IHM et les données provenant du VSWR mètre, contrôle la DDS et le gain de l'amplificateur. Il doit comporter une entrée UART pour s'interfacier avec le Driver et recevoir les signaux Tx et Rx venant de l'IHM ainsi qu'un module SPI pour s'interfacier avec la DDS et la piloter. Il doit aussi comporter un ADC pour les signaux venant du module de mesure du VSWR et un DAC pour contrôler le gain de l'amplificateur.

Le microcontrôleur retenu est le STM32F091 car il répond à ses critères avec les caractéristiques suivantes (Tableau 11) :

Caractéristiques	Caractéristiques STM32F091
Périphériques de communication	2 SPI (18 Mbit/s) Jusqu'à 8 UART 2 I <sup>2</sup> C CAN
Conversion Numérique-Analogique	1 Convertisseur 12 bits (2 sorties)
Conversion Analogique-Numérique	1 Convertisseur 12 bits (1MSPS jusqu'à 16 entrées)
Rapidité	Cœur 48MHz
Nombre de pins	48
Température de fonctionnement	-40 à +105 °C
Mémoire programme	256 Ko
Mémoire RAM	32 Ko

Tableau 11. Caractéristique du microcontrôleur

Ces caractéristiques sont suffisantes pour l'application et surtout sa rapidité de conversion de l'ADC est un avantage. En effet, chez Microchip les microcontrôleurs ont pour la plupart des ADC qui convertissent à une vitesse maximale de 500 KSPS, ce qui est deux fois moins rapide que le stm32. De plus, le STM32 possède un capteur de température interne qui peut être utile pour savoir si la température de la carte est suffisamment élevée pour apporter des erreurs de mesure.

### 3. La DDS

La DDS est un composant programmable capable de générer un signal de fréquence variable en divisant la fréquence d'un signal de référence. La variation de fréquence fournie par une DDS est discrète, contrairement à un VCO (Voltage Controlled Oscillator) qui fournit un signal de variation fréquentielle continue si son signal d'excitation est continu. La DDS a été retenue parce que notre système d'acquisition est discret : il faut que les conditions de fonctionnement soient maintenues un certain temps pour que le système ait le temps d'acquérir les informations.

La fréquence en sortie de la DDS sera transmise jusqu'à la bobine primaire et c'est le microcontrôleur qui enverra un signal à la DDS afin de faire varier cette fréquence d'excitation.

Afin de réaliser une modulation discrète d'une dizaine de mégahertz, correspondant au domaine spectral de notre application, il faut choisir une DDS capable de fournir une fréquence de cette valeur. La fréquence maximale en sortie d'une DDS est égale à la moitié de sa fréquence de référence. Dans notre cas une DDS fonctionnant à une soixantaine de mégahertz conviendrait. C'est le cas de la DDS AD9850, qui peut fonctionner avec une fréquence de référence de 125Mhz et donc fournir une fréquence maximale de 62.5Mhz. De plus son incrément fréquentiel est dans le pire des cas, de 0.029Hz ce qui est très précis.



Figure 194. DDS

La DDS a besoin d'un signal d'horloge de référence qui peut être fournis par un Quartz ou par oscillateur à silicium, la contrainte principale étant la stabilité en température.

#### 4. La génération du signal d'horloge de la DDS

Comme dit précédemment il existe deux types d'oscillateur pouvant générer le signal d'horloge de la DDS : le Quartz et l'oscillateur à silicium.

Le quartz est un composant oscillant à une fréquence stable lorsqu'il est stimulé électriquement. Ses propriétés piézoélectriques permettent d'obtenir des fréquences d'oscillation très précises. Il peut donc servir de base de temps en électronique, et dans notre cas fournir le signal d'horloge de référence à la DDS.

Le principal inconvénient du Quartz est que sa fréquence d'oscillation varie en fonction de la température.

L'oscillateur à silicium comporte une mesure de température et une compensation de ses effets sur la fréquence d'oscillation. Il garantit ainsi une fréquence d'oscillation fixe quelle que soit la température. Ce type d'oscillateur semble donc être le plus adapté.

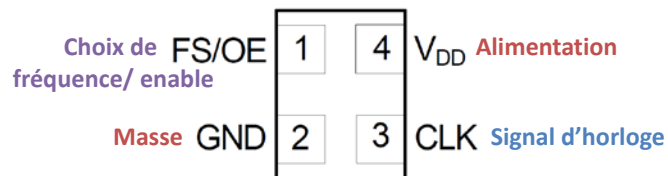


Figure 195. Oscillateur à silicium

#### 5. L'amplificateur contrôlé en tension

L'amplificateur contrôlé en tension a un gain variable en fonction de la tension de commande qui lui est appliquée. Il permet d'adapter le niveau de tension appliqué à la bobine primaire et donc le niveau de tension récupéré en sortie du coupleur. Celui-ci doit avoir un produit Gain Bande supérieur à 100MHz, un Slew Rate supérieur à 606 V/μs pour pouvoir générer un signal triangulaire symétrique de 5V crête à 30 Mhz. L'amplificateur VCA824 convient. Il possède un slew rate de 2500V/μs et un produit gain bande de 320MHz.

Récapitulatif des caractéristiques minimales (Tableau 12) :

Caractéristiques	Caractéristiques Minimales	Caractéristiques du VCA824
Produit Gain Bande	100 MHz	320 MHz
Slew Rate	606 V/μs	2500 V/μs
Alimentation	+/-5 V	+/-5 V

Tableau 12. Caractéristiques de l'amplificateur

Ce composant n'est pas rail to rail, c'est pour quoi après cet étage nous mettrons un amplificateur à gain fixe pour qu'avec un signal d'amplitude maximale en sortie du VCA824 on obtienne un signal 10Vpp. Ceci est réalisé avec un amplificateur THS3061 monté en non inverseur avec un gain de 1.28.

## 6. Le coupleur

Le coupleur permet de mesurer un signal réfléchi, image d'une désadaptation de l'antenne primaire (couplée à l'antenne secondaire) ce qui permet de récupérer une information sur la température. Celui-ci doit fonctionner au minimum à 1 MHz et avoir une atténuation maximale de 20 dB entre l'entrée IN et CPL IN, et entre la sortie OUT et CPL OUT.

Le coupleur SYDC-20-61HP+ fonctionne de 200 KHz à 350 MHz et possède une bonne directivité<sup>2</sup> ( $\approx 40\text{dB}$ ) sur la plage 200KHz-175MHz qui permet d'obtenir une bonne isolation entre la voie CPL IN et CPL OUT. Ce qui est utile pour le composant de mesure de VSWR.

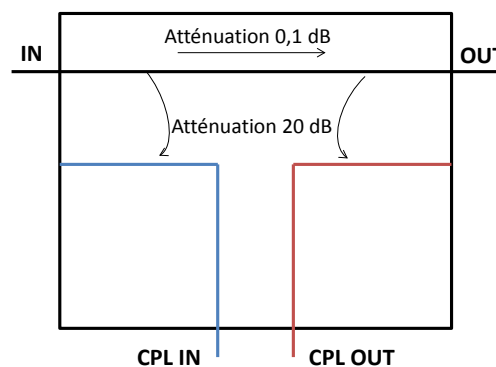


Figure 196. Coupleur

## 7. L'alimentation

La consommation des composants est répertoriée dans le tableau suivant :

Composant	Consommation max (mA)	Alimentation (Vdc)
VCA	2	+/-5
LMH6657	0.060 (3V dans 50k ADC)	+5
THS3061 <sup>3</sup>	145	+/-5
STM32	100	3.3
Oscillateur 150Mhz	30	3.3
Max 2016	50	3.3
Max 232	15	5
DDS AD9850	100	3.3
TOTAL	443	3.3 et +/-5

<sup>2</sup>  $10 \cdot \log(\text{Power\_CPLIN}/\text{Power\_CPLOUT})$

<sup>3</sup> Il y en a 2, mais un seul sera connecté pendant un essai

L'ensemble de la chaîne consomme en tout et au maximum 443 mA et nécessite des niveaux de tension de 3.3V, et +/-5V. Un convertisseur DC-DC 18Vdc → +/-5V +/-500mA sera en entrée de la carte pour alimenter le circuit.

### 8. Le circuit d'adaptation

Le but est d'adapter à 50Ω la bobine primaire sans secondaire puis de mesurer une variation d'impédance lorsque le secondaire est présent. Comme l'impédance du secondaire sera variable en fonction de la température, l'impédance totale variera aussi et le coupleur mesurera une désadaptation.

La sélectivité d'un filtre dépend de son facteur de qualité, plus le facteur de qualité est grand, plus il est sélectif et donc précis. Afin de fixer le coefficient de qualité on ajoute une résistance en parallèle de la bobine primaire. La valeur de cette résistance est fixée grâce à l'équation :

$$R11 = L1 * \omega c1 * Q1$$

Avec :

R11 la résistance d'adaptation

$\omega c1$  la pulsation d'adaptation souhaitée

Q1 le facteur de qualité souhaité

L1 l'inductance de la bobine primaire

Afin d'adapter la bobine primaire à une fréquence précise il est nécessaire d'ajouter un condensateur en parallèle de celle-ci et un en série avec l'ensemble. Ils seront choisis suivant les formules suivantes :

$$C12 = \frac{1}{5} * \frac{5 * R11 - \frac{1}{2} * L1 * \omega c1 * \sqrt{2 * R11 - 100}}{\omega c1^2 * R11 * L1}$$

$$C11 = - \frac{C12^2 * L1^2 * R11^2 * \omega c1^4 - 2 * C12 * L1 * R11^2 * \omega c1^2 + L1^2 * \omega c1^2 + R11^2}{L1 * R11^2 * \omega c1^2 * (L1 * C12 * \omega c1^2 - 1)}$$

Avec :

C12 la capacité parallèle d'adaptation

C11 la capacité série d'adaptation

R11 la résistance d'adaptation

$\omega c1$  la pulsation d'adaptation souhaitée

L1 l'inductance de la bobine primaire

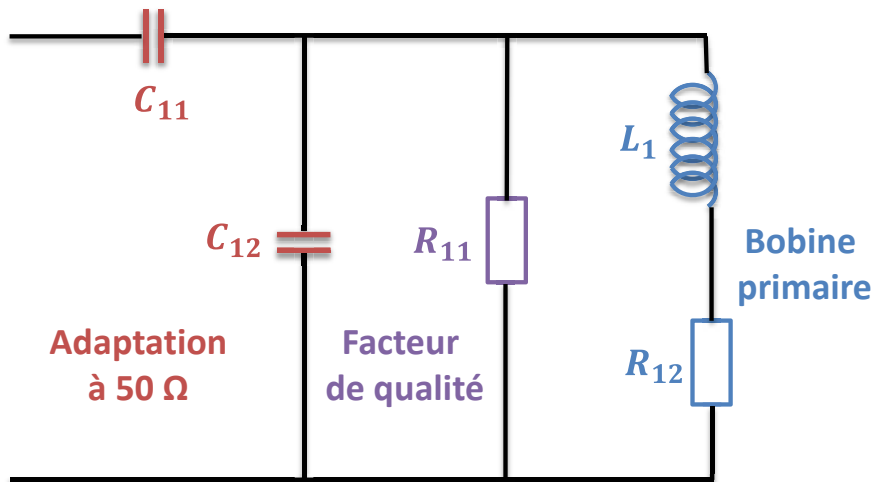


Figure 197. Circuit d'adaptation

Il est important que les capacités utilisées dans la réalisation de ce circuit d'adaptation soient peu sensibles aux variations de température. Il est préconisé d'utiliser des capacités de type COG ou de type NPO qui ont une variation de 1% de leur valeur nominale sur la plage -50 à +125 °C.

### 9. La bobine primaire

La bobine d'émission doit être dimensionnée de manière à avoir un transfert optimal d'énergie entre celle-ci et la bobine secondaire mais aussi en maximisant la désadaptation due à la température vue en sortie du coupleur. C'est-à-dire en maximisant la tension de la voie CPL OUT du coupleur.

Cette bobine sera dimensionnée en même temps que la bobine secondaire grâce à un code Matlab itératif maximisant la tension en sortie du coupleur.

Les paramètres permettant de faire varier l'inductance étant :

$N_1$  le nombre de spires

$r_1$  le rayon

$d_{fil1}$  le diamètre du fil

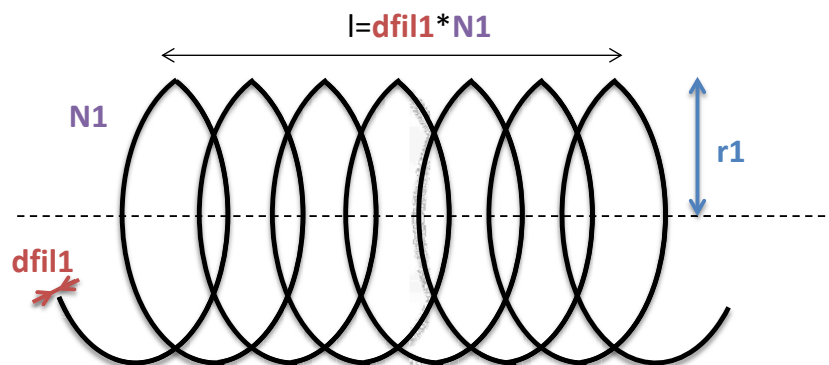


Figure 198. Bobine au primaire

## 10. Le module de mesure du VSWR

Ce module de mesure prend en entrée les signaux provenant des voies CPL IN et CPL OUT du coupleur, il les compare et donne en sortie le rapport entre les deux : module, et parfois leur déphasage. Afin d'avoir une bonne détection des variations sur CPL IN et CPL OUT il est nécessaire que le composant ait une bonne dynamique de mesure : au moins 60 dBm de dynamique et qui accepte les signaux de fréquence allant jusqu'à 30 MHz.

Deux composants conviennent à cette mesure :

AD8302 : mesure le module et la phase, 60 dBm de dynamique, fréquences allant jusqu'à 2.7 GHz

MAX2016 : mesure le module, 80 dBm de dynamique, fréquences allant jusqu'à 2.5 GHz

Dans notre cas seul le module est intéressant à mesurer car c'est lui qui donne une information sur la variation d'impédance (en module) et donc sur la variation de température. Le MAX2016 ayant une meilleure dynamique c'est lui qui sera retenu.

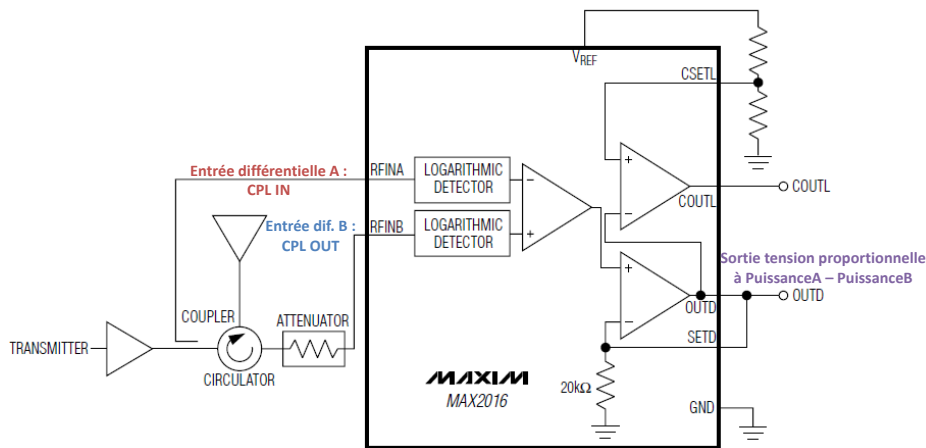


Figure 199. Module de mesure du VSWR

### 3.4. Circuit au secondaire

#### 3.4.1. Architecture du capteur

Ce schéma reprend la partie de l'architecture globale réalisée par le capteur :

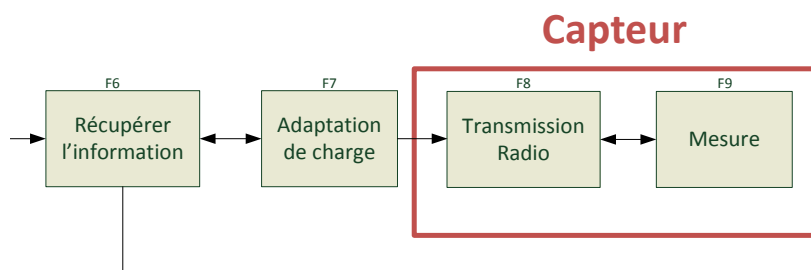


Figure 200. Architecture du circuit secondaire

Il est bien sûr possible de remplir chaque fonction grâce à un composant particulier respectant les contraintes définies dans le cahier des charges dont la température de fonctionnement (max 100°C) et la résistance à l'huile.

### 3.4.2. Le choix des composants

Le schéma ci-dessous représente l'architecture du système sous forme de blocs de composant. Chaque fonction décrite précédemment a été remplacée par le ou les composant(s) qui doit/doivent remplir la fonction :

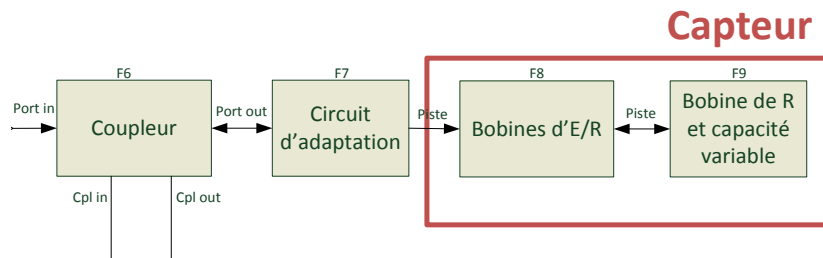


Figure 201. Composants du capteur

#### La bobine secondaire

Comme la bobine d'émission, la bobine de réception doit être dimensionnée de manière à avoir un transfert optimal d'énergie et à maximiser la désadaptation due à la température.

Cette bobine sera dimensionnée en même temps que la bobine primaire grâce au code Matlab cité précédemment. Les paramètres permettant de faire varier l'inductance étant :

N2 le nombre de spires

Dfil2 le diamètre du fil

Le rayon r2 est fixe et égal au grand rayon de la cage.

#### La capacité

Afin de mesurer la température il est nécessaire d'utiliser un composant dont les caractéristiques varient en fonction de la température. La veille technologique et les simulations menées par l'équipe ont déterminé qu'une capacité sensible à la température était le composant le plus approprié. Afin de respecter la plage de température fixée (-40 à +100 °C) et d'avoir des variations importantes autour de la valeur nominale la capacité utilisée aura un diélectrique de type X7R.

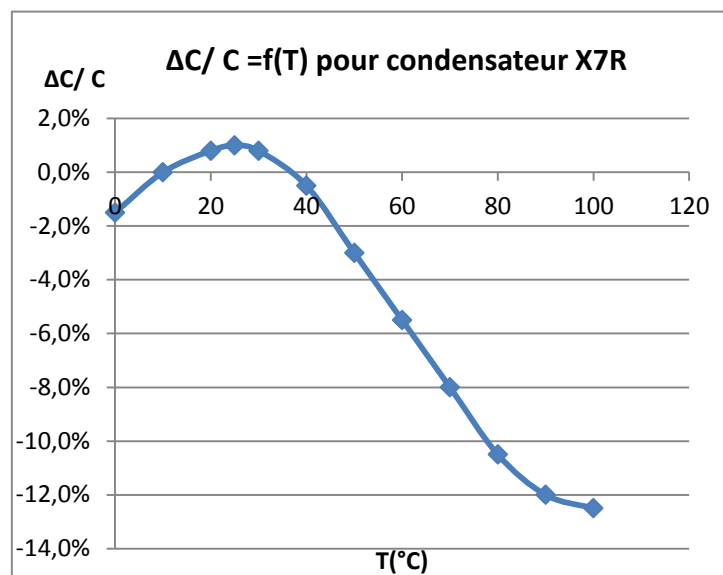


Figure 202. Variation  $\Delta C/C$  d'une capacité X7R



La valeur nominale de cette capacité sera fixée en fonction de la fréquence de résonance souhaitée au secondaire :

$$C_0 = \frac{1}{\omega C_2^2 * L_2}$$

Avec :

$C_0$  la valeur nominale de la capacité  $C_2$  du secondaire

$\omega C_2$  la pulsation d'adaptation souhaitée

$L_2$  l'inductance de la bobine secondaire

Les variations de température provoqueront une variation de la valeur de  $C_2$  et donc une variation de la fréquence de résonance du circuit secondaire mais aussi une variation de son impédance. Ces variations se répercuteront par couplage sur l'ensemble circuit primaire et circuit secondaire et donc seront observables en sortie du coupleur. Il sera alors possible de mesurer un minimum de tension réfléchi à une fréquence donnée correspondant à une température donnée. Ainsi en connaissant la fréquence lorsque la tension réfléchi est minimale il sera possible, grâce à un algorithme, de remonter à l'information de température.

### Le choix du coefficient de qualité

Afin de fixer le coefficient de qualité on ajoute une résistance en parallèle de la bobine secondaire. La valeur de cette résistance est fixée grâce à l'équation :

$$R_{21} = L_2 * \omega C_2 * Q_2$$

Avec :

$R_{21}$  la résistance d'adaptation

$\omega C_2$  la pulsation d'adaptation souhaitée

$Q_2$  le facteur de qualité souhaité

$L_2$  l'inductance de la bobine primaire

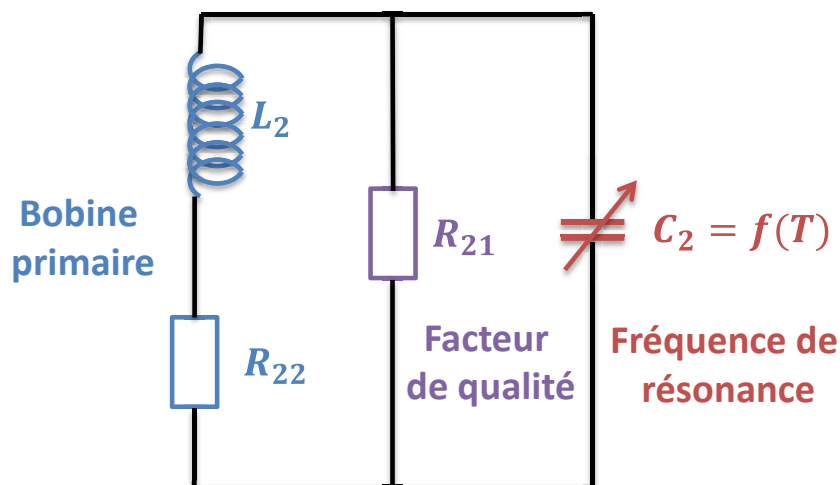


Figure 203. Capteur

### 3.3. Modélisation et validation

Afin de maîtriser le phénomène d'induction et de maîtriser le circuit les couplages ont été étudié à partir des simulations sous P-Spice et Matlab.

Une première étude a permis de déterminer la structure des circuits primaires et secondaires. Le choix a été fait d'adapter le circuit primaire à une impédance de 50 Ω puis de mesurer la désadaptation qu'il subit en présence du circuit secondaire. Le circuit secondaire étant sensible à la température, la désadaptation varie en fonction de celle-ci. Cette désadaptation a été mesurée grâce à un coupleur.

#### 3.3.1. Schématisation de l'ensemble

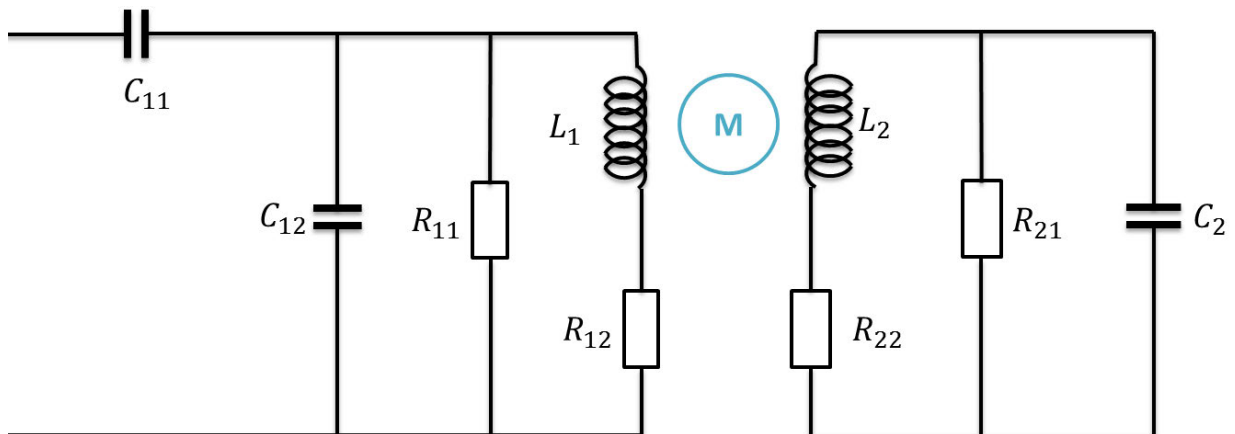


Figure 204. Primaire et secondaire couplé

Avec :

- L1 et R12 les caractéristiques de l'antenne d'émission
- C11 et C12 les capacités d'adaptation de l'antenne d'émission
- R11 la résistance permettant d'élever le facteur de qualité
- L2 et R22 les caractéristiques de l'antenne secondaire
- C2(T=0°C) la capacité permettant de choisir la fréquence de résonance du secondaire
- R21 la résistance permettant d'élever le facteur de qualité

On définit M l'inductance mutuelle telle que :

$$M = \frac{\mu \cdot \pi \cdot N1 \cdot N2 \cdot (r1 \cdot r2)^2}{2(r1^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (11)$$

Avec :

- $\mu$  : perméabilité magnétique
- r1 et r2 : rayon des spires primaire et secondaire (en m)
- N1 et N2 : nombre de spires au primaire et au secondaire
- d : distance entre les deux bobines

Il est possible de modéliser le couplage de la manière suivante :

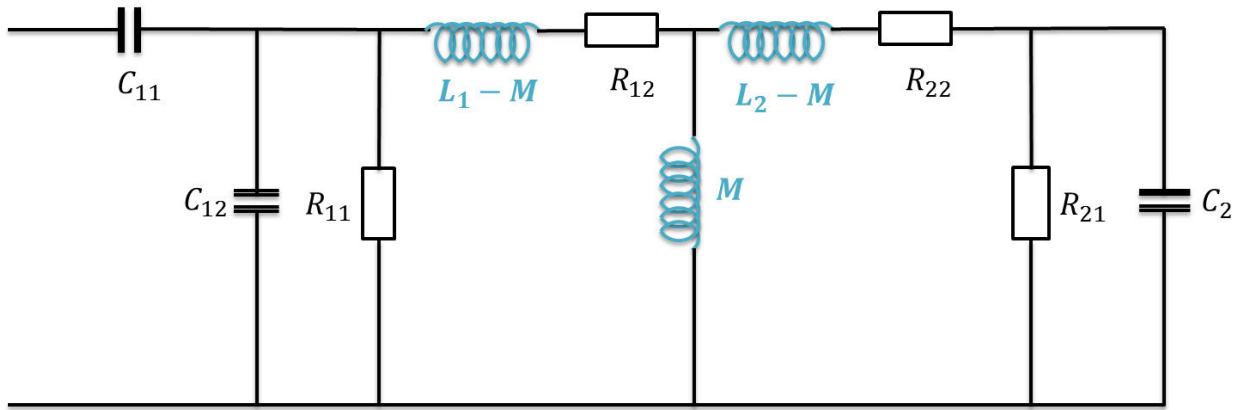


Figure 205. Schéma équivalent primaire et secondaire couplé

Le fait de représenter le circuit de cette manière permet de calculer de manière plus rapide l'impédance équivalente des circuits couplés puisque l'induction mutuelle est directement prise en compte dans l'expression des inductances équivalentes. La validité de ce modèle et des équations associées a été vérifié par comparaison à un autre simulateur (P-Spice).

### 3.3.2. Mise en équation

Comme expliqué précédemment le but est de mesurer une désadaptation de l'antenne primaire couplé à l'antenne secondaire. Pour cela il faut donc calculer l'impédance totale et la comparer à 50  $\Omega$ . Cette impédance équivalente a été calculée sous forme de fonction de transfert dans Laplace, ce qui permet d'étudier son comportement fréquentiel.

Le calcul a été réalisé en plusieurs étapes :

- La mise en parallèle de R21 et C2 : ensemble 1
- La mise en série de l'ensemble 1, L2-M et R22 : ensemble 2
- La mise en parallèle de l'ensemble 2 et de M : ensemble 3
- La mise en série de l'ensemble3, L1-M et R12 : ensemble 4
- La mise en parallèle de l'ensemble 4, C12 et R11 : ensemble 5
- La mise en série de l'ensemble 5 et de C11

L'ensemble des calculs ont été réalisé à la main puis avec le logiciel Maple afin d'être sûr du résultat obtenu.

$$Z_{eq}(p) = \frac{num4 * p^4 + num3 * p^3 + num2 * p^2 + num1 * p + num0}{den5 * p^5 + den4 * p^4 + den3 * p^3 + den2 * p^2 + den1 * p + den0} \quad (12)$$

Avec:

$$num4 = (C11 + C12) * C2 * R11 * R21 * (L1 * L2 - M^2) + C12 * C2 * L1 * L2 * R11 * R21 - C12 * C2 * M^2 * R11 * R21$$

$$num3 = (C11 + C12) * C2 * R11 * R21 * (L1 * R22 + L2 * R12) + (C11 + C12) * R11 * (L1 * L2 - M^2) + C2 * R21 * (L1 * L2 - M^2)$$

$$num2 = (C11 + C12) * C2 * R11 * R12 * R21 * R22 + (C11 + C12) * R11 * [L1 * (R21 + R22) + L2 * R12] + C2 * R21 * [L2 * (R11 + R12) + L1 * R22] + (L1 * L2 - M^2)$$

$$num1 = (C11 + C12) * R11 * R12 * (R21 + R22) + C2 * R21 * R22 * (R11 + R12) + L1 * (R21 + R22) + L2 * (R11 + R12)$$

$$num0 = (R11 + R12) * (R21 + R22)$$

$$\begin{aligned}
den5 &= C11 * C12 * C2 * R11 * R21 * (L1 * L2 - M^2) \\
den4 &= C11 * [C12 * C2 * R11 * R21 * (L1 * R22 + L2 * R12) + (C12 * R11 + C2 * R21) * (L1 \\
&\quad * L2 - M^2)] \\
den3 &= C11 * [C12 * C2 * R11 * R12 * R21 * R22 + C12 * R11 * [L1 * (R21 + R22) + L2 * R12] \\
&\quad + C2 * R21 * [L1 * R22 + L2 * (R11 + R12)] + L1 * L2 - M^2] \\
den2 &= C11 * [C12 * R11 * [R12 * (R21 + R22) + R21 * R22] + C2 * R12 * R21 * R22 + L1 \\
&\quad * (R21 + R22) + L2 * (R11 + R12)] \\
den1 &= C11 * (R11 + R12) * (R21 + R22) \\
den0 &= 0
\end{aligned}$$

Le modèle prendra comme entrée une valeur ou un vecteur de valeurs de toutes les dimensions géométriques citées précédemment ( $r1$ ,  $d_{fil1}$ ,  $N1$ ,  $d_{fil2}$  et  $N2$ ), les données pour l'adaptation ( $wc1$ ,  $Q1$ ,  $wc2$  et  $Q2$ ) et la distance  $d$  entre les bobines en unité SI et calculera toutes les valeurs de composant correspondantes ( $L1$ ,  $R12$ ,  $L2$ ,  $R22$ ,  $C11$ ,  $C12$ ,  $R11$ ,  $C2$ ,  $R21$ ), la valeur de la mutuelle inductance  $M$  et la valeur de l'impédance équivalente totale.

Le modèle aura aussi en entrée un vecteur  $f$  qui représente la plage de fréquence sur laquelle on veut effectuer la simulation, le vecteur de pulsation  $w$  associé sera directement calculé : lorsque l'on paramètre le vecteur  $f$  il est important de vérifier que les valeurs de  $wc1$  et  $wc2$  seront comprises dans le vecteur  $w$ .

### 3.3.3. Ajout du coupleur

Le coupleur sert à mesurer la désadaptation de l'antenne primaire (couplée à l'antenne secondaire) ce qui permet de récupérer une information sur la température. On l'alimente sur la voie IN et on branche le circuit primaire sur la voie OUT. On peut ensuite observer une tension image de la tension d'entrée sur la voie CPL IN et une tension image de la désadaptation sur la voie CPL OUT. C'est donc le signal mesuré sur la voie CPL OUT qui nous intéresse et c'est lui que nous allons calculer.

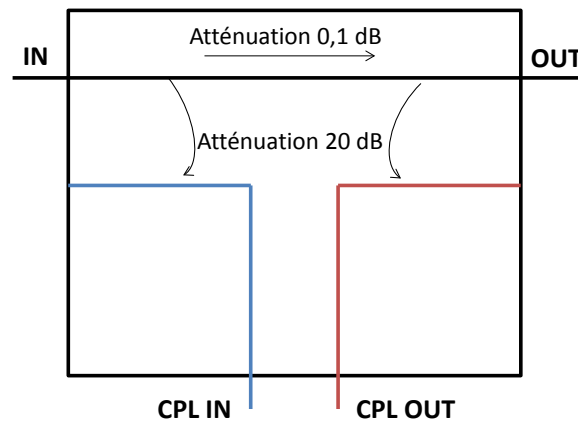


Figure 206. Coupleur

A noter : entre chacune des voies du coupleur il y a des atténuations de signaux, celles-ci sont toutes prises en compte dans les équations suivantes.

Tout d'abord il est nécessaire d'introduire la notion de coefficient de réflexion : celui-ci représente la désadaptation de l'antenne par rapport à l'impédance de référence ( $50 \Omega$ ), la tension mesurée en sortie du coupleur est proportionnelle à ce coefficient.

$$\Gamma = \frac{Z_{eq} - 50}{Z_{eq} + 50} \quad (13)$$

Avec :

- $Z_{eq}$  le module de l'impédance équivalente
- 50 l'impédance de référence
- $\Gamma$  le coefficient de réflexion

Comme exprimé précédemment il y a une atténuation du signal entre les voies IN et OUT (0.09dB soit un coefficient d'atténuation de  $10^{-\frac{0.09}{20}}$  puis entre les voies OUT et CPL OUT (19.98dB soit un coefficient d'atténuation de  $10^{-\frac{19.98}{20}}$ ). Si l'on nomme  $V_{in}$  la tension en entrée du coupleur (voie IN),  $V_{out}$  la tension en sortie du coupleur (voie OUT) et  $V_{mes}$  la tension mesurée sur la voie CPL OUT, on a :

$$V_{out} = 10^{-\frac{0.09}{20}} * V_{in} \quad (14)$$

$$V_{mes} = 10^{-\frac{19.98}{20}} * V_{out} * \Gamma \quad (15)$$

En combinant les équations 13, 14 et 15 on obtient :

$$V_{mes} = 10^{-\frac{0.09}{20}} * 10^{-\frac{19.98}{20}} * \Gamma * V_{in} \quad (16)$$

Il est alors possible d'observer les variations de  $V_{mes}$  en fonction de la fréquence mais surtout en fonction de la température. Il est aussi possible d'observer la puissance réfléchie (en dBm) grâce à la formule :

$$Pr = 10 * \log\left(\frac{V_{mes}^2}{50}\right) \quad (17)$$

C'est cette donnée que l'on retrouve habituellement sur un analyseur de spectre et donc qui permettra de valider le modèle établis.

### 3.3.4. Recherche d'optimisation

Afin de déterminer les paramètres géométriques optimaux ainsi que les fréquences d'adaptation et sélectivités optimales le modèle global prend comme vecteur d'entrée tous les paramètres cités précédemment :

- Les paramètres géométriques :  $r_1$ ,  $d_{fil1}$ ,  $N_1$ ,  $d_{fil2}$ ,  $N_2$  et  $d$
- Les paramètres d'adaptation :  $wc_1$ ,  $Q_1$ ,  $wc_2$  et  $Q_2$
- La plage de simulation en fréquence :  $f$

Il prend également en compte certaines données constantes :

- Le rayon de la bobine secondaire :  $r_2$
- Les caractéristiques propres aux matériaux et à l'environnement :  $\rho$  et  $\mu$
- Les températures minimales et maximales de simulation :  $T_1$  et  $T_2$
- La tension en entrée du coupleur :  $V_{in}$

Le modèle cherche à maximiser la sensibilité en température. Pour cela il itère en calculant l'écart entre  $V_{mes}(T_1)$  et  $V_{mes}(T_2)$  pour toutes les combinaisons de valeurs des différents vecteurs et renvoie pour chaque valeur de distance :

- L'écart maximal obtenu et les valeurs de  $V_{mes}(T_1)$  et  $V_{mes}(T_2)$  associés
- Les paramètres géométriques optimums
- Les paramètres d'adaptation optimums
- La fréquence pour laquelle l'écart est maximum
- Les valeurs théoriques des composants associés

Il est alors possible à partir des paramètres géométriques obtenu de dimensionner les bobines primaires et secondaire. Puis de réaliser l'adaptation de ses bobines grâce aux paramètres d'adaptation obtenus. Il sera ensuite nécessaire de normaliser ses composants avant de réaliser les circuits primaires et secondaire.

### 3.4. Validation du modèle

#### 3.4.1. Cas étudié

L'étude porte sur un cas particulier autour de la fréquence 8 MHz. On donne au modèle comme paramètres d'entrée :

- 1) Les paramètres géométriques :
  - La distance :  $d = [1 : 0.5 : 5]$  cm
  - Le diamètre du fil de la bobine primaire :  $d_{fil1} = [0.315, 0.4, 0.5, 0.8]$  mm
  - Le diamètre du fil de la bobine secondaire :  $d_{fil2} = [0.315, 0.4, 0.5, 0.8]$  mm
  - Le rayon de la bobine primaire :  $r1 = [30 : 2 : 38]$  mm
  - Le rayon de la bobine secondaire :  $r2 = 35.5$  mm
  - Le nombre de spires de la bobine primaire :  $N1 = [1, 2, 3, 5, 7, 10, 15]$
  - Le nombre de spire de la bobine secondaire :  $N2 = [1 : 1 : 8]$
- 2) Les caractéristiques propres aux matériaux et à l'environnement :
  - La résistivité :  $\rho = 17e-9 \Omega m$
  - $\mu = \pi * 4e-7$  (dans l'air)
- 3) Les paramètres d'adaptation :
  - La pulsation d'adaptation du circuit primaire :  $\omega c1 = 2 * \pi * [4 : 12] * 1e6$  rad/s
  - La pulsation de résonance du circuit secondaire :  $\omega c2 = 2 * \pi * [4 : 12] * 1e6$  rad/s
  - Le facteur de qualité du circuit primaire :  $Q1 = 30$
  - Le facteur de qualité du circuit secondaire :  $Q2 = 30$
- 4) La plage de simulation en fréquence :  $f = [1 : 5e-2 : 15]$  MHz
- 5) Les températures minimales et maximales de simulation
  - La température minimale :  $T1 = 40$  °C
  - La température maximale :  $T2 = 80$  °C
- 6) La tension en entrée du coupleur :  $V_{in} = 1mV$

Pour la distance  $d = 4.5$  cm le modèle à renvoyé les paramètres d'optimisation suivant :

- Le diamètre du fil de la bobine primaire :  $d_{fil1} = 0.5$  mm
- Le diamètre du fil de la bobine secondaire :  $d_{fil2} = 0.8$  mm
- Le rayon de la bobine primaire :  $r1 = 30$  mm
- Le nombre de spires de la bobine primaire :  $N1 = 5$
- Le nombre de spire de la bobine secondaire :  $N2 = 1$
- Les pulsations d'adaptation/coupure :  $\omega c1 = \omega c2 = 75.398 * 1e6$  rad/s

Les bobines correspondantes ont été fabriqués à la main et leur valeur a été remesurée puis les composants d'adaptation ont été recalculé et normalisé pour obtenir :

- L'inductance de la bobine primaire :  $L1 = 3.9 \mu H$

- La résistance de la bobine primaire :  $R12 = 357 \text{ m}\Omega$
- La capacité parallèle d'adaptation :  $C12 = 27 \text{ pF}$
- La capacité série d'adaptation :  $C11 = 18 \text{ pF}$
- La résistance d'adaptation :  $R11 = 8.2 \text{ k}\Omega$
- L'inductance de la bobine secondaire :  $L2 = 0.3 \text{ }\mu\text{H}$
- La résistance de la bobine secondaire :  $R22 = 59 \text{ m}\Omega$
- La valeur nominale de la capacité secondaire :  $C2 = 560 \text{ pF}$
- La résistance de contrôle de facteur de qualité :  $R21 = 680 \text{ }\Omega$

Ces valeurs ont été utilisées dans un modèle Matlab, afin de tracer l'évolution de la puissance en fonction de la fréquence et de la distance, puis dans un modèle P-Spice, pour comparer l'évolution et dans un circuit pratique afin de valider le modèle.

### 3.4.2. Résultats théoriques avec le modèle réalisé

On utilise les valeurs normalisées des composants pour simuler le comportement des antennes en fonction de la fréquence et de la distance de communication, on obtient les courbes suivantes :

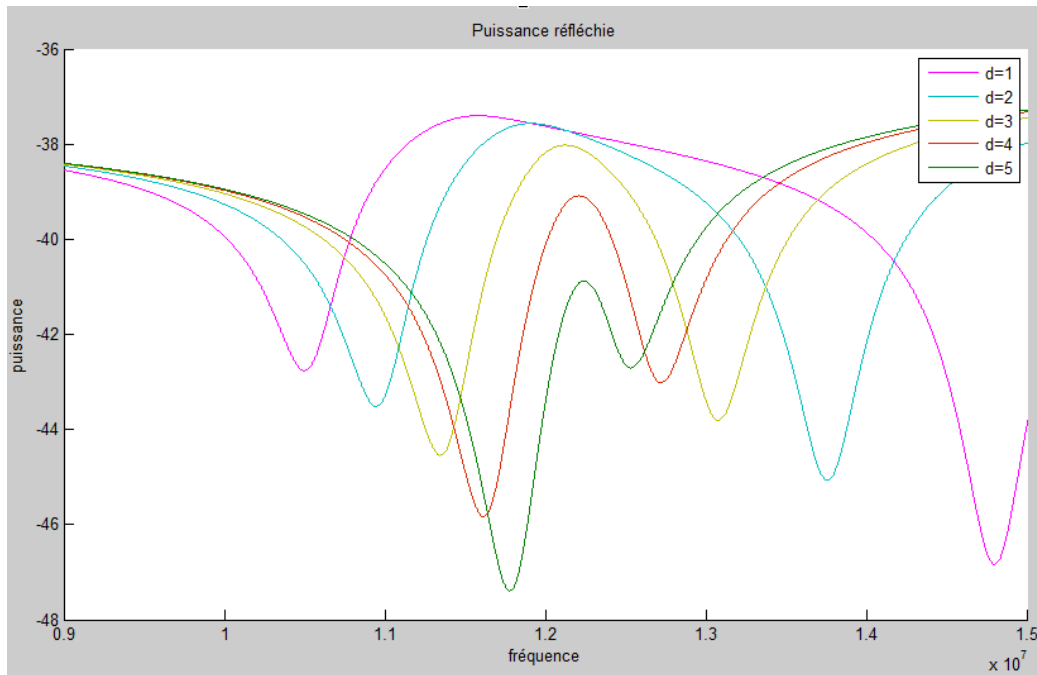


Figure 207. Simulation Matlab

On s'intéresse au premier minimum de puissance, car c'est celui-ci que nous chercherons à mesurer en pratique. La position du premier minimum en fonction des différentes distances est donnée dans le tableau ci-dessous :

Distance	Puissance	Fréquence
1 cm	-42.92 dBm	10.61 MHz
2 cm	-44.04 dBm	11.18 MHz
3 cm	-44.83 dBm	11.43 MHz
4 cm	-46.36 dBm	11.69 MHz
5 cm	-49.61 dBm	11.90 Hz

### 3.4.3. Résultats théoriques sous P-Spice

On réalise ensuite la même simulation avec le logiciel PSpice en observant la tension réfléchie (qui a la même allure que la puissance réfléchie), on obtient la courbe suivante :

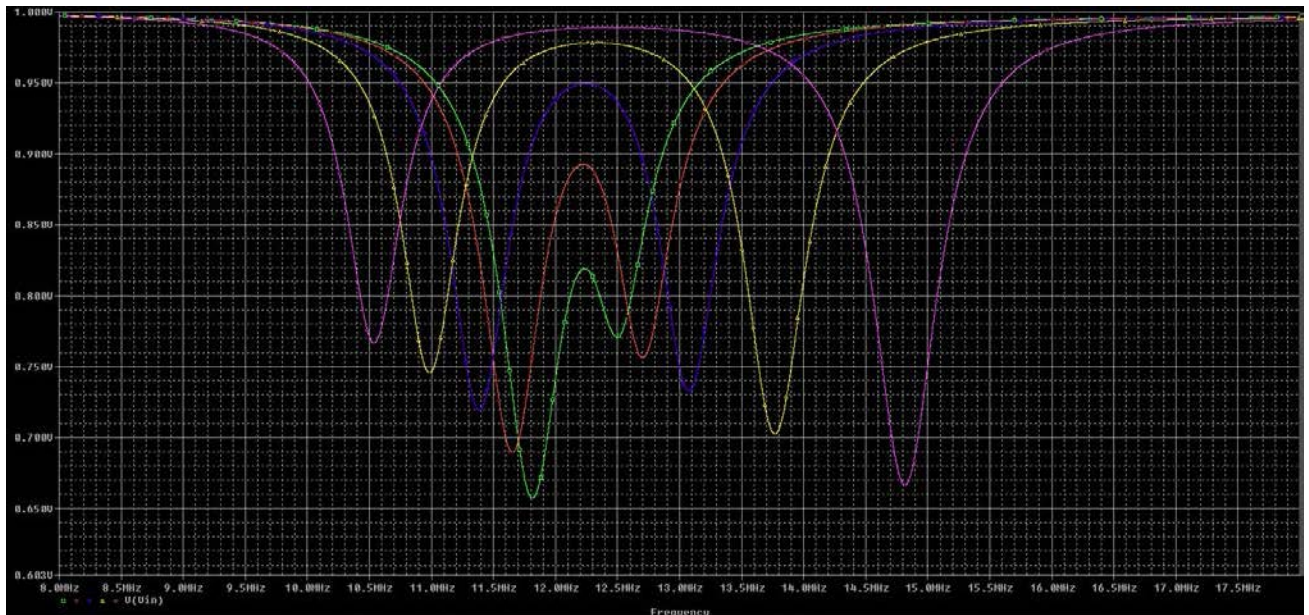


Figure 208. Simulation P-Spice

Avec ce modèle la position du premier minimum en fonction des différentes distances est la suivante :

Distance	Tension	Fréquence
1 cm	767 mV	10.533 MHz
2 cm	746 mV	10.983 MHz
3 cm	720 mV	11.393 MHz
4 cm	690 mV	11.651 MHz
5 cm	657 mV	11.816 MHz

On constate que les minimums sont placés au même endroit et que les courbes semblent avoir la même allure. L'approche théorique est donc validée, il ne reste plus qu'à comparer avec la pratique.

### 3.4.4. Validation expérimentale

Une expérience pratique a été réalisée avec les mêmes valeurs de composant, le test a été réalisé comme sur l'image ci-dessous avec une prise de mesure par centimètre, de 1 à 5 centimètres.





Figure 209 Essai

On obtient ainsi une courbe pour chaque distance, afin d'alléger le document seule la courbe obtenue à 5 cm est présentée, tous les résultats étant synthétisé par la suite dans un tableau.

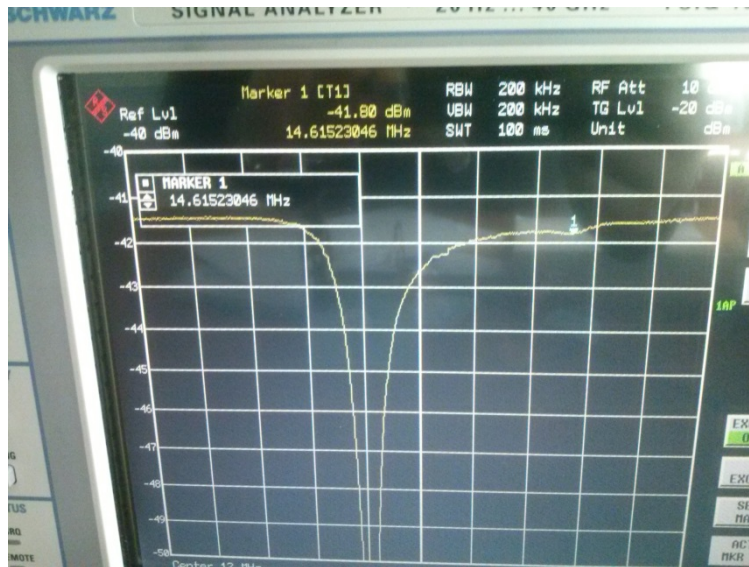


Figure 210. Essai à 5 cm

On constate que le premier pic a la même allure que sur les simulations, il est maintenant nécessaire de comparer sa position pratique avec sa position théorique. Les résultats obtenus sont synthétisés ci-dessous :

Distance	Puissance	Fréquence
1 cm	-80 dBm	10.61 MHz
2 cm	-62.9 dBm	10.91 MHz
3 cm	-60.8 dBm	10.99 MHz
4 cm	-59.8 dBm	11.03 MHz
5 cm	-59.4 dBm	11.05 MHz

On constate que les niveaux sont plus bas, les pics sont plus prononcés, cela améliore la précision. Il y a un écart au niveau des positions en fréquence. Celui-ci s'explique par une mauvaise approche du couplage. En réalité le couplage est différent et donc la fréquence varie moins.

En revanche les composant « optimaux » calculé permettent d'avoir la sensibilité souhaitée, on peut donc considérer les résultats du modèle d'optimisation comme acceptable.

### 3.4.5. Conclusion

Il y a un écart entre la théorie et la pratique, due à une mauvaise quantification du couplage. Ce modèle pourrait donc être amélioré en quantifiant mieux le couplage. Afin de respecter le planning de projet, le système fait l'objet d'une réalisation complète et d'essais de validations en statique (roulement ne tournant pas) en comparant la mesure de température du système à un capteur de référence.

Le capteur intégré à la cage fait l'objet d'une calibration par rapport à un capteur de référence.



Figure 211. Essais de validation du système

Le concept a été validé dans sa version prototype sur banc d'essais de roulement. Le circuit secondaire a été réalisé avec une bobine circulaire et une capacité. La charge appliquée au roulement est axiale, les essais ont été réalisés à vitesse variable. Le roulement est lubrifié à la graisse. Le circuit primaire est fixé sur le joint du roulement.

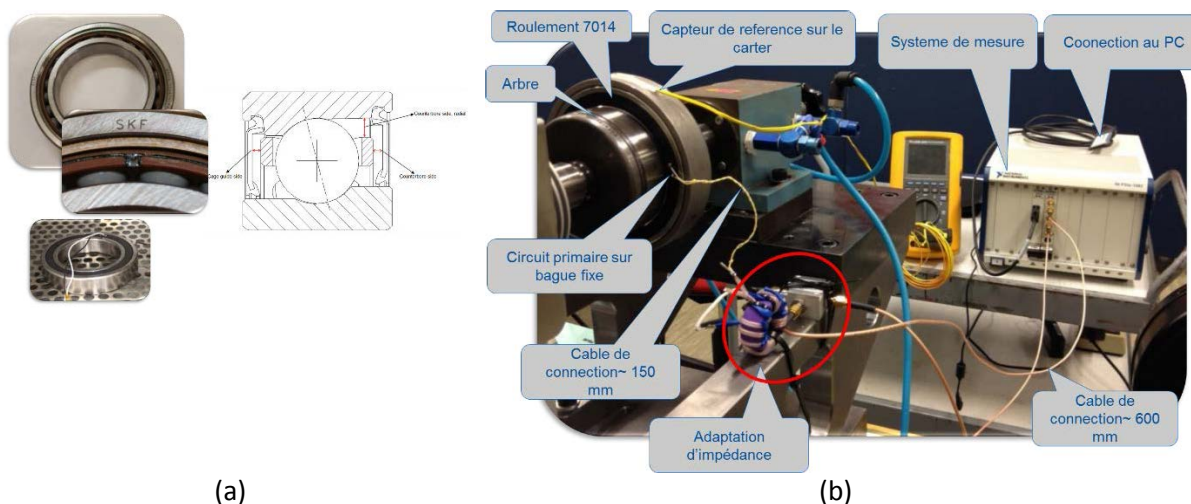


Figure 212. (a) intégration à la cage, (b) Validation de la mesure sur cage par capteur résonant

Le résultat de mesure sous vitesse variable est présenté en Figure 213.

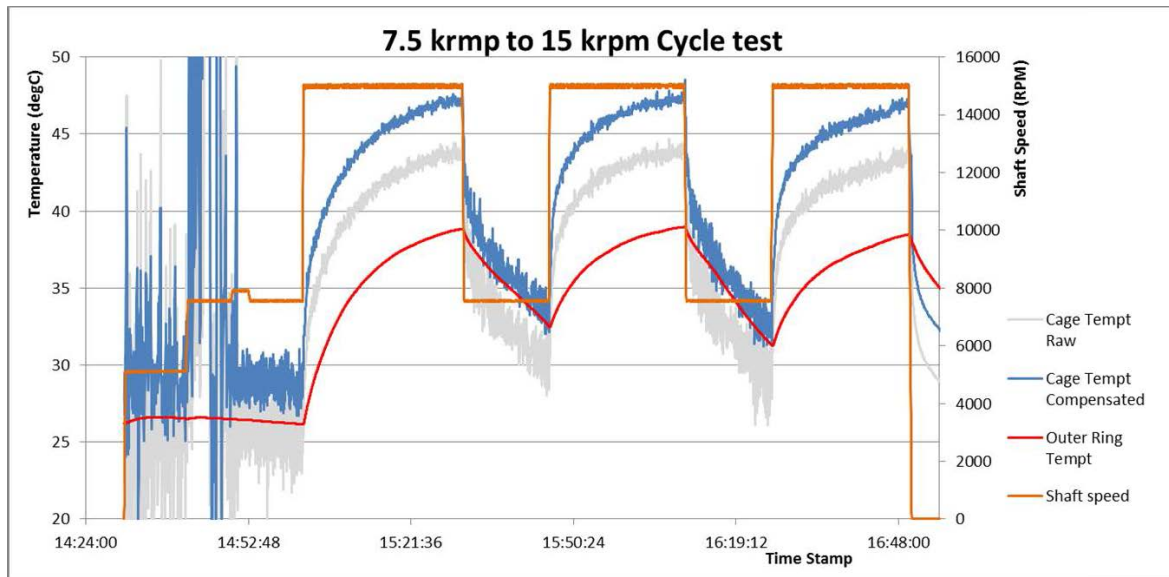


Figure 213. Résultats de mesure au banc roulement

On remarque la différence de température entre le capteur sur la cage et le capteur de référence sur le carter du boîtier d'essai. Cette différence s'explique par le fait que le capteur sur la cage se trouve à plus grande proximité du flux de chaleur apparaissant dans le roulement que le capteur de référence sur la bague. Le capteur sur la cage montre une plus grande réactivité que le capteur à l'extérieur. L'allure des courbes reste identique. Cette instrumentation présente l'avantage de pouvoir permettre une couverture de mesure thermique plus grande pour des essais ayant pour objectif d'étudier précisément les pertes de puissance dans les roulements.

## Chapitre 3 : Perspectives des travaux et futurs axes de développement

Le but de ce mémoire a consisté à présenter dans une première partie une analyse des conditions d'évolution de mon parcours professionnel et personnel m'ayant amené à réaliser cette démarche d'obtention d'un diplôme de doctorat par VAE. Les contraintes économiques et environnementales de mon secteur d'activités l'aéronautique poussent les industriels du secteur à toujours repousser les limites technologiques de leurs produits. Relever ces challenges nécessite de réaliser un effort de recherche permanent prenant la forme de projets associant les laboratoires de recherche et les industriels. Mon parcours m'a amené à mener de tels projets qui m'ont permis de travailler avec des chercheurs autour des problématiques industriels de mon employeur. De cette expérience, j'ai pu apprendre que la démarche de recherche est fortement complémentaire des activités de recherche et développement en entreprise :

- Elle permet de développer le champ de connaissance du domaine et de démontrer sa validité et son applicabilité par l'expérimentation, réduisant fortement les risques techniques lors du transfert à l'Industriel pour le développement de l'application pour mise sur le marché
- Elle permet d'accélérer la vérification de concept par une mise en œuvre expérimentale autour d'un cadre applicatif proposé par l'industriel
- Elle permet une meilleure définition des problématiques de l'industriel, associé à une identification plus immédiate des verrous technologiques nécessitant des actions de recherche

Ces travaux ont donné lieu à des publications et des présentations conjointes lors de colloques nationaux et internationaux permettant de réaliser une synthèse des résultats obtenus et une progression sur la connaissance des enjeux et verrous dans les domaines de la surveillance de santé des roulements (condition monitoring), de la récupération d'énergie, de la mesure et de la transmission sans fil d'information en environnement de machine tournante permettant d'alimenter le développement d'un processus de PHM autonome autour des roulements. La réalisation de démonstrateurs technologiques avec le laboratoire a été également l'occasion de confronter le concept à la réalité de l'expérimentation et de pouvoir démontrer un certain niveau de maturité.

La partie suivante a présenté la thématique de développement principal d'un roulement smart intégré au sein d'un processus de Pronostic Health Management. Ce processus vise à maximiser la disponibilité opérationnelle des machines à travers une meilleure maîtrise des modes de défaillance mécanique des roulements. Ce processus utilise des étapes de diagnostic et de pronostic qui demandent d'être alimentées par des données de mesure en lien avec les dégradations que l'on veut détecter et suivre. Au cœur de la machine, le roulement est un lieu idéal pour réaliser de la mesure à ces fins, et le roulement intelligent est un concept pouvant permettre un transfert automatique de données pertinentes pour supporter une maintenance prédictive optimisée.

Le PHM nécessite au préalable un travail d'étude des dégradations au sein du roulement intégrant l'identification des conditions d'apparition, de la dégradation elle-même et de sa progression. Ceci nécessite la réalisation d'expérimentations et le développement de méthodes de traitement du signal pour le diagnostic et la définition d'indicateur de santé pour le pronostic. Le résultat de ces travaux permettra de définir de manière précise le cahier des charges du roulement intelligent.

Le roulement intelligent est quant à lui la combinaison de plusieurs technologies dont le niveau de maturité est différent d'une brique à l'autre.

- Chaîne de mesure : En considérant principalement la surveillance des écaillages, le challenge principal sur la mesure est de développer des capteurs à faible intrusivité et haute sensibilité

afin de mesurer la signature vibratoire du roulement au plus près du contact sur les bagues et pouvoir également évaluer la charge supportée par ce dernier. L'instrumentation ne doit pas remettre en cause le design du roulement ce qui nécessite de faire progresser l'état de l'art actuel en matière d'instrumentation.

- Récupération d'énergie : Les travaux présentés dans ce manuscrit ont montré que la technologie est mature dans ce domaine et que le challenge porte plutôt sur une bonne compréhension de l'énergie ambiante dans le milieu et l'intégration la plus optimale des récupérateurs d'énergie. L'énergie ambiante peut en effet ne pas être disponible de manière continue. Un élément de stockage d'énergie est alors dans ce cas nécessaire associé à un système dont la consommation est la plus faible possible.
- Connectivité : le protocole RFID est intéressant pour sa consommation nulle et son potentiel de vitesse de transmission lorsque l'on amplifie le 'back scattering'. Sa performance reste toutefois dépendante du couple tag-lectrice pour un environnement d'application donné. Des actions de recherche sont nécessaires autour du design des antennes pour l'application visée.

Enfin deux développements ont été présentés dans la dernière partie. L'un d'eux concerne un système de mesure de charge autonome, capable de communiquer sans fil intégré à une attache de moteur d'avion. Ce projet proposé par SAFRAN dans le cadre de la plateforme de projet EPICE, a développé un démonstrateur technologique pour surveiller les niveaux de charge vu par l'attache du moteur afin de détecter son niveau de chargement en utilisation, ainsi que d'éventuelles surcharges consécutives à des atterrissages durs pouvant donner lieu à de l'endommagement.

Ce projet de démonstrateur technologique d'une durée de 5 ans a été l'occasion de mener des travaux de recherche sur le système et ces constituants avec une validation dans l'environnement de l'application, sur banc moteur ainsi que des essais en vol. Les modules technologiques ont été développés pour la réalisation du démonstrateur du projet, mais aussi pour la réalisation d'un roulement intelligent capable d'autodiagnostic. Les constituants nécessaires au système sont exactement les mêmes pour ces deux applications, le projet d'attache ayant permis d'assurer l'identification des technologies, et leur maturation en environnement extrême. EPICE a permis la validation de la récupération d'énergie à partir de l'environnement thermique et vibratoire, de la communication par protocole RFID à TRL4 (fonctionnement en laboratoire). Il a permis le transfert de technologies du laboratoire vers SKF permettant d'envisager la réalisation d'un démonstrateur technologique de roulement intelligent dans le futur.

Un autre exemple de réalisation d'un capteur de température basé sur la résonance électrique a également été présenté. Il a également donné lieu à la réalisation d'un démonstrateur qui a permis de caractériser les couplages radiofréquences existant au sein de l'environnement des roulements. Le démonstrateur permet d'envisager de réaliser des mesures températures des parties tournantes du roulement (bague, cage) avec pour finalité d'améliorer les modèles de prédiction des pertes de puissance générées par le contact roulant, mais aussi d'identifier les challenges autour de la transmission sans fils de données autour de l'utilisation du roulement intelligent.

Ces exemples ont été l'occasion de mener des projets collaboratifs associant plusieurs acteurs de disciplines et d'horizons différents dans la réalisation de ces démonstrateurs technologiques et leur validation par l'expérimentation dans des conditions représentatives de l'application visée. Ils ont mis en évidence les difficultés de la réalisation de concept et de leur démonstration et tout l'intérêt de la démarche de recherche dans un cadre industriel.

## Références Partie II

- [1] C. D. Richards, M. J. Anderson, D. F. Bahr, et R. F. Richards, « Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component », *J. Micromech. Microeng.*, vol. 14, no 5, p. 717, mai 2004.
- [2] « Smart Material Application ». [En ligne]. Disponible sur : <http://sem-proceedings.com/20i/sem.org-IMAC-XX-Conf-S13P03-An-Overview-Composite-Actuators-with-Piezoceramic-Fibers.pdf>. [Consulté le : 17-janv-2014].
- [3] « Smart Material ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.smart-material.com/Datasheets.html>. [Consulté le : 17-janv-2014].
- [4] « Piezo systems ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.piezo.com/>. [Consulté le : 17-janv-2014].
- [5] « Volture ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.mide.com/products/volture/piezoelectric-vibration-energy-harvesters.php>. [Consulté le : 17-janv-2014].
- [6] A. Badel, « Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire », Université de Savoie, 2005.
- [7] M. N. Lallart, « Amélioration de la conversion électroactive de matériaux piézoélectriques et pyroélectriques pour le contrôle vibratoire et la récupération d'énergie - Application au contrôle de santé structurale auto-alimenté », INSA de Lyon, 2008.
- [1] S. Priya et D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies*. Springer, 2008.
- [2] M. Koplow, A. Chen, D. Steingart, P. K. Wright, et J. W. Evans, « Thick film thermoelectric energy harvesting systems for biomedical applications », in *5th International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors, 2008. ISSS-MDBS 2008, 2008*, p. 322 –325.
- [3] G. Park, T. Rosing, M. Todd, C. Farrar, et W. Hodgkiss, « Energy Harvesting for Structural Health Monitoring Sensor Networks », *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 14, no 1, p. 64–79, 2008.
- [4] J. P. Carmo, L. M. Goncalves, et J. H. Correia, « Thermoelectric Microconverter for Energy Harvesting Systems », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no 3, p. 861 –867, mars 2010.
- [5] E. J. Luis David Patiño López, « Caractérisation des propriétés thermoélectriques des composants en régime harmonique : Techniques et Modélisation », 2004.
- [6] E. E. Lawrence et G. J. Snyder, « A study of heat sink performance in air and soil for use in a thermoelectric energy harvesting device », in *Twenty-First International Conference on Thermoelectrics, 2002. Proceedings ICT '02, 2002*, p. 446 – 449.
- [7] E. J. Carlson, K. Strunz, et B. P. Otis, « A 20 mV Input Boost Converter with Efficient Digital Control for Thermoelectric Energy Harvesting », *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 45, no 4, p. 741 –750, avr. 2010.
- [8] G. J. Snyder et E. S. Toberer, « Complex thermoelectric materials », *Nat Mater*, vol. 7, no 2, p. 105–114, févr. 2008.
- [9] T. Tendeland et B. A. Schlaff, « Temperature Gradients in the Wing of a High-Speed Airplane During Dives from High Altitudes », juill. 1948.

- [10] A. L. Dawdy, E. E. Kordes, et R. D. Reed, « Structural heating experiences on the X-15 airplanes », mars 1962.
- [11] « North American X-15 », Wikipedia, the free encyclopedia. 09-mars-2013.
- [12] « McDonnell XF-88 Voodoo », Wikipedia, the free encyclopedia. 09-mars-2013.
- [13] « SII », 01-févr-2013. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.sii.co.jp/info/eg/soi6.html>. [Consulté le : 11-févr-2013].
- [14] I. Doms, P. Merken, C. Van Hoof, et R. P. Mertens, « Capacitive Power Management Circuit for Micropower Thermoelectric Generators With a 1.4 A Controller », IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 44, no 10, p. 2824–2833, 2009.
- [15] « Texas », 01-févr-2013. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.ti.com/product/tps61201>. [Consulté le : 11-févr-2013].
- [16] Y. Qiu, C. Van Lied, B. Op het Veld, P. G. Blake, et C. Van Hoof, « 5 W-to-10mW input power range inductive boost converter for indoor photovoltaic energy harvesting with integrated maximum power point tracking algorithm », in Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2011 IEEE International, 2011, p. 118–120.
- [17] « IIS Fraunhofer », 01-févr-2013. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.ti.com/product/tps61201>. [Consulté le : 11-févr-2013].
- [18] « EnOcean », 01-févr-2013. [En ligne]. Disponible sur : [http://www.enocean.com/en/enocean\\_modules/ect-310-perpetuum/](http://www.enocean.com/en/enocean_modules/ect-310-perpetuum/). [Consulté le : 11-févr-2013].
- [19] « LTC 3108 », 01-févr-2013. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.linear.com/product/LTC3108>. [Consulté le : 11-févr-2013].
- [20] « LTC 3109 », 01-févr-2013. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.linear.com/product/LTC3109>. [Consulté le : 11-févr-2013].
- [21] « ADL », 01-févr-2013. [En ligne]. Disponible sur : [http://www.aldinc.com/ald\\_ehmodules.php](http://www.aldinc.com/ald_ehmodules.php). [Consulté le : 11-févr-2013].
- [22] G. Séguier, P. Delarue, et F. Labrique, Electronique de puissance - 9e édition : Structures, fonctions de base, principales applications. Dunod, 2011.
- [23] G. Vachtsevanos, Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems. Wiley, 2006.
- [24] N. Sawahi, Vibrations of spalled Rolling Element Bearings. VDM, 2009.

## Annexe 1. Etats de l'art sur les méthodes de surveillance

La méthode la plus utilisée industriellement est le CBM. Le CBM (condition based monitoring) est le processus de surveiller l'état de santé d'une transmission par la mesure de paramètres physiques propre à la machine ou au composant (comme la vibration, la température) dans le but de détecter un défaut pouvant se développer jusqu'à la défaillance. Il est une composante majeure de la maintenance prédictive. Le CBM permet de planifier la maintenance quand nécessaire afin d'éviter une défaillance plus importante de la machine.

Le Processus de CBM autour des roulements à billes utilise principalement la mesure des températures et des vibrations. Pour la mesure vibratoire, la méthode actuelle repose une collecte empirique de mesure vibratoires autour des roulements et une analyse de tendance. Ces techniques conviennent dans une majorité de cas, mais la fiabilité de leur conclusion n'est souvent pas très bonne car elles n'utilisent pas dans la mesure du possible les connaissances existantes concernant les mécanismes physiques de l'excitation des structures par les vibrations émises par les roulements.

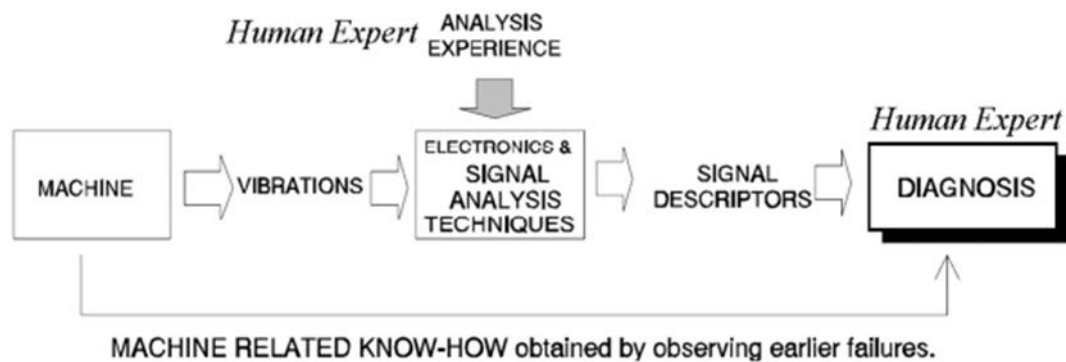


Figure 214. Processus de CBM [22]

La Figure 214 présente l'approche traditionnelle de la surveillance de santé des roulements au sein des machines. Elle comprend la machine sous surveillance et une méthode d'analyse (chaîne de mesure (capteurs et système de conditionnement), programme) et un expert qui joue le rôle de l'observateur. Cette méthode suppose que certaines vibrations sont émises lorsque la machine fonctionne de manière anormale. Les vibrations sont mesurées par un ou plusieurs capteurs et leur signal est transformé par une méthode d'analyse en un set de descripteurs de signal (amplitude, fréquence, forme...). Les descripteurs du signal fournissent une synthèse des signaux et ils évoluent lentement à l'image des signaux vibratoires eux-mêmes. Dans cette situation, l'expert compare l'évolution des descripteurs des signaux avec les performances de la machine et après l'occurrence d'une défaillance établissent une corrélation avec de leur évolution à ce moment-là avec la cause. Après réparation, les descripteurs des signaux reviennent à leur niveau de pré-défaillance et lorsqu'ils évoluent à nouveaux de la même l'expert est prévenu de la présence d'un défaut et que la défaillance de la machine peut à nouveau subvenir.

L'inconvénient de cette approche est qu'une phase longue d'apprentissage dépendante de l'application est nécessaire avant que l'utilisateur soit capable de corrélérer de manière certaine la tendance des descripteurs des signaux avec des défaillances. L'évolution des descripteurs de signaux lors du développement de défauts dans les roulements dépendent des conditions opératoires du roulement et de la méthode d'analyse. Ce choix dépend de l'expert qui utilisera la méthode la plus appropriée en fonction de l'application du roulement. Il réalise également l'ajustement des seuils



d'alarme lors de l'apparition de la première défaillance afin de pouvoir mieux anticiper l'apparition de la suivante. D'un point de vu client, cette approche demande un temps considérable pour convaincre de sa fiabilité et capacité à anticiper les défauts.

La fiabilité de détection des défauts et la capacité à les diagnostiquer de cette approche empirique dépendent des conditions opératoires du roulement, de la sélection des descripteurs de signaux, de l'expérience de l'expert et du temps d'apprentissage.

Le développement de l'automatisation rend cette approche obsolète en l'absence de modèle physique de réponse de la machine à la défaillance.

Concernant les roulements, de meilleurs résultats de diagnostic peuvent être obtenus par la modélisation des mécanismes d'excitation générant des vibrations au sein des roulements à billes et ensuite choisir une méthode d'analyse adaptée. Le modèle permet également une vision des sources vibratoires. Les méthodes d'analyse découlent de ces modèles physiques, plutôt que d'une approche empirique (observation du signal et comparaison avec les performances de la machine). Cette approche est décrite dans la *Figure 215* suivante. Cette méthode est adaptée pour une automatisation du diagnostic.

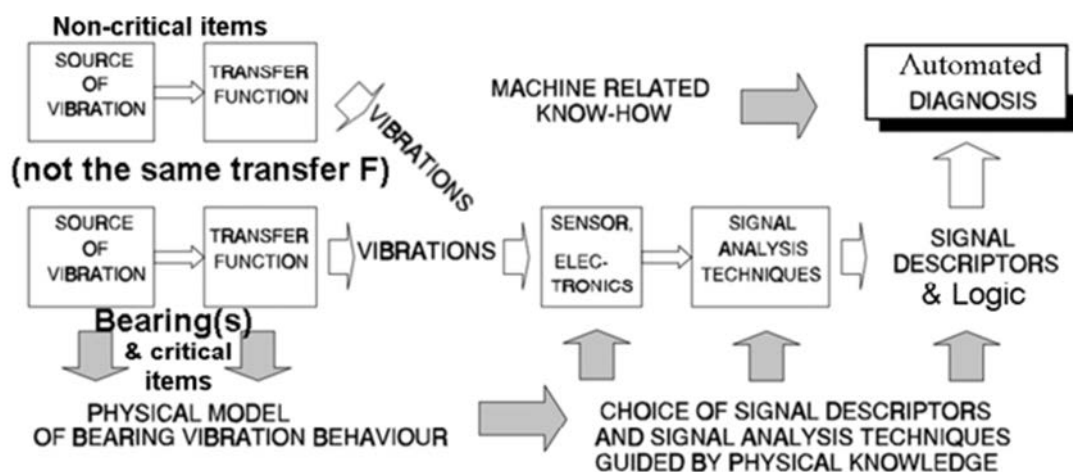


Figure 215. Processus automatique de CBM roulement [22]

Aujourd'hui la surveillance des roulements repose principalement sur la mesure des températures et des vibrations. Le besoin en automatisation du traitement de ces signaux provient principalement :

- De l'augmentation du volume de données nécessaires à traiter et à analyser pour une installation. En considérant le volume et le coût associé, ce traitement ne peut plus être réalisé seulement par des experts.
- De la volonté d'obtenir une transparence, une répétabilité et une conformité du processus de diagnostic pour réduire le taux de fausses alarmes.
- Les principaux défauts qui peuvent être détectés par l'analyse vibratoire dans les machines sont :
- Les défauts en surface de la piste de roulement comme un écaillage qui apparaissent lorsque la piste a perdu de la matière par émission de particules.

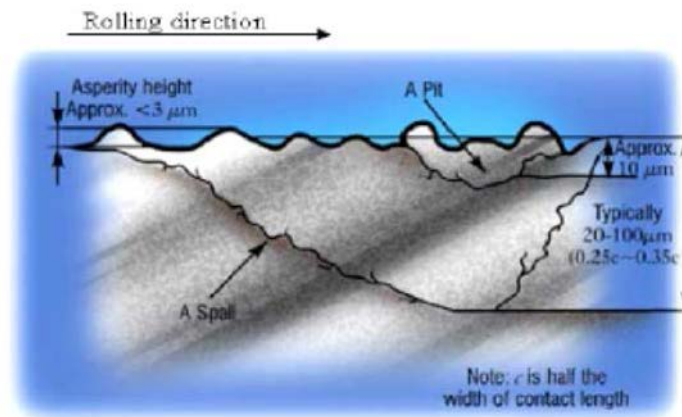


Figure 216. Taille typique d'un écaillage [23]

- La poussière lorsque les contacts tournants roulent dessus. Dans ce cas, une fois la poussière écrasée par le contact, la surface de roulement peut avoir été endommagée et des défauts de surface résultat de déformation plastique peuvent former des cratères pouvant évoluer jusqu'à un départ d'écaillage.
- Défauts dans les dentures d'engrenage similaire à des manques de matière
- On peut également mesurer des phénomènes dynamiques externes tels que :
  - Des paquets de poussières sur la surface de système poulies et courroies.
  - Phénomènes transitoires liés à des fixations insuffisamment serrées
  - Forces oscillatoires liées à de la cavitation.
  - Chocs de cage lié au jeu dans les poches des éléments roulants
  - Sous chargement mécanique du roulement, laissant les éléments roulants libres.
  - D'autres phénomènes extérieurs peuvent induire des vibrations harmoniques non transitoires et peuvent être identifiés comme :
    - Déséquilibre d'un arbre
    - Déformation des bagues liée à un mauvais serrage du roulement dans le carter.
    - Défaut de forme de l'arbre
    - Effort lié à un faux rond d'engrenage
    - Défauts d'alignement d'arbre, de courroie
    - Oscillation de transmission par courroie
    - Mauvais centrage d'un rotor de moteur électrique amenant une variation d'entrefer
    - Variations de pression
    - Défaut de forme des bagues de roulement après fabrication, amenant une oscillation des surfaces de roulement.
- Forte dispersion dans le diamètre des éléments roulants

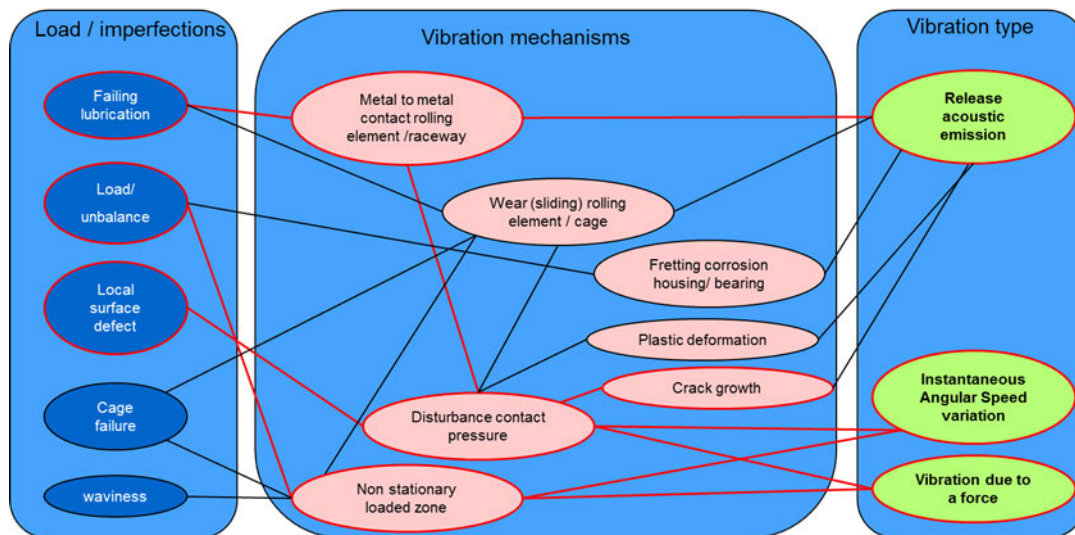


Figure 217. Mécanismes vibratoires dans les roulements

La réponse dynamique (celle résultant des vibrations du roulement ou l'arbre, le carter sont couplés entre eux) peut ainsi être mesurée. En pratique un système de surveillance de santé de roulement à bille se compose de 5 éléments dont il est essentiel de comprendre chacun d'entre eux pour réaliser une implémentation robuste et fiable. Ces 5 éléments sont les suivants :

- Source vibratoire
- Chemin de transfert
- Capteur
- Traitement du signal
- Identification

Ces éléments sont représentés schématiquement par la Figure 218.

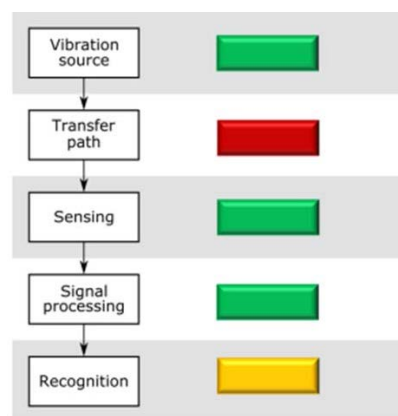


Figure 218. Mécanisme de transfert vibratoire

Tout commence par la connaissance de la source d'excitation, puis le transfert de la vibration vers le capteur. Cela implique la connaissance du comportement dynamique de la structure, ce qui est crucial pour sélectionner les capteurs, les méthodes de traitement du signal et les techniques de reconnaissance appropriées. Chaque élément de la chaîne de CBM est couplé à un indicateur rouge-ambre-vert pour visualiser le niveau de risque associé à chacun des aspects d'une application CBM et pour mettre en évidence les plus difficiles. Les sections suivantes analysent chaque élément en ce qui concerne l'application en matière de surveillance de santé.

### 3.4.1. Source d'excitation vibratoire

Les défauts de surface sont des imperfections locales sur le chemin de roulement qui perturbent la distribution nominale des pressions de contact pendant le moment où l'élément roulant passe sur le défaut. Des exemples typiques de défauts de surface sont des indentations en surface ou des écaillages provenant de fatigue de roulement en sous couche. Lorsqu'un élément roulant passe sur un défaut de surface (Figure 219.a), ceci modifie la force au niveau du contact et sa rigidité. Cela entraîne généralement une perturbation de la répartition nominale de la charge (Figure 219.b). Le contenu fréquentiel de cette variation de charge est quantifié par  $f_{notch}$ . Une augmentation de la vitesse de rotation du roulement augmente  $f_{notch}$ , une charge plus élevée diminue  $f_{notch}$ . La réponse dynamique à la perturbation de la force de contact provoqué par un défaut de surface, mesuré par un capteur placé à proximité, est similaire à celui d'un impact (Figure 219.c)

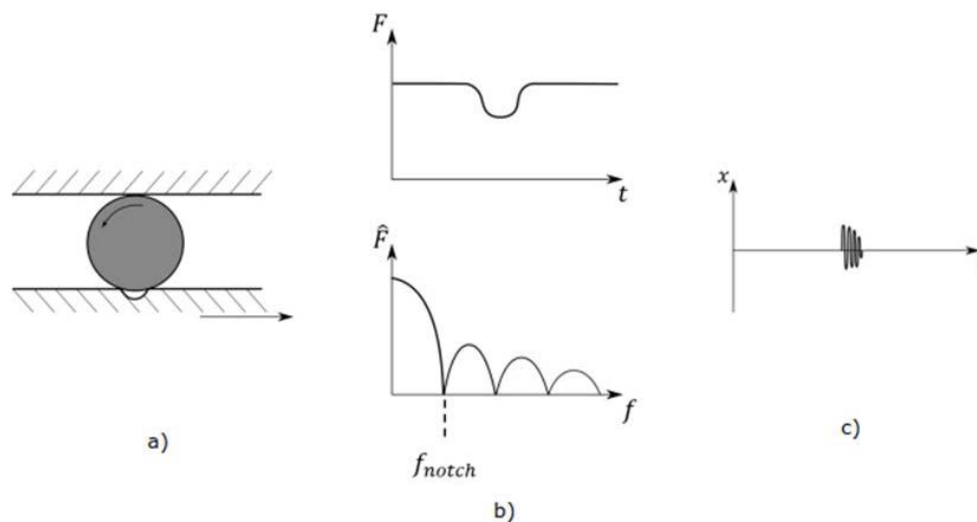


Figure 219. Schéma de la source de la vibration. a) élémeant roulant sur un défaut de surface ; b) Perturbation de la charge dans le temps en raison du passage du défaut (haut) et réponse fréquentielle de la perturbation de charge (en bas) ; c) réponse impulsionnelle typique dans le domaine temporel

Un défaut de surface sur le chemin de roulement ou l'élémeant roulant donnera une excitation impulsionnelle à chaque fois que l'on passe dessus. Cette génération répétitive d'impulsions est typique pour les défauts de surface et le temps entre chaque impulsions (ou son inverse, la fréquence de répétition) dépend de l'emplacement du défaut de surface dans le roulement, de la vitesse de rotation des composants du roulement et du nombre d'élémeants roulants.

Les défauts de surface peuvent être regroupés en deux catégories :

- Les défauts de surface large : ils perturbent fortement l'équilibre des forces au pont de contact et la distribution de charge. Leur passage génère une double impulsion avec un contenu fréquentiel variable.
- Les défauts de surface petite : ils perturbent peu la distribution de charge et génère une excitation impulsionnelle.

Des simulations ont été réalisés pour quantifier l'influence de la taille de défauts par rapport à la longueur de l'ellipse de contact. La figure suivante présente le résultat. Le contact hertzien de ce modèle a été normalisé pour une demi longueur d'ellipse de contact (étendue de -1 à +1).

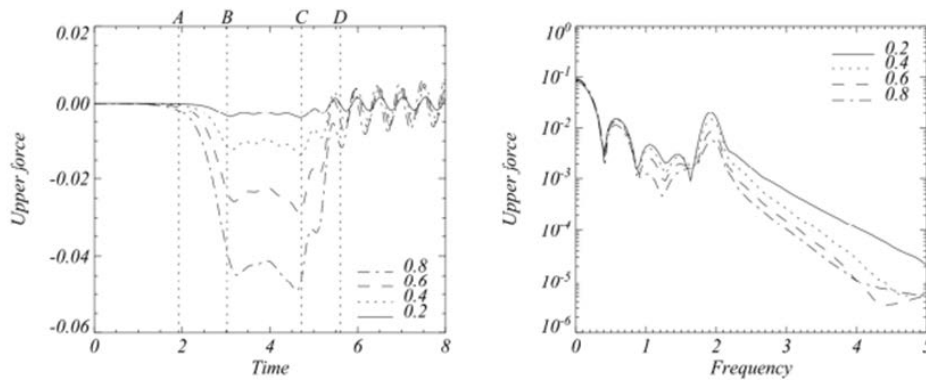


Figure 220. Perturbation de l'effort de contact par le passage du défaut (étapes A à D) domaine temporel et fréquentiel

On remarque que l'amplitude de l'excitation augmente, alors que la largeur de bande décroît faiblement. On peut conclure que l'estimation de la taille de petits défauts peut être estimée par la mesure de l'amplitude. La durée de l'impulsion et le contenu fréquentiel dépend peu de la taille du défaut.

Une mesure du contenu fréquentiel correspond à la valeur de la première fréquence de coupure dans la réponse fréquentielle de la variation de l'effort de contact. Ces fréquences de coupure sont peu affectées par la taille de défaut. A partir du modèle de simulation, on peut obtenir la formule suivante pour calculer la première fréquence de coupure adimensionnée :

$$F_{notch} = 0,5 + 0,1 \cdot (1 - l_{defect})$$

Où  $F_{notch}$  est la première fréquence de coupure et  $l_{defect}$  est la longueur du défaut par rapport à la demi longueur de l'ellipse hertzienne de contact.

Ce nombre sans dimension a été obtenue en faisant le rapport entre la fréquence de coupure  $f_{notch}$ , la vitesse de déplacement  $u_s$  en surface de piste et la largeur de l'ellipse de contact  $2b$ . La fréquence de coupure peut être approximée par la formule suivante :

$$f_{notch} \sim \frac{\pi \cdot (d_m - D)}{b} \cdot (f_i - f_c) \cdot (0,5 + 0,1 \cdot (1 - l_{defect}))$$

Où  $d_m$  est le diamètre orbital,  $D$  le diamètre de l'élément roulant,  $f_i$  la fréquence de rotation de la bague intérieure, et  $f_c$  la fréquence de rotation de la cage.

En raison de la cinématique du roulement, les défauts de surface sur la bague extérieure, les défauts de surface sur les éléments roulants et les défauts de surface sur la bague intérieure ont leur propre fréquence de répétition. On les appelle fréquences de défaut de roulement. Cette caractéristique permet d'identifier à quel endroit se trouve le défaut. Sur la *Figure 221*, les signaux de vibration typiques des défauts sont représentés. L'amplitude des impulsions peuvent également changer. En raison de la rotation du roulement, la distance au capteur change. Cela modifie également la fonction de transfert du point d'excitation (c'est-à-dire le défaut de surface) au capteur. Pour les défauts qui tournent vis à vis du capteur, l'amplitude diminuera et augmentera lorsque le défaut se déplace vers l'emplacement du capteur. Cette modulation de l'amplitude dépend de la vitesse de rotation de la partie du roulement avec le défaut par rapport au capteur. Une telle modulation créera des bandes latérales autour de la fréquence de base des défauts.

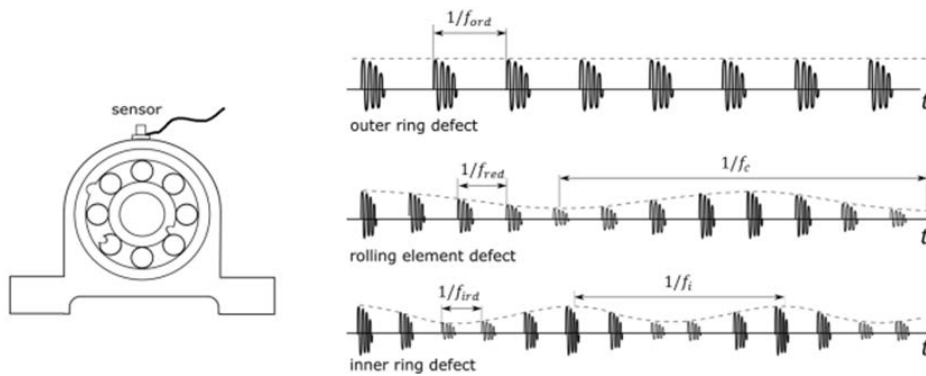


Figure 221. Réponses typiques dues à des défauts sur la bague extérieure, l'élément roulant et la bague intérieure, dans le cas de la bague extérieure fixe et du capteur monté sur le boîtier.

Le diagnostic est réalisé en comparant les fréquences caractéristiques des défauts à leur valeur théorique. En effet, il est possible d'établir ces équations des fréquences caractéristiques des roulements dans le cas de roulements à billes à contacts obliques. Les formules sont classiques dans le cas statique en considérant un seul angle de contact  $\alpha$ . Elles restent à établir dans le cas  $\alpha_i$  et  $\alpha_e \neq \alpha$ .

Hypothèses :

Les angles de contact sont différents puisque les fréquences sont étudiées à des vitesses de rotation importantes :  $\alpha_e \neq \alpha_i$  ;

Les déformations locales sont négligeables devant les dimensions des solides ;

- Billes roulant sans glisser sur les bagues ;
- Vitesses de rotation orbitales  $\omega_j$  de chaque bille  $j$  identiques entre elles et égales à la vitesse de rotation de la cage  $\omega_c$ , puisque l'identification s'effectue en chargement à vide.

Les fréquences caractéristiques varient de manière linéaire avec la fréquence de rotation. Les fréquences de défauts des roulements et leur modulation, dans le cas du capteur monté sur le carter de la machine et pour une bague extérieure fixe se calculent de la manière suivante :

Considérant qu'il y a roulement sans glissement entre les billes et les bagues du roulement, un modèle de train épicycloïdal de type I est utilisé (Figure 222).

- ◦ La Bague Intérieure (BI) est le planétaire.
- ◦ La Bague Extérieure (BE) est le bâti.
- ◦ La bille est le satellite.
- ◦ La cage est le porte satellite.

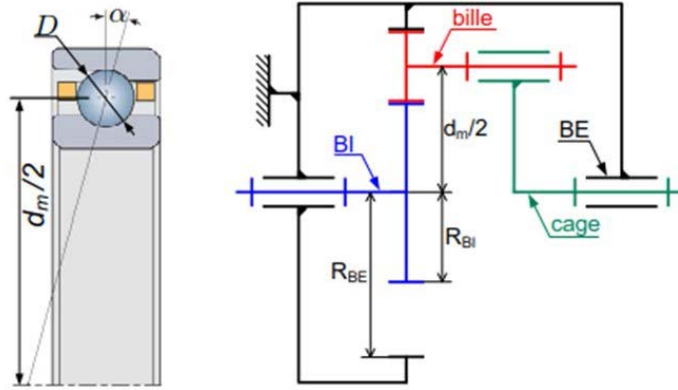


Figure 222. Modèle cinématique roulement à contact oblique

On utilise la relation de WILLIS :  $\frac{\omega_{BE} - \omega_C}{\omega_{BI} - \omega_C} = -\frac{R_{BI}}{R_{BE}}$

Avec les positions radiales des chemins de roulement des billes :  $\begin{cases} 2R_{BI} = d_m - D \cdot \cos \alpha_i \\ 2R_{BE} = d_m + D \cdot \cos \alpha_e \end{cases}$

Or  $\omega_{BE} = 0$  (bague extérieure fixe) et  $\omega_{BI} = \omega$  (pas de glissements).

En conséquence  $\omega = \omega_C \cdot \left( \frac{R_{BE}}{R_{BI}} + 1 \right)$  et finalement :  $\omega_C = \omega \cdot \frac{d_m - D \cdot \cos \alpha_i}{2d_m + D(\cos \alpha_e - \cos \alpha_i)}$

La fréquence de rotation de la cage  $f_c$  est directement donnée par le ratio des vitesses de rotation  $f_c = f_i \cdot \frac{d_m - D \cdot \cos \alpha_i}{2d_m + D(\cos \alpha_e - \cos \alpha_i)}$ . Pour des vitesses de rotation faibles, les angles de contact de la bille avec les bagues intérieure et extérieure sont équivalents à une seule valeur. On trouve finalement les relations suivantes (z est le nombre d'éléments roulants) :

- Fréquence d'un défaut de surface sur la bague extérieure :  $f_{BE} = z \cdot f_c$
- Fréquence d'un défaut sur la bague intérieure :  $f_{BI} = z \cdot |f_c - f_i| \pm f_c$
- Fréquence d'un défaut à la surface d'un élément roulant :  $f_{red} = 2 \cdot f_{re} \pm f_c$

Avec z le nombre d'éléments roulants,  $f_i$  la fréquence de rotation de la bague intérieure,  $f_c$  la fréquence de rotation de la cage,  $f_{re}$  la fréquence de rotation de l'élément roulant.

Ces fréquences sont obtenues par les formules suivantes :

On définit le ratio :  $\gamma = \frac{D}{d_m} \cdot \cos \alpha$

Alors :

- $f_c = \frac{f_i}{2} \cdot (1 - \gamma)$
- $f_{re} = \frac{d_m}{D} \cdot f_c \cdot (1 + \gamma)$
- $f_{BE} + f_{BI} = z$

On remarquera que pour un chargement axial du roulement pur, en négligeant la déformation des billes et des bagues, il est possible de réaliser l'identification des angles de contact entre les éléments roulants et les pistes des bagues intérieure et extérieure, par une mesure précise des fréquences caractéristiques :

$$\begin{cases} \cos \alpha_i = \frac{d_m}{D} - \frac{z \cdot f_{re}}{f_{BI}} = \frac{d_m}{D} + \frac{z \cdot f_{re}}{z - f_{BE}} \\ \cos \alpha_e = \frac{z \cdot f_{re}}{z - f_{BI}} - \frac{d_m}{D} = \frac{z \cdot f_{re}}{f_{BE}} - \frac{d_m}{D} \end{cases}$$

### 3.4.2. Fonction de transfert de la source vibratoire au sein du roulement vers le capteur

On a dit que le roulement sur un défaut local par un élément roulant créait une force d'excitation impulsionnelle. Souvent, l'amplitude de cette force est faible par rapport aux excitations générées par la machine en fonctionnement normal (habituellement appelée bruit de fond). La détection des défauts locaux, avec un horizon de temps le plus important possible, et l'évaluation de leur gravité repose sur une compréhension profonde de l'excitation et de la réponse de la structure. Le chemin de transfert du défaut local à l'emplacement du capteur influencera significativement le signal mesuré. Mathématiquement, cela se traduit par le concept de fonction de transfert. La réponse aux vibrations  $\widehat{X}_i(\omega)$  du point  $i$  sur une structure due à une force  $\widehat{F}_j(\omega)$  agissant sur le point  $j$  de la même structure, dans le domaine fréquentiel, est donné par la relation :

$$\widehat{X}_i(\omega) = \widehat{H}_{ij}(\omega) \cdot \widehat{F}_j(\omega)$$

Où  $\widehat{H}_{ij}(\omega)$  est la fonction de transfert entre la réponse en  $i$  et l'excitation en  $j$ .  $\widehat{H}_{ij}(\omega)$  est une relation dépendant de la position relative dans la structure, c'est-à-dire pour chaque choix différent d'une paire  $i, j$  de points, une fonction de transfert différente est obtenue.

Le comportement dynamique de la structure est résumé dans la fonction de transfert  $\widehat{H}_{ij}(\omega)$  qui fait office de filtre et amplifie ou atténue la réponse due à la force au point  $j$  en fonction de la position du point de mesure  $i$  (**Error! Reference source not found.**).

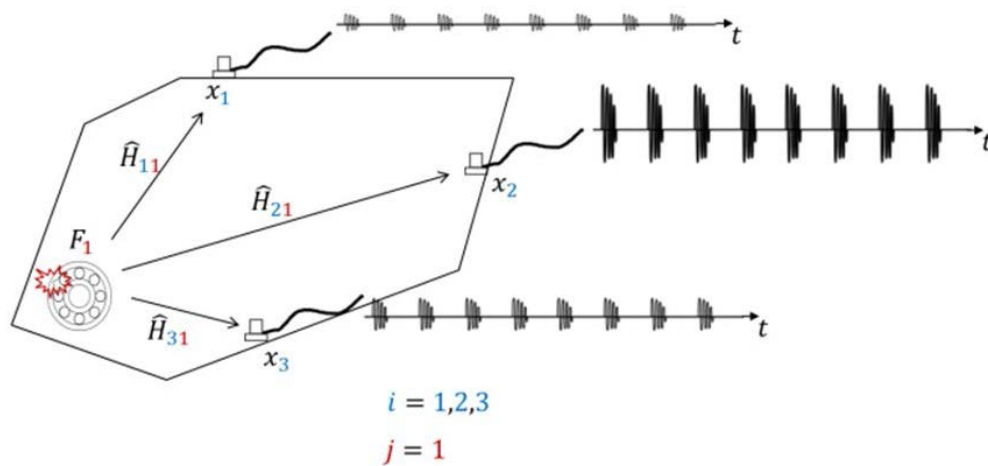


Figure 223. Fonctions de transfert en fonction de la position du point de mesure

$\widehat{H}_{ij}(\omega)$  est déterminé par la rigidité et la distribution de masse du système mécanique. Il aura de nombreuses fréquences de résonance ainsi que de l'amortissement, différent par résonance. La fonction de transfert peut être obtenue par des méthodes numériques et/ou des techniques expérimentales. En déterminant  $\widehat{H}_{ij}(\omega)$ , la bonne position du capteur peut ainsi être choisie pour surveiller un roulement spécifique. Cependant, dans la pratique, obtenir avec précision la fonction de transfert peut être une opération difficile, car, en raison de la complexité de la machine, les méthodes numériques sont à peine réalisées et les techniques expérimentales sont souvent coûteuses. Ceci peut être simplifié par l'intégration d'un capteur sur le roulement : la fonction de transfert vers le défaut est plus directe. Un exemple est présenté dans la Figure 224. Elle montre comment la fonction de



transfert modifie la réponse lorsque le spectre de la force impulsionnelle résultant du passage d'un défaut change sa bande fréquentielle de base (c'est-à-dire la localisation des fréquences de coupure) en raison de la charge, de la vitesse ou de la taille du défaut.

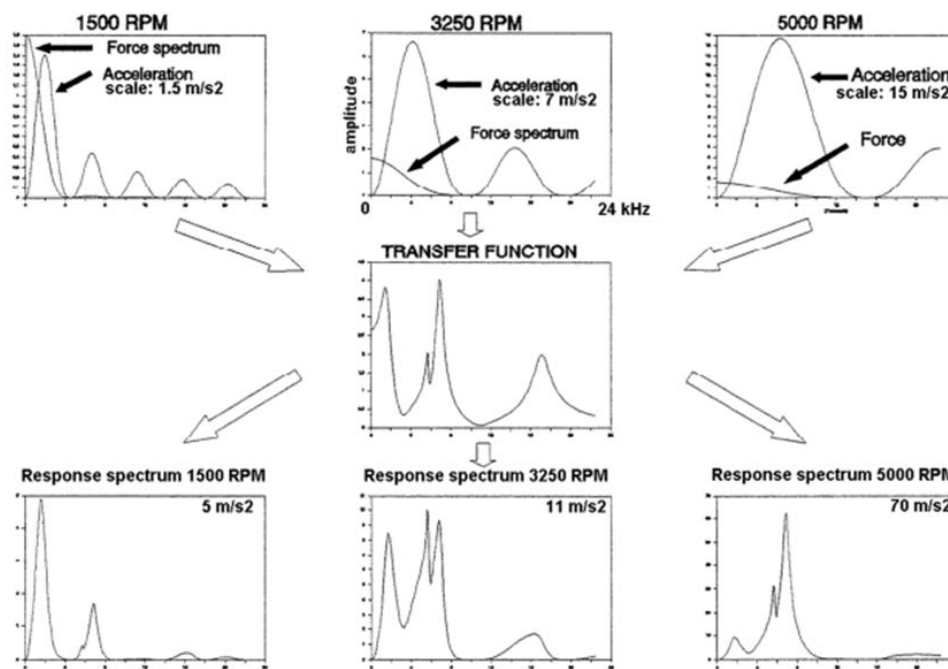


Figure 224. Influence de la fonction de transfert sur la réponse vibratoire excitée par un défaut de roulement sous plusieurs vitesses de rotation

La fonction de transfert a quatre résonances sur cette figure : 2, 6, 7,5 et 17 kHz pour démontrer l'influence. Le spectre de la force a une première fréquence de coupure à 4.5 et des multiples de cette fréquence. À gauche, la réponse est principalement dans les basses fréquences. En regardant le graphe central, les résonances en basse fréquence deviennent significativement moins importantes et la plupart de l'énergie du signal se localise vers les fréquences plus élevées avec un groupe intéressant d'excitations vers 17 kHz.

Lorsque nous augmentons maintenant la vitesse de rotation pour arriver sur le côté droit de l'image, la coupure se déplace et supprime l'excitation du mode 17 kHz. Au lieu de cela, le 7,5 kHz se distingue le plus. On peut également noter que les amplitudes ont augmenté d'un ordre de grandeur en  $m/s^2$  alors que la vitesse a été augmentée 3 fois.

### 3.4.3. Mesure

Pour mesurer les effets des vibrations engendrées par le fonctionnement ou les dysfonctionnements d'un roulement à billes, il faut placer des capteurs externes au roulement. La méthode la plus couramment utilisée est de placer sur le carter de la machine, auprès des roulements à surveiller, des accéléromètres mesurant les accélérations subies. Notons que le positionnement des capteurs revêt un caractère essentiel pour une bonne détection des défauts.

Les accéléromètres sont souvent de nature piézoélectrique en raison d'une large bande passante comparée à la technologie capacitive. Les accéléromètres, car ils sont petits, légers, bon marché et robustes, sont les capteurs de vibrations les plus utilisés. SKF offre de nombreux accéléromètres pour le CBM et l'un d'entre eux est présenté en Figure 225.



Figure 225. Accéléromètre SKF

Les considérations suivantes doivent être prises en compte lors de l'installation des capteurs d'un système de surveillance de santé d'un roulement :

- Bande passante du capteur : Comme la bande fréquentielle l'excitation est relativement élevée (*fnotch*), l'accéléromètre choisi devra avoir une fréquence de résonance élevée. Habituellement, une valeur supérieure à 60 kHz est suffisante.
  - Localisation et montage du point de mesure : le placement du capteur, tel qu'il est indiqué à la section 3, est essentiel pour obtenir des résultats de mesure corrects. Il faut au moins avoir une idée approximative de la dynamique de la structure avant la mesure. Une règle empirique est de placer le capteur aussi près que possible de la zone de charge du roulement. Comme les hautes fréquences sont mesurées, il est particulièrement important que le capteur soit solidement couplé à la structure. Ils peuvent être montés avec une vis ou un adhésif. Un montage à vis permet d'avoir généralement une meilleure fonction de transfert pour les fréquences élevées. Plus d'informations sur le montage des capteurs se trouve dans [12].
  - Fréquence d'échantillonnage : en raison du contenu haute fréquence des vibrations générées, la fréquence d'échantillonnage devrait être au moins plusieurs fois plus élevée que la première fréquence de coupure, *fnotch*. En pratique, cela implique une fréquence d'échantillonnage au-dessus de 100kS/s.
  - Temps de mesure : le temps de mesure nécessaire est fonction de la fréquence de défauts attendue. Il est important qu'il soit suffisamment long pour que suffisamment d'impulsions soient mesurées (généralement autour de 25). L'équation suivante fournit une estimation approximative du temps de mesure,  $t_{meas}$ , en seconde :  $t_{meas} = \frac{50}{z \cdot f_i}$
- Où  $z$  est le nombre d'éléments roulants et  $f_i$  la vitesse de rotation de l'arbre en Hz.
- Tachymètre : La vitesse de rotation doit être précisément connue car il est essentiel de déterminer les fréquences de défauts. Lorsque la vitesse n'est pas disponible, il est recommandé d'utiliser un tachymètre pour mesurer la vitesse de rotation de l'arbre.

Ces méthodes, utilisées en maintenance préventive depuis de nombreuses années, ont largement fait leurs preuves. Elles permettent de détecter de façon précoce l'apparition d'un défaut, et même pour certaines d'entre elles, d'en connaître l'origine [12], [16].

Leur principe est simple. A chaque fois qu'une bille entre en contact avec un écaillage ou une fissure, il se produit des chocs (de nature périodique), qui se caractérisent par un signal vibratoire particulier [12] [17]. Une analyse temporelle, et surtout fréquentielle, de ce signal permet d'en déduire une mine d'informations : l'amplitude des chocs dépend de la dimension et de la géométrie du défaut, de la vitesse de rotation, de la charge... et leur fréquence de répétition est liée notamment à la localisation du défaut (bague, bille, etc.). En comparant le signal obtenu avec un certain nombre de fréquences "caractéristiques" connues, il est alors possible de déduire la nature du défaut [16]. Dans la pratique, la présence des défauts aux fréquences caractéristiques n'est pas toujours facile à déceler [17]. Pour les mettre en évidence, il existe alors toutes sortes d'outils plus ou moins complexes de traitement du signal qui seront résumés dans les prochains paragraphes.

#### 3.4.4. Traitement du signal

Il existe de nombreuses méthodes de traitement du signal développées et proposées pour la détection de défauts de surface. Ils se concentrent tous sur la recherche de la fréquence de répétition des impulsions, car cela donne une indication claire du type de défaut.

Le lecteur peut se référer au document SKF 'vibration diagnostic guide'.

##### 3.4.4.1 Les indicateurs scalaires

A partir des mesures vibratoires, des traitements sont mis en place pour détecter les défauts de roulements, les plus simples étant la construction d'indicateurs scalaires. Dans ce cas, la mesure temporelle (sortie du capteur de vibration) est traitée directement. Il existe trois des indicateurs les plus courants : le facteur crête (FC), le facteur K et le kurtosis [17]. Le facteur crête s'exprime comme le rapport entre la valeur maximale du module du signal et la valeur efficace du signal. Le facteur K, est le produit des grandeurs précédentes. Enfin, le kurtosis est une grandeur statistique permettant d'analyser le caractère « pointu » ou « plat » d'une distribution [18]. Celui-ci est relié à la forme de la courbe représentant l'amplitude du bruit généré par un roulement.

L'interprétation du facteur crête se fait au travers de son évolution au fur et à mesure de la dégradation du roulement. Il doit augmenter dans les premières phases d'usure et diminuer en fin de vie du roulement. Le facteur K, quant à lui, doit augmenter avec l'usure du roulement. Typiquement la valeur de FC est multipliée par 10 entre la mesure effectuée pour le roulement sain et celle pour le roulement dégradé [19]. Il en va de même pour le kurtosis dont la valeur augmente avec la dégradation du roulement. Lorsque le roulement est sain, le kurtosis est proche de 3, ce qui correspond à un signal à distribution gaussienne [20]. Mais lorsqu'un défaut apparaît, l'allure de la courbe est modifiée. Par ailleurs, pour améliorer la qualité d'analyse fournie par le kurtosis, des méthodes de filtrage du signal vibratoire peuvent être mises en place [21], [22].

Les indicateurs vibratoires doivent par ailleurs être utilisés dans des bandes fréquentielles dépendantes du roulement considéré. En effet, pour être efficaces, les indicateurs scalaires s'appliquent sur des signaux dont la fréquence d'échantillonnage permet de prendre en compte au moins le premier mode propre de résonance de la bague externe. La *Figure 226* donne les valeurs formule pour déterminer les fréquences de résonances d'un roulement.

## A chaque défaut sa fréquence

Les défauts qui apparaissent sur les roulements se manifestent par l'apparition de chocs périodiques à des fréquences particulières. Pour réaliser un diagnostic fiable à partir d'un spectre, on peut donc utiliser un certain nombre de fréquences "caractéristiques" :

→ Fréquence de rotation de la cage :

$$F_{cage} = \frac{1}{2} \cdot F_{arbre} \cdot \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right)$$

→ Fréquence de défaut de la bague extérieure :

$$F_{ext} = N \cdot F_{cage}$$

→ Fréquence de défaut de la bague intérieure :

$$F_{int} = N \cdot (F_{arbre} - F_{cage})$$

où  $F_{arbre}$  est la fréquence de rotation de l'arbre,  $d$  le diamètre d'une bille,  $D_m$  le diamètre moyen du roulement,  $\alpha$  l'angle de contact et  $N$  le nombre de billes.

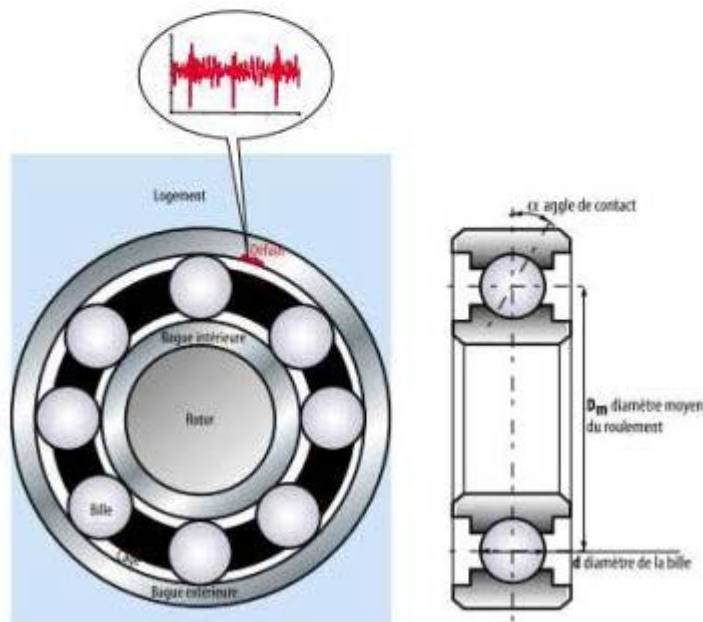


Figure 226. Résumé sur les fréquences de vibration d'un roulement à billes (extrait de [23])

L'inconvénient, c'est que tous les indicateurs scalaires décroissent lorsque les défauts se développent. A un stade avancé de la détérioration du roulement, ils reprennent une valeur proche de 3 pour le kurtosis, c'est-à-dire celle de l'état initial sans défaut. Pour pallier cet inconvénient, certains constructeurs d'outils de diagnostic (01 dB-Steel) ont alors défini leur propre descripteur. Il s'agit généralement d'une combinaison plus ou moins complexe des indicateurs classiques.

En revanche, aucun de ces différents indicateurs ne permet vraiment de réaliser un diagnostic fiable. Pour aller plus loin et comprendre l'origine du défaut détecté, les méthodes d'analyse spectrales (fréquentielles, temps-fréquences, etc.) sont alors mises en œuvre.

#### 3.4.4.2 Les méthodes fréquentielles

Les méthodes fréquentielles sont les méthodes les plus largement utilisées dans le monde industriel, de par leur facilité de mise en œuvre et d'interprétation. Elles s'appuient sur la transformée de Fourier, et plus particulièrement pour des signaux numériques sur la transformée de Fourier discrète rapide (Fast Fourier Transform, FFT). Cette représentation permet de connaître le contenu fréquentiel d'un signal temporel, et de localiser les fréquences caractéristiques de défauts [19].

Une adaptation de cette transformée à la localisation de défauts de roulements est particulièrement appréciée et largement utilisée. Il s'agit de la détection d'enveloppe ou high-frequency resonance technique (HFRT) [24] et couramment mise en œuvre par 01 dB-Stell [18]. En effet, les défauts de roulement de type choc excitent les hautes fréquences des structures, ainsi un phénomène de modulation se produit entre la fréquence de défaut (basse fréquence) et la résonance de structure (haute fréquence). Un filtrage passe-bande suivi de la transformée de Hilbert permet de détecter et d'isoler la basse fréquence. Par contre cette méthode nécessite de connaître une résonance de structure en hautes fréquences et elle est inefficace devant un bruit trop élevé [18].

Actuellement, dans l'industrie (roulements et des transmissions d'engrenage), l'analyse la plus répandue est la méthode Cepstrum. Le Cepstrum est le spectre du logarithme de la puissance spectrale. Il permet de détecter les périodicités dans le spectre. Les harmoniques dans le spectre sont sommées en un seul pic dans le cepstrum [18].

#### 3.4.4.3 Les indicateurs temps-fréquences

Les signaux non stationnaires ont exigé le développement de méthodes temps-fréquences. La présence des chocs dus aux défauts de roulements donne au signal vibratoire un caractère non stationnaire, ce qui interdit en principe l'utilisation de la transformée de Fourier qui suppose une stationnarité [19]. La transformée de Wigner-Ville [25], [26] et la transformée de Fourier à court-termes [27] sont les méthodes les plus utilisées. Il est important de noter que ces méthodes sont peu à peu remplacées par les méthodes temps-échelles qui, de par leurs propriétés, suppriment les distorsions de bord.

#### 3.4.4.4 Les indicateurs temps-échelles

La transformée en ondelettes est un outil récent de traitement du signal [28]. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier [29]. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse temps-fréquence classique [28], [30].

L'application de cette transformée, dans le domaine de la détection et du diagnostic des roulements, a été développée depuis environ 20 ans avec un engouement particulier. Mori, fut probablement l'un des pionniers avec l'utilisation de l'ondelette de Morlet pour le diagnostic des roulements [31]. Ensuite, de nombreuses études ont amélioré son utilisation et ont étendu le nombre d'ondelette mère [32]. Une revue sur le domaine a été réalisée par Peng et Chu [33]. Le choix de l'ondelette est un aspect primordial quant à la qualité des résultats. C'est pourquoi, elle doit être choisie en fonction du système étudié.

#### 3.4.4.5 Comparaison des différentes méthodes

Toutes les méthodes précédemment citées présentent des caractéristiques intéressantes pour la détection des défauts de roulements via les grandeurs vibratoires. Cependant, les méthodes de traitement du signal peuvent nécessiter une capacité de calcul et un espace mémoire de stockage relativement importants. Dans le cadre d'une application de surveillance autonome, où les systèmes

de mesures et de traitements sont intégrés auprès du roulement, les différents indicateurs doivent pouvoir être obtenus grâce à un microprocesseur de type Digital Signal Processor très faible consommation (souvent limité en puissance de calcul). La *Figure 227* donne le nombre d'opérations élémentaires à effectuer pour différents types d'algorithme en vue du traitement des données issues de l'analyse vibratoire. Il est intéressant de noter qu'un facteur 10 existe entre la transformée de Fourier et la transformée en ondelettes. Cette observation impose de bien choisir l'algorithme à utiliser pour le futur traitement des données.

Les *Tableau 14* et *Tableau 15* réalisent une comparaison en termes d'avantages et d'inconvénients pour les différents indicateurs vibratoires. Il ressort de ces informations qu'il n'existe pas de solution optimale. Mais le choix correspond à la combinaison de critères technique et économique. Il est donc nécessaire de bien identifier les besoins pour une application visée. De plus les vibrations ne sont pas les seuls phénomènes à trahir la présence de défauts sur un roulement. Les deux prochaines parties s'attacheront à décrire les méthodes d'analyse thermique et d'onde de choc.

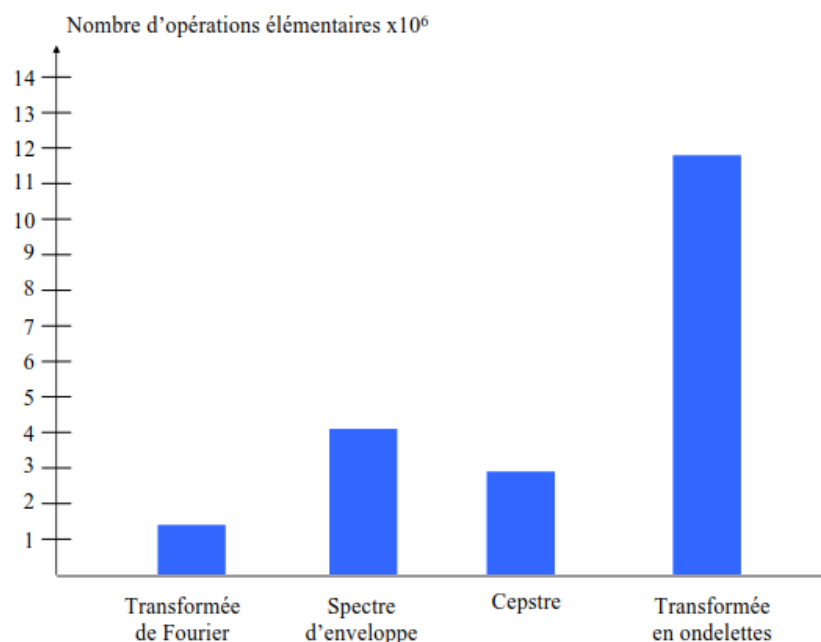


Figure 227. Nombre d'opérations élémentaires pour différents types d'algorithme d'analyse vibratoire, pour un nombre de points de 128 000

Type	Avantages	Inconvénients
Mesure d'accélération	+ Indicateur simple et fiable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection tardive</li> <li>- Diagnostic difficile</li> <li>- Pas adapté aux faibles vitesses</li> <li>- Détermination de seuils empiriques</li> </ul>

Type	Avantages	Inconvénients
Kurtosis	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Adapté à la surveillance des roulements d'arbres (vitesse &lt;600 tr/min)</li> <li>+ Détection à un stade précoce</li> <li>+ Grande sensibilité aux chocs périodique et non périodique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décroissance de l'indicateur en fin de vie du roulement</li> <li>- Diagnostic complexe</li> </ul>
Facteur de crête	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Indépendant des conditions de fonctionnement (Dimension du roulement, charge, vitesse de rotation, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décroit lorsque les défauts se développent</li> </ul>
Facteur de défaut	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Croît pendant toute la dégradation du roulement</li> <li>+ Détection à un stade précoce</li> <li>+ Peu sensible aux conditions de fonctionnement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diagnostic complexe</li> <li>- Peu adapté aux faibles vitesses de rotation</li> </ul>

Tableau 14. Avantages et inconvénients pour les indicateurs « simples » de type vibratoires (adapté de [18]).

Type	Avantages	Inconvénients
Analyse temporelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Adaptée aux faibles vitesses de rotation</li> <li>+ Permet d'analyser des phénomènes non périodiques (chocs aléatoires, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diagnostic difficile</li> </ul>
Analyse fréquentielle	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Permet de localiser les défauts et de réaliser un diagnostic fiable</li> <li>+ Ne nécessite pas de mesures supplémentaires</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interprétation des spectres parfois difficile</li> <li>- Détection tardive</li> <li>- Inopérant à vitesse ou charge variable</li> </ul>

Type	Avantages	Inconvénients
Détection d'enveloppe	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Diagnostic de défauts à un stade précoce</li> <li>+ Permet de déterminer de manière fiable et rapide les fréquences de répétition des chocs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interprétation des spectres parfois difficile</li> <li>- Nécessite de connaître le domaine fréquentiel d'intérêt</li> <li>- Inopérant si vitesse ou charge variable</li> <li>- Généralement associé à d'autres méthodes (Kurtosis par exemple)</li> </ul>
Analyse cepstrale	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Met en évidence les composantes périodiques d'un spectre</li> <li>+ Permet de localiser et déterminer les origines des défauts induisant des chocs périodiques</li> <li>+ Interprétation de spectres complexes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation en complément d'autres techniques</li> </ul>

Tableau 15. Avantages et inconvénients pour les méthodes d'analyse qualitative vibratoire (adapté de [18]).

Les méthodes d'analyse vibratoire les plus utilisées sont basés sur détection de l'enveloppe. Elle vise à calculer un spectre appelé Spectre Enveloppe (ES), dans lequel, en cas de présence d'un défaut, un pic de forte amplitude à la fréquence respective caractéristique des défauts, avec des sous-harmoniques, est observé. Une représentation schématique d'un ES typique est présenté à la Figure 228.

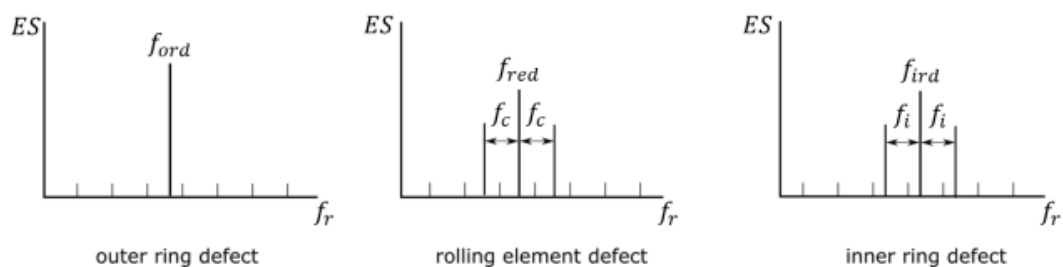
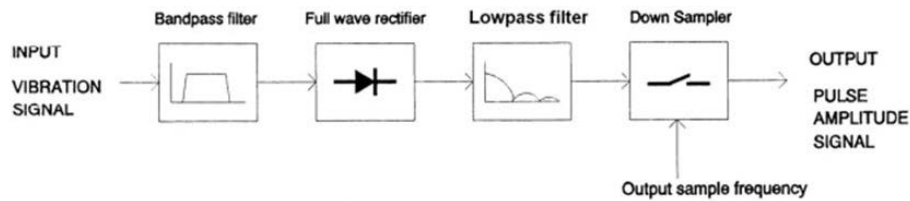


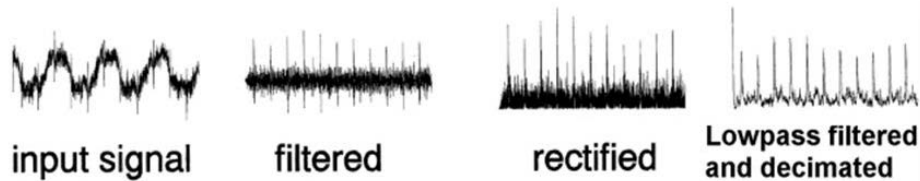
Figure 228. Représentation schématique du spectre enveloppe dans le cas de défauts sur la bague extérieure, intérieure et l'élément roulants



Dans l'ES, l'axe de la fréquence est  $f_r$  comme fréquence de répétition, car on montre la fréquence des événements répétitifs. Le processus de traitement du signal pour l'obtention du spectre de l'enveloppe est présenté dans la *Figure 229*.



**Figure 33. Enveloping chain's block diagram.**



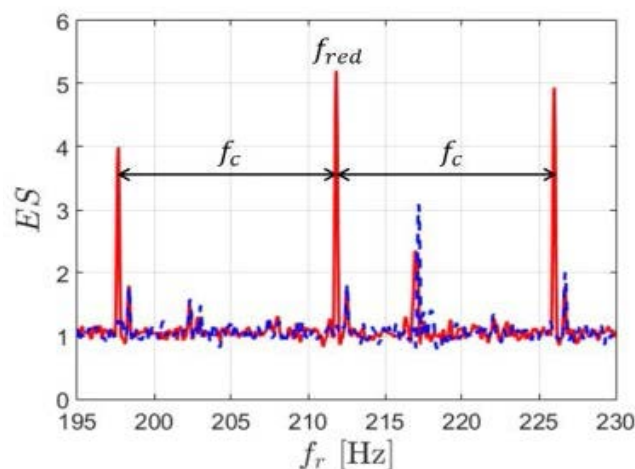
*Figure 229. Traitement du signal pour l'obtention de l'enveloppe*

### 3.4.5. Identification des défauts à partir de l'analyse vibratoire

La détection des défauts de surface locaux dans les signaux de vibration implique la recherche d'impulsions répétitives. La détection d'une impulsion répétitive à partir d'une fréquence de répétition proche d'une fréquence théorique calculée d'un roulement sont une forte indication de la présence d'un défaut local.

À titre d'exemple avec des données réelles, le cas d'un test de durée d'endurance est présenté. Un SRB 22220 avec la bague intérieure tournant à 2000 tr / min sous une charge radiale de 140 kN a été surveillé par un accéléromètre placé sur son carter. Le système peut être considéré comme similaire à celui représenté sur la *Figure 221*. Au début du test, le palier est sans défauts. Le test est arrêté lorsqu'un défaut se développe et est détecté.

L'ES du roulement dans un état sain et avec un défaut développé sont présentés à la *Figure 230*. Dans le spectre ES du roulement avec un défaut RE sur élément roulant (ligne solide rouge), les pics relatifs à  $f_{red}$  et ses bandes latérales à  $\pm f_c$  sont apparues, reproduisant le motif attendu pour un défaut d'élément roulant.



*Figure 230. Spectre enveloppe d'un roulement sain (en bleu) et après développement d'un défaut (en rouge)*

Puisque les pics peuvent aussi être présents dans des conditions normales aussi (ligne pointillée bleue), ils peuvent être considérés comme la signature saine de la machine, c'est-à-dire la référence de base. Cependant, ils pourraient également être une source de confusion dans le processus d'analyse. Pour cette raison, une analyse instantanée basée sur un seul relevé pourrait être risqué, conduisant à de mauvaises conclusions. Regarder dans le temps la tendance d'évolution de la fréquence de répétition et rechercher des changements significatifs de l'amplitude du pic est une approche plus robuste. Dans la *Figure 231.a* les évolutions sont présentées couvrant l'ensemble du test d'endurance. L'axe des fréquences de répétition est limité autour de  $f_{red}$  et sa première sous-harmonique placée à  $\pm f_c$ .  $f_{red}$  et les bandes latérales relatives à  $\pm f_c$  sont observées à partir approximativement de la 200ème heure du test. Ceci correspond à une évolution typique de défauts d'éléments roulants. Pour mieux visualiser uniquement sur la répétition due au défaut, il est possible de normaliser l'évolution du spectre ES avec le spectre ES moyen des 20 premières heures d'essai. De cette façon, il est possible d'obtenir l'évolution améliorée du spectre ES présentées à *Figure 231.b*, où seuls l'influence de la répétition due au défaut se distingue nettement.

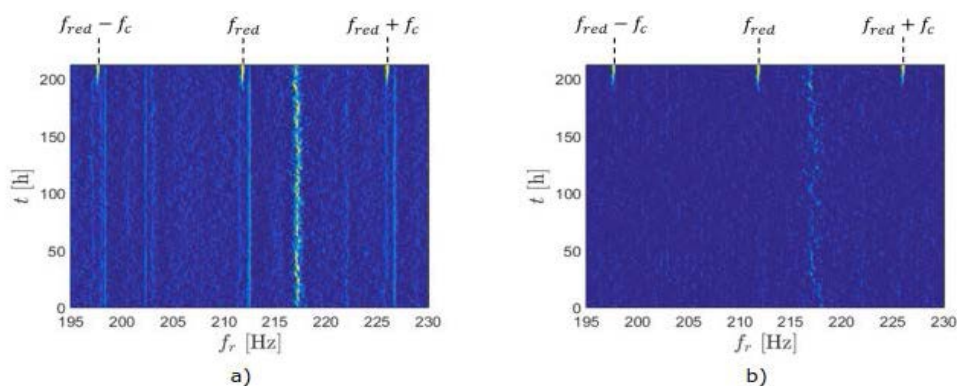


Figure 231. Evolution du spectre enveloppe en fonction du temps a) signal brut b) signal moyenné

Sur la *Figure 232*, l'énergie de la bande de fréquence à  $\pm 1$  Hz autour de  $f_{red}$ , indiquée par  $CI_{RE}$ , a été considéré comme un indicateur de condition pour le défaut de l'élément roulant.

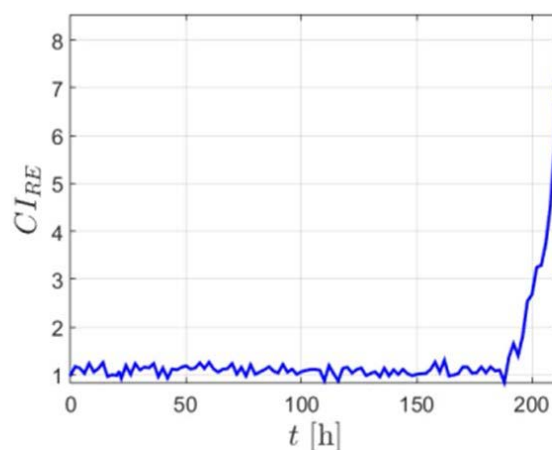


Figure 232. Indicateur de santé du roulement

En application réelle le système mécanique à surveiller est généralement plus complexe que le cas simple rapporté ici par simplicité. Une charge variable modifie les amplitudes de vibration et une vitesse de rotation variable déplace les fréquences défectueuses aussi. Ces conditions variables impliquent un indicateur de santé plus compliqué à déterminer. En outre, un système CBM est habituellement composé d'un réseau de multiples capteurs pour surveiller de multiples éléments

mécaniques pouvant faillir, c'est-à-dire roulements, engrenages, etc., rendant le système de diagnostic plus complexe pour identifier correctement l'élément de machine présentant le défaut. Enfin, dans une application réelle, le niveau de bruit de fond peut être assez élevé, ce qui challenge les performances de la partie traitement du signal.

### 3.4.6. Techniques de surveillance par mesures thermiques

Dans de nombreux cas, la température fournit des informations déterminantes sur le comportement en fonctionnement du roulement. Dans les roulements lubrifiés à la graisse, elle permet en règle générale de découvrir à un stade très précoce une détérioration ou une panne imminente [18].

La température est généralement mesurée sur la bague fixe, le plus souvent sur la bague extérieure. L'évaluation est faite sur la base des modifications de la température dans le temps. Afin d'obtenir une mesure fiable de la température, les règles suivantes doivent être respectées [34] :

- effectuer la mesure le plus près possible du roulement
- effectuer des mesures continues
- éviter les déformations des roulements dues aux sondes de mesure.

Le comportement thermique normal d'un roulement est stable. Si la durée d'utilisation de la graisse touche à sa fin, la température fluctue ; elle augmente puis chute. Il faudra intervenir au plus tard lorsque ces fluctuations s'inscrivent dans une tendance progressive. La *Figure 233* donne une réponse typique du temps en fonction de la température pour un roulement à bille.

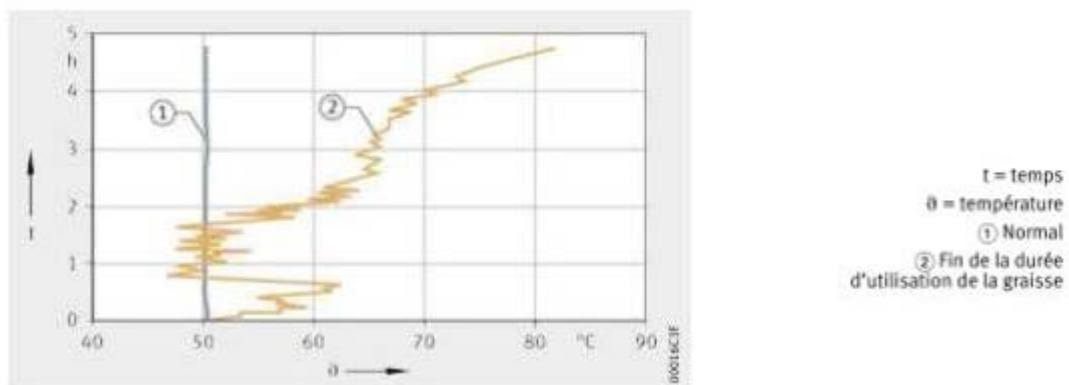


Figure 233. Comportement thermique des roulements (extrait de [11])

Ces dernières années ont connu une démocratisation des caméras infrarouge pour la mesure de température sans contact [34]. Ces instrumentations sont de plus en plus utilisées par les services de maintenance, comme l'illustre la *Figure 234* où le défaut dans un roulement provoque une élévation de température sur un système de convoyage.

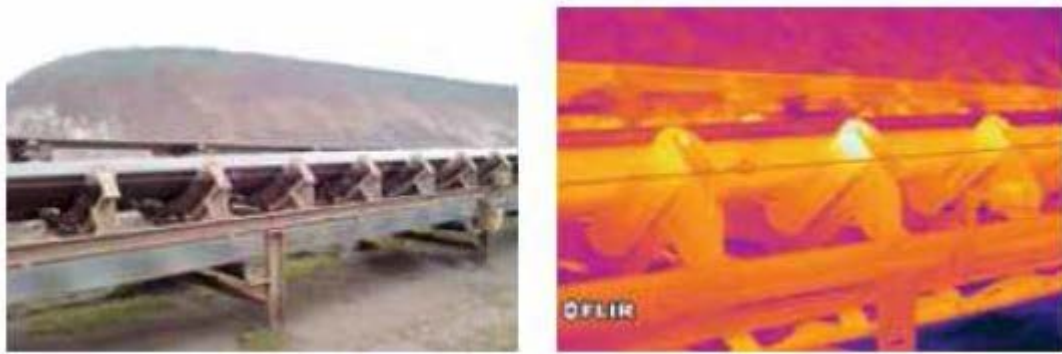


Figure 234. Thermographe d'une installation industrielle (extrait de [35])

De plus les caméras offrent de nouvelles possibilités en termes d'identification de compréhension des défauts dans les roulements. La Figure 235 illustre l'évolution d'un thermographe pour une vitesse de rotation de 3000 tr/min pour différentes configurations (normal, problème de lubrification, problème d'écaillage). Il est intéressant de noter une élévation de la température différente selon le type de phénomène rencontré.

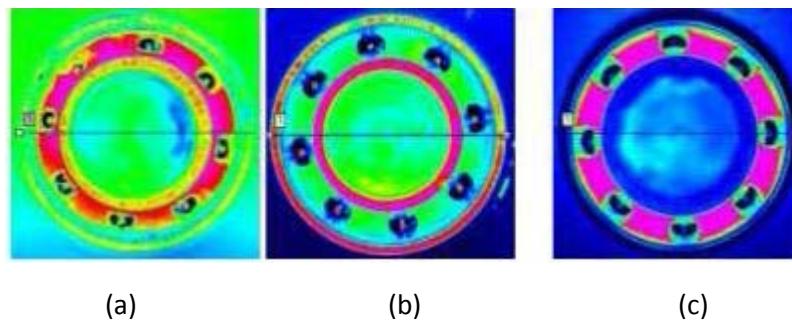


Figure 235. Thermographe d'un roulement à 3000 tr/min, (a) fonctionnement normal, (b) problème de lubrification, (c) écaillage (extrait de [36])

### 3.4.7. Techniques par onde de choc

Pour les roulements rapides, l'analyse vibratoire et la thermographie infra-rouge sont couramment utilisées avec succès (voir les paragraphes 3.4 et 3.4.6). Le suivi des roulements lents est une toute autre histoire. Lorsque la vitesse de rotation descend en dessous de 250 tours par minute, la thermographie n'est plus adaptée [37]. L'analyse vibratoire est difficile à manier. Elle requiert une analyse complexe du signal et les temps d'acquisition sont également rédhibitoires pour des applications embarquées. La détection par onde de choc représente la solution simple et efficace, elle est basée sur l'écoute de signal ultrasonore [38].

Les chocs sont révélateurs de la défaillance des roulements. Un roulement dégradé, écaillé par exemple, génère une onde de choc. L'événement est de très courte durée. C'est pourquoi il est présent en haute fréquence. Plus précisément, l'impact libère une énergie localisée lors de chaque passage d'un élément roulant sur la zone écaillée [39].

Contrairement à l'analyse vibratoire, le contrôle ultrasonore ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi. Avec un détecteur à ultrasons, il est possible, par exemple, de détecter un certain niveau de bruit sur un palier, de le comparer aux valeurs habituelles. Mais seule l'analyse vibratoire permettra de localiser précisément le défaut (bague interne ou externe, bille, etc.) [39].

L'avantage du contrôle ultrasonore est de permettre une détection des dysfonctionnements à un stade plus précoce que les techniques traditionnelles. En effet, les défauts commencent à se manifester

généralement en haute fréquence, se déplacent à des fréquences de plus en plus faibles (avec une énergie croissante) au fur et à mesure de leur dégradation.

#### 3.4.8. Techniques par analyse chimique et visuelle

Une autre méthode consiste à analyser l'huile présente dans le roulement. Parfois, un simple examen visuel est riche d'enseignements : une graisse noire est le signe d'une usure anormale, une graisse rouge brune peut trahir la présence d'une corrosion, une graisse polluée d'éléments métalliques révèle un écaillage des surfaces, etc [39]. Il est aussi possible de prélever un échantillon du fluide de graissage et l'analyser avec des méthodes quantitatives d'analyse chimique (telles que la ferrographie) [18].

## Annexe 2. Vers le roulement autonome

Ces dernières années ont connu une accélération en termes d'intégration de capteurs au sein du roulement. Il est possible de mesurer la grande majorité des grandeurs physiques, ouvrant la voie à de nombreuses applications, dont le diagnostic de défaillance in-situ pour améliorer la politique de maintenance et de sécurité des systèmes. Maintenant que les roulements mécatroniques ont gagné en maturité, les acteurs du marché cherchent à rendre leurs produits communicants et autonomes. SKF pour le produit Insight™ indique que le dispositif fonctionne sans source d'énergie extérieure [61]. L'objectif de cette partie est la présentation des solutions actuellement envisageables pour répondre à cette demande.

### 5.1. Les sources d'énergie possibles

Extraire de l'environnement ambiant la part d'énergie nécessaire pour assurer le fonctionnement d'un micro-dispositif électronique reste un formidable challenge : Il devient alors capteur, énergétiquement autonome, sans fil et facilement intégrable. Et surtout il bannit l'utilisation de batteries et résout de ce fait les problèmes liés à l'autonomie, à la durée de vie, à la maintenance et l'ajout de câble pour l'alimentation et la transmission des données. Il semble donc intéressant de disposer de roulement instrumenté capable d'effectuer leur propre contrôle de santé et d'envoyer les données sans fil. L'ensemble fonctionnant de façon autonome (sans source d'énergie extérieur).

Dans le chapitre suivant consacré à la récupération d'énergie, les sources d'énergie thermique et vibratoire étaient ressorties comme les plus envisageables pour les applications aéronautiques visées par SKF. Dans les prochains paragraphes les solutions possibles de micro-génération pour l'auto-alimentation de fonction intégrée au roulement seront présentées.

#### 5.1.1. La récupération d'énergie mécanique

Les vibrations sont présentes dans les environnements utilisant des roulements. Celles-ci étant déjà utilisées pour réaliser la fonction de contrôle de santé. Il existe différentes méthodes pour convertir les vibrations ou mouvement de rotation en énergie électrique.

##### 5.1.1.1 Récupération d'énergie par conversion électromagnétique

Les générateurs électromagnétiques sont basés sur l'induction électromagnétique, principe mis en évidence par Faraday [78]. La force électromotrice peut être générée par le mouvement relatif entre une bobine et un aimant créant un champ magnétique fixe, ou par une variation temporelle du champ magnétique.

A titre d'exemple, dans le cadre du projet WISD (Wireless sensors and energy harvesting for rotary wing aircraft Health and Usage Monitoring Systems) visant à intégrer une plateforme de capteurs autonomes pour la mesure des contraintes subis par les éléments en rotation [79]. Un micro-générateur électromagnétique présenté en *Figure 236* a été utilisé pour l'alimentation des capteurs et l'émission des données. Par contre aucune information concernant les propriétés électriques (puissance disponible en sortie, etc.) ne sont disponibles.

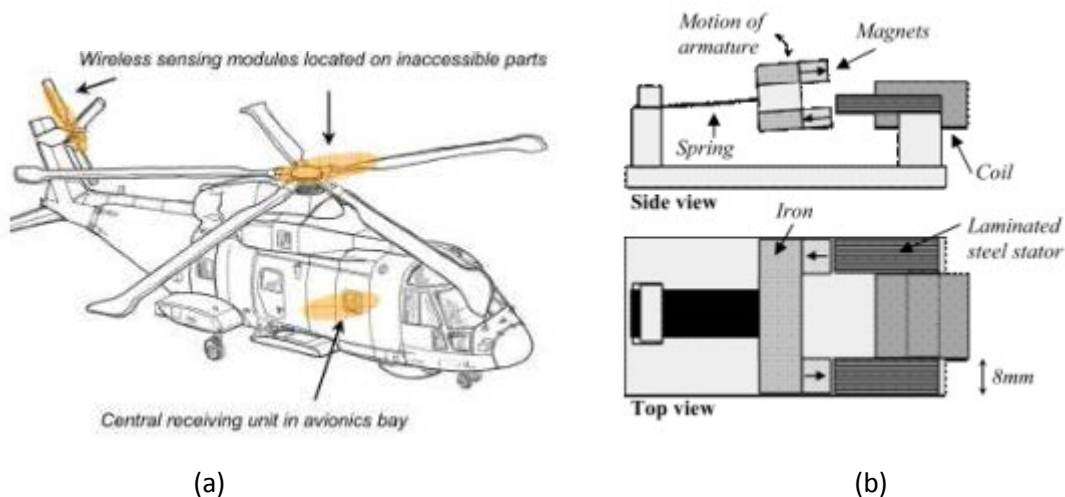


Figure 236. Projet WISD, (a) principe du projet, (b) micro-générateur développé (extrait de [79])

Certains constructeurs de roulements s'orientent aussi vers la technologie électromagnétique. C'est le cas de Schaeffler, comme l'illustre la Figure 237. Le principe de conversion repose sur celle de la dynamo d'un vélo. Le rotor est couplé à l'axe en rotation, la production de courant se fait par une bobine tournante dans un champ magnétique d'un aimant permanent. Le produit étant en cours de développement peu d'informations sont disponibles.



Figure 237. Capteur autonome de chez Schaffler pour le projet TSS-F (extrait de [74])

Le japonais NSK avec le produit NSK « wireless sensor bearing » fabrique des roulements intelligents pour la surveillance de points stratégiques et difficiles d'accès sur des pompes de plateformes pétrolières [80]. Ces produits sans fil sont dotés d'un générateur qui leur permet de transmettre par ondes radio la température et les vibrations mesurées [81]. C'est la rotation même du roulement qui fournit l'énergie nécessaire à l'envoi des données par GSM, à la manière d'une dynamo [80]. Une

signature identifiant le roulement émetteur est associée à ces données. L'enjeu est d'éviter toute casse par fissuration ou échauffement. Ce produit n'a été réalisé que très ponctuellement et sur-mesure selon les besoins du client.

Pour Timken l'auto-alimentation des systèmes passe aussi par l'utilisation de mini-génératrice à courant continu, comme le montre brevet déposé en 2000[82] [83]. Par contre, il propose d'effectuer la génération d'énergie à l'aide d'éléments piézoélectrique. Mais le brevet reste très évasif sur le sujet. De plus à l'heure actuelle aucun communiqué de chez Timken, ne permet de connaître les développements sur le sujet. Il est possible de faire la même remarque pour les produits de NTN où les informations disponibles sont parcellaires [84] [85] [86].

Le groupe Volvo Truck s'intéresse aussi à la problématique de l'auto-alimentation des systèmes d'antiblocage des roues (Figure 238) [87]. L'alimentation du capteur est réalisée à l'aide d'un capteur à réductance variable disponible chez des équipementiers comme WABCO (<http://www.wabco-auto.com/>).

L'ensemble est constitué d'un capteur fixe et d'une roue dentée en acier. Le capteur est principalement constitué d'un aimant permanent entouré d'une bobine de fil de cuivre. Lorsque la roue dentée tourne devant l'aimant, l'entrefer prend alternativement deux valeurs différentes (mini et maxi) et cela donne naissance à un champ magnétique variable dans la bobine, induisant à ses bornes une tension alternative proportionnelle à celui-ci (plus précisément à la dérivée du flux). L'amplitude de ce signal augmente lorsque l'entrefer diminue. Sa fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation de la roue dentée. L'étude a montré qu'il est possible de générer une puissance de  $280\mu\text{W}$  en sortie du capteur sur une résistance de  $1\text{k}\Omega$  [87]. Depuis la publication de l'étude en 2012, aucune nouvelle n'est disponible sur la future implémentation dans des véhicules de séries.

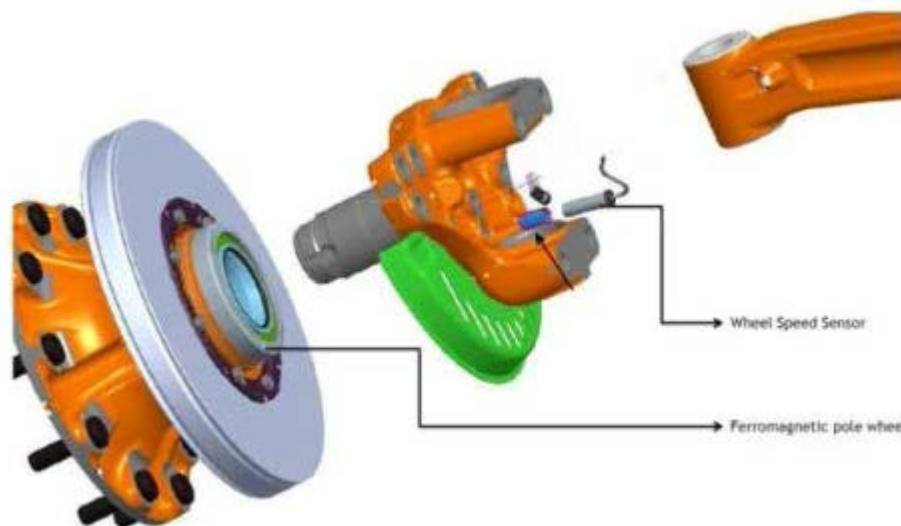


Figure 238. Système d'anti blocage des roues chez Volvo Truck (extrait de [87])

D'un point de vue universitaire, la récupération d'énergie sur les mouvements de rotations par conversion électromagnétique s'oriente vers la technologie des systèmes autoquartz couplés à une petite génératrice (Figure 239) [88].

Le principe de conversion repose sur une masse oscillante qui transmet son énergie mécanique (cinétique et potentielle) à un ressort spiral intégré dans un micro-barillet permettant sa charge quel que soit le sens de rotation de la masselotte. Lorsque le ressort atteint un état de charge donné, il se



décharge en entraînant une génératrice à aimants permanents monophasée dont la tension est redressée par un pont à transistors MOS afin de charger un accumulateur électrique [88].

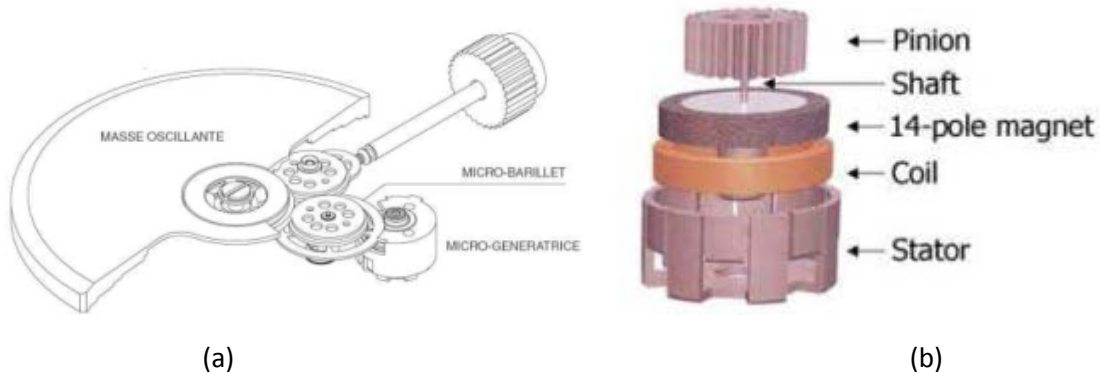


Figure 239. Générateur autoquartz (a) principe de fonctionnement, (b) éclaté de la génératrice (extrait de [89])

L'université de Floride propose un système qualifié de faible coût basé sur le mouvement d'un aimant libre dans un espace circulaire comme l'illustre la Figure 240 [90]. L'objectif étant de récupérer sur les mouvements du corps humain ou les systèmes en rotation. Pour des vitesses de rotation de 600 tr/min le système à une densité de puissance générée de  $300\mu\text{W}/\text{cm}^3$ .

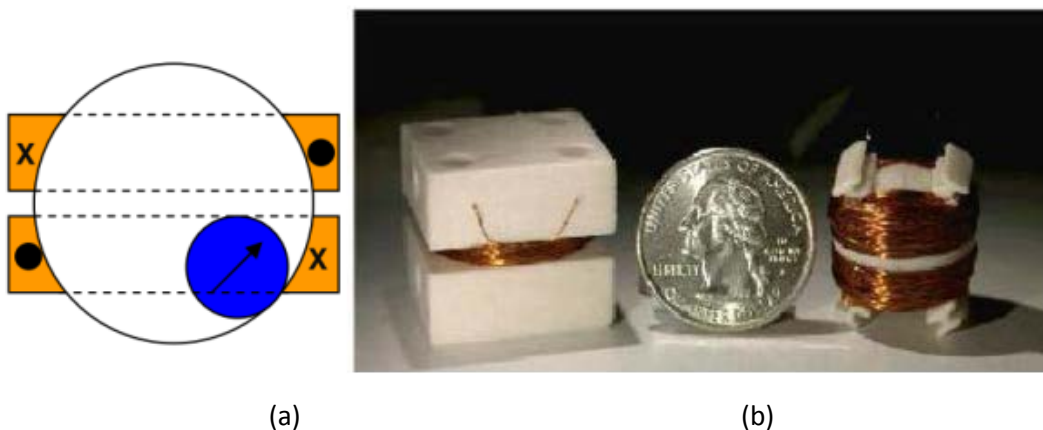


Figure 240. Générateur faible coût, (a) principe de fonctionnement, (b) photographie des prototypes (extrait de [90])

### 5.1.1.2 Récupération d'énergie par conversion piézoélectrique

La récupération d'énergie mécanique par matériaux piézoélectriques est basée sur l'utilisation de l'effet direct du matériau : la déformation que subit le matériau est convertie en charge électrique. De nombreux travaux de recherches sur le développement de microgénérateurs autonomes ont abouti à des résultats significatifs, comme cela avait été présenté dans l'état de l'art réalisé par le LGEF pour SKF en Février 2013.

Actuellement des applications industrielles basées sur des microgénérateurs piézoélectriques ont été développées. Par exemple la start-up Arveni utilise une structure développée par le LGEF pour auto-alimenter une télécommande infrarouge (Figure 241), une commercialisation est programmée pour le second trimestre 2014.



Figure 241. Télécommande autonome de chez Arveni alimenté par la technologie LGEF (extrait de [91])

La société Suisse Algra développe des interrupteurs piézoélectriques avec leur gamme de produits (DYNA) [92]. Pour ce type de commutateurs, un déplacement de 1 à 10 microns suffit à produire une tension ou une charge électrique employable pour envoyer une information. Le constructeur a particulièrement travaillé sur l'aspect du nombre de cycles réalisable par le dispositif (>10 millions) et une électronique très basse consommation (10 $\mu$ W pour envoyer 10 bits). La Figure 242 donne une vue schématique de l'interrupteur autonome sans-fil.

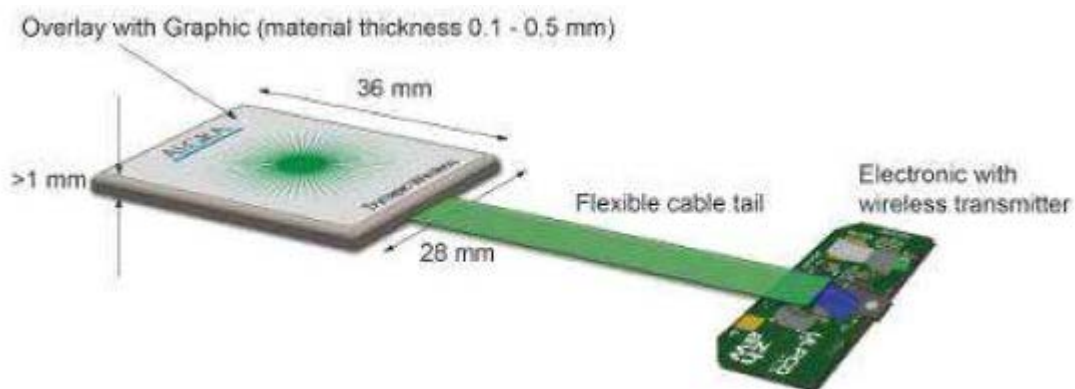


Figure 242. Interrupteur piézoélectrique de chez Algra (extrait de [92])

Concernant la thématique des roulements, certains groupes proposent d'utiliser la récupération d'énergie par élément piézoélectrique, comme SKF avec le produit InsightTM [61] et le brevet de Henk-Mol [63] déposé en 2008 ; ou encore NTN [84] [85] [86]. Mais aucune information ne filtre sur la véracité du concept utilisé.

Certains groupes de recherche universitaire ont étudié la possibilité de récupérer sur les mouvements de rotations, mais en se focalisant plus sur la conversion d'énergie à partir des mouvements humains [93] – [95]. Un exemple de système réalisé par l'Université de Cranfield est disponible en Figure 243. Une puissance de 2mW a été mesurée en sortie du système, sur les mouvements de la marche.

Pour le moment les recherches académiques ne se sont pas tellement intéressées à la récupération d'énergie pour des roulements à l'aide d'éléments piézoélectriques [96] [67] [97] [98]. En effet le nombre

de publications sur le sujet est faible. Par contre il est intéressant de noter que des groupes comme SKF lance des projets sur le sujet avec des partenaires Universitaires [99].

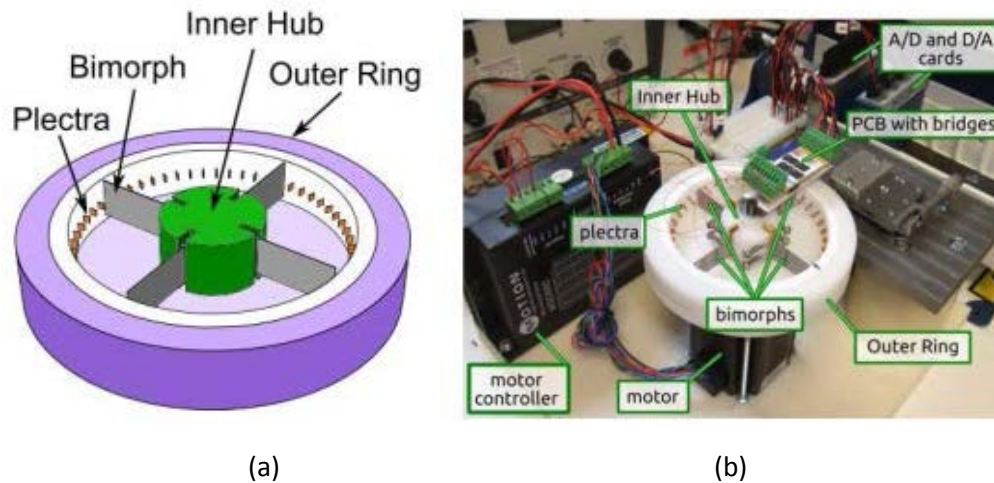


Figure 243. Récupérateur d'énergie piézoélectrique à partir des mouvements de rotation humaine, (a) principe de la structure, (b) photographie du démonstrateur (extrait de [93], [94])

### 5.1.1.3 Récupération d'énergie par conversion électrostatique

Un générateur électrostatique, exploite les variations de capacité d'une structure, variations imposées par un mouvement mécanique. Ce principe de conversion n'est pas direct comme celui mis en œuvre grâce à la piézoélectricité. Ce type de générateur est une structure passive qui nécessite la réalisation de cycles énergétiques pour convertir l'énergie mécanique en électricité [100]. Il est possible d'utiliser des électrets afin de supprimer la source de tension nécessaire au fonctionnement du système [101].

Un grand nombre de recherche ont été réalisées ces dernières années pour le développement de ce type de micro-générateurs [101], sans pour autant que des applications industrielles ne suivent. En effet excepté l'entreprise Sanyo qui en 2008 a proposé une architecture capable de délivrer  $40\mu\text{W}$  pour une fréquence de 2Hz avec les dimensions du système  $23 \times 42 \times 6\text{mm}$  [102] (actuellement le système n'est pas commercialisé), aucune société ne s'est lancée dans l'utilisation de cette technologie. Par contre certains laboratoires ont orienté leurs recherches sur les mouvements de rotation à l'aide de micro-générateur électrostatique.

A titre d'exemple l'Imperial College of London propose un concept, basé sur le mouvement d'un rouleau sur un chemin avec des électrodes sectorisées, comme l'illustre la Figure 244 [103]. Une variation de capacité se produit lorsque le rouleau passe d'une électrode à la suivante. Les auteurs ne donnent pas beaucoup d'informations sur les performances énergétiques de leurs systèmes. En effet le but de faire une mesure passive (variation de capacité) induit une variation de la fréquence de résonance dans un circuit LC.

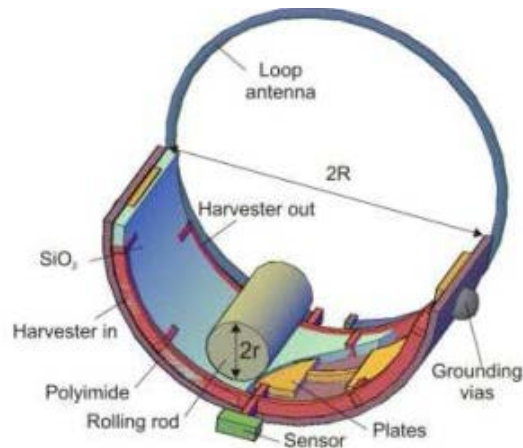


Figure 244. Vue schématique d'un générateur électrostatique appliqué aux roulements (extrait de [103])

Il semble intéressant de noter la possibilité de dévier des matériels du commerce de leur fonction primaire pour réaliser la fonction de générateur. Le moteur électrostatique de chez Shinsei (Figure 245) pourrait sans doute être utilisé comme génératrice. Le mouvement de rotation provoquerait une variation de capacité (comme dans le cas des capacités à air utilisées dans les postes radios).

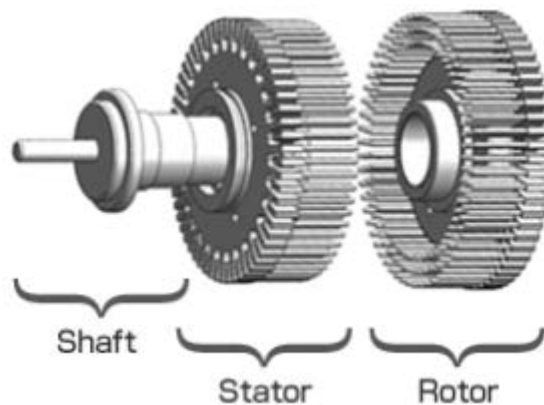


Figure 245. Moteur électrostatique de chez Shinsei (extrait de [104])

#### 5.1.1.4 Comparaison des différentes technologies

Les précédents paragraphes ont permis de mettre en avant les technologies couramment utilisées pour la récupération d'énergie. Chacune possédant des avantages et des inconvénients. Toutefois quelques tendances en rapport avec le contexte de l'étude (application au contrôle de santé des roulements) peuvent être émises.

La première génération de micro-générateurs proposée par les fabricants de roulements repose sur l'utilisation de génératrice à aimant permanent (principe de la dynamo). L'avantage certain de cette solution est la maturité technologique éprouvée depuis plus de 40 ans. Par contre cela pose des problèmes en termes d'intégration de compatibilité électromagnétique sans oublier de vieillissement accéléré du roulement dans certain cas. En effet pour certaine application les roulements sont disposés dans des systèmes lubrifiés où des particules magnétiques peuvent être présentes. Or le champ magnétique créé par les « dynamos » risque de provoquer un agglomérat des particules magnétiques près du roulement d'où une usure prématurée.

Les générateurs piézoélectriques et électrostatiques se prêtent bien à la récupération d'énergie, mais un travail en amont reste à faire concernant le développement d'architecture capable de convertir les mouvements de rotations en électricité. La technologie piézoélectrique semble intéresser les acteurs

du marché avec un certain nombre d'actions en cours autour de cette thématique. Elle dispose d'avantages comme : une bonne tenue des matériaux de conversions, une intégration facile, et un certain retour d'expérience depuis les dix dernières années.

Pour les générateurs électrostatiques des verrous technologiques restent à résoudre avant de passer à leurs applications. Notamment le besoin d'une source de tension pour la réalisation des cycles énergétique [101]. Cela peut être fait par l'utilisation d'électret, mais la température maximale d'utilisation d'un électret disponible dans le commerce est de 110°C, limitant ainsi le domaine de fonctionnement du système. De plus la majorité des recherches s'oriente sur la réalisation de système à l'échelle MEMS souvent difficilement transposable industriellement [101]. Reste l'utilisation détournée de certains dispositifs du commerce pour répondre à la fonction de micro-génération d'énergie (moteur électrostatique Shinsei). Une comparaison entre les différentes technologies est disponible dans le Tableau 16.

	<b>Electromagnétique</b>	<b>Electrostatique</b>	<b>Piézoélectrique</b>
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Grand courant de sortie</li> <li>+ Robustesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Très grande tension de sortie</li> <li>+ Récupération sur des faibles fréquences</li> <li>+ Possibilité d'intégration facile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Grande tension de sortie</li> <li>+ Grande capacité électrique</li> <li>+ Simplicité d'utilisation</li> <li>+ Robustesse</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Volumineux</li> <li>- Usinage de précision</li> <li>- Peu de connaissance sur la tenue en température</li> <li>- Problème de CEM</li> <li>- Interaction avec les particules dans le lubrifiant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité d'une source de polarisation.</li> <li>- Circuit de gestion électrique complexe</li> <li>- Guidage mécanique</li> <li>- Faible capacité (sensible aux capacités parasites)</li> <li>- Pas de retour sur la durée de vie</li> <li>- Peu de connaissance sur la tenue en température</li> <li>- Développement d'architecture capable de récupérer sur les mouvements de rotations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les propriétés de conversion du microgénérateur sont intimement liées à celle de l'élément piézoélectrique.</li> <li>- Développement d'architecture capable de récupérer sur les mouvements de rotations</li> </ul>

Tableau 16. Comparaison entre les différentes technologies de récupérateur d'énergie mécanique

### 5.1.2. La récupération d'énergie thermique

Les sources de vibration mécaniques n'étant pas les seules sources disponibles dans l'environnement autour du roulement, les prochains paragraphes s'attacheront à l'étude de la récupération d'énergie thermique (friction ou causé par l'environnement).

#### 5.1.2.1 Récupération d'énergie à l'aide d'éléments pyroélectrique

La pyroélectricité est la propriété d'un matériau dans lequel un changement de température entraîne une variation de polarisation électrique. Cette variation de polarisation crée une différence de potentiel temporaire, celle-ci disparaissant après le temps de relaxation diélectrique. Un grand nombre de recherches académiques ont été réalisées autour de cette thématique pour utiliser ce phénomène pour la récupération d'énergie, comme le résume le papier de Sebald et al. [105] et la thèse de Lallart [106]. Malgré un fort engouement de la communauté scientifique pour les éléments pyroélectriques, aucun générateur industriel n'a été développé à l'heure actuelle.

Par contre il semble possible d'imaginer d'utiliser ces éléments si un gradient de température est présent dans la structure du roulement. Un élément pyroélectrique pourra être placé sur le rotor et lors du passage entre la partie froide et chaude du « stator » (bague extérieure), une variation de température temporelle provoquera la création de charge électrique. Le principe de conversion est illustré en Figure 246.

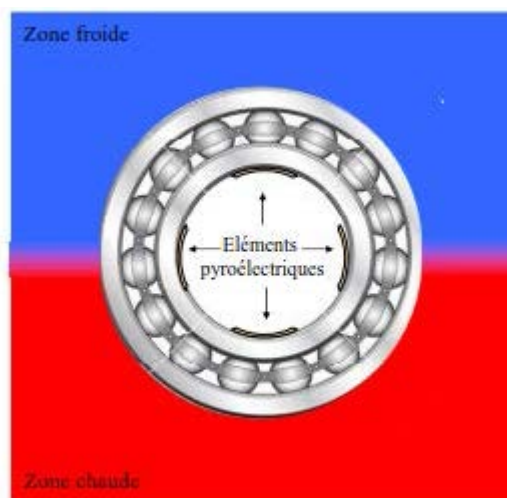


Figure 246. Principe de conversion à l'aide d'éléments pyroélectrique.

D'autres systèmes de récupérateur d'énergie basé sur l'utilisation d'éléments pyroélectrique et piézoélectrique et de bilame thermique, ont été récemment proposés par la société ST microelectronics et le LGEF de l'INSA de Lyon [107], [107]. La solution innovante issue de la collaboration permet de s'affranchir de dissipateur de chaleur nécessaire lors de l'utilisation de générateurs thermoélectriques. En effet, les prototypes développés permettent d'exploiter des gradients thermiques spatiaux, sont flexibles et reposent sur une double conversion :

- Thermomécanique : assurée par un bilame thermique
- Mécano-électrique : assurée par un élément piézoélectrique.

La Figure 247 donne un exemple du micro-générateur développé, actuellement le système à une épaisseur de 5 mm.

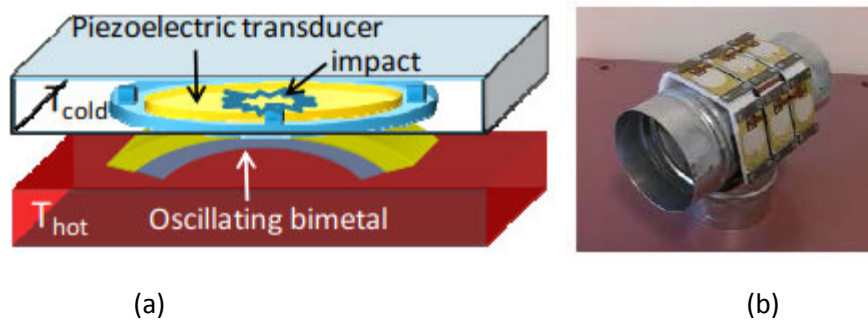


Figure 247. Conversion à l'aide de bilame thermoélectrique réalisé par ST microélectronique et le LGEF (a) principe, (b) mise en application (extrait de [107], [108])

### 5.1.2.2 Récupération d'énergie à l'aide d'éléments thermoélectriques

L'effet Seebeck couramment nommé thermoélectricité consiste à la création d'une différence de potentiel aux extrémités d'un conducteur ou semi-conducteur lorsque celui-ci est soumis à un gradient de température. L'architecture des micro-générateurs thermoélectriques et le principe de fonctionnement sera détaillé en chapitre 3.

Des applications pour la récupération d'énergie au niveau de points chauds commencent à voir le jour, avec des sociétés comme MicroPelt [109]. Cette entreprise propose des systèmes qui intègrent des générateurs thermoélectriques miniatures, couplés à des convertisseurs DC/DC. Grâce à de tels systèmes, il est possible de convertir efficacement l'énergie thermique provenant de points chauds, même si la tension délivrée par le générateur thermoélectrique est relativement faible (typiquement 100mV pour des faibles gradients de températures). La Figure 248 illustre le module thermoélectrique à base Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> fabriqué par l'entreprise MicroPelt.

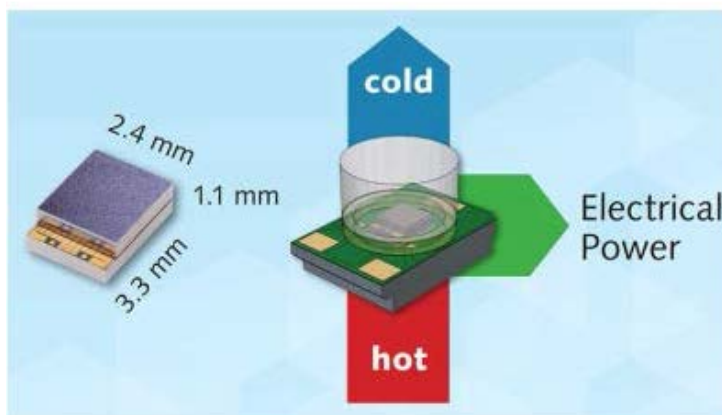


Figure 248. Module thermoélectrique de chez Micropelt (extrait de [109])

Le produit TE-Power RING de chez Micropelt a été spécialement conçu pour la récupération d'énergie thermique sur les roulements [110]. La Figure 249 résume l'architecture développée pour récupérer l'énergie thermique présente sur les roulements. Il s'agit d'une structure sous forme d'un anneau, où deux modules thermoélectriques (Figure 249) sont fixés à 180° l'un de l'autre. Dans l'objectif d'avoir un gradient thermique entre la source chaude (en contact avec le roulement) et l'air ambiant un dissipateur est intégré à la structure. Le circuit électronique de gestion, typiquement un convertisseur DC/DC est inséré entre la source chaude et la source froide. En effet les systèmes électroniques (capteurs, contrôleur numérique, émetteur/récepteur radio, etc) nécessitent typiquement une tension stabilisée, de valeur comprise entre 0.9V à 5V, et plus fréquemment située entre 1.8V et 3.6V. Or le coefficient de Seebeck global des générateurs thermoélectriques se situe généralement au voisinage des centaines de millivolts par degré (chez MicroPelt 150mV/C°) [109]. La tension délivrée par le

module s'avère donc généralement insuffisante pour alimenter un système électronique. Il faut donc augmenter cette tension de sortie au moyen d'un convertisseur DC/DC à découpage.

D'après les informations disponibles sur le site de MicroPelt il semble que le fabricant se soit orienté sur la technologie flyback (tension de démarrage faible et gain en tension important). La Figure 250 donne le schéma du circuit électronique de gestion de l'énergie de chez MicroPelt. Par contre aucune information n'est disponible sur les capteurs sans-fil utilisés.

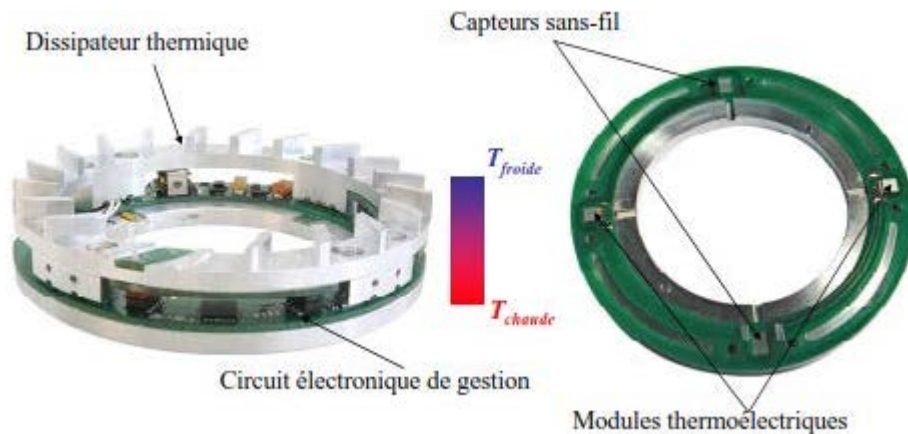


Figure 249. Micro-générateur TE-Power RING pour la récupération d'énergie sur roulement (adapté de [110])

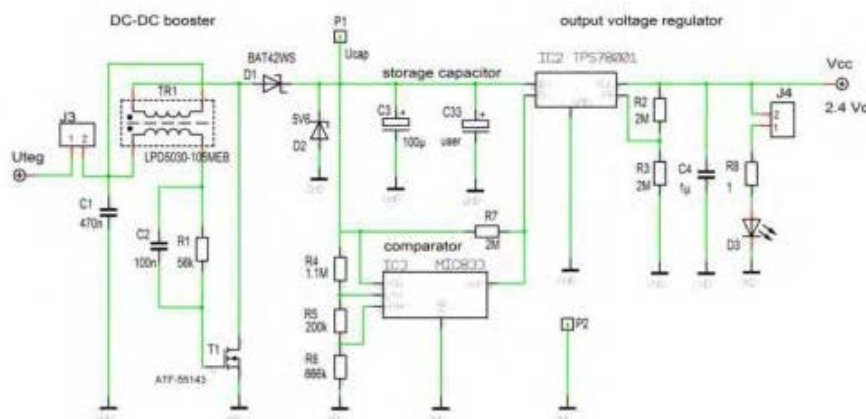


Figure 250. Circuit électronique de gestion de l'énergie (extrait de [111])

Dans le but de prouver le principe de fonctionnement de leur concept, la société MicroPelt a intégré le TE-Power Ring sur un roulement à bille couplé à une dynamo frein [110], comme le montre la Figure 251. La fabricant indique la possibilité de mesurer la vitesse et la température du roulement à l'aide du dispositif.



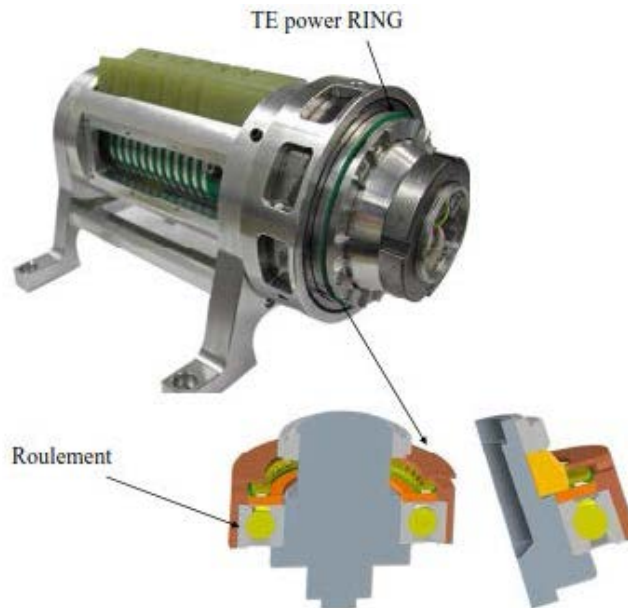


Figure 251. Banc de test pour la mise en œuvre du TE-Power Ring (adapté de [110])

La Figure 252 (a) donne l'évolution de la puissance et la tension en circuit ouvert pour le thermogénérateur MPG-D751 utilisé dans la structure TE-power RING. Pour la Figure 252 (b) les mesures de températures et de la tension en circuit ouvert sont présentées en fonction de la vitesse de rotation. En combinant les deux informations une puissance de 5mW peut être générée lorsque le système tourne à une vitesse de 1000 tr/min.

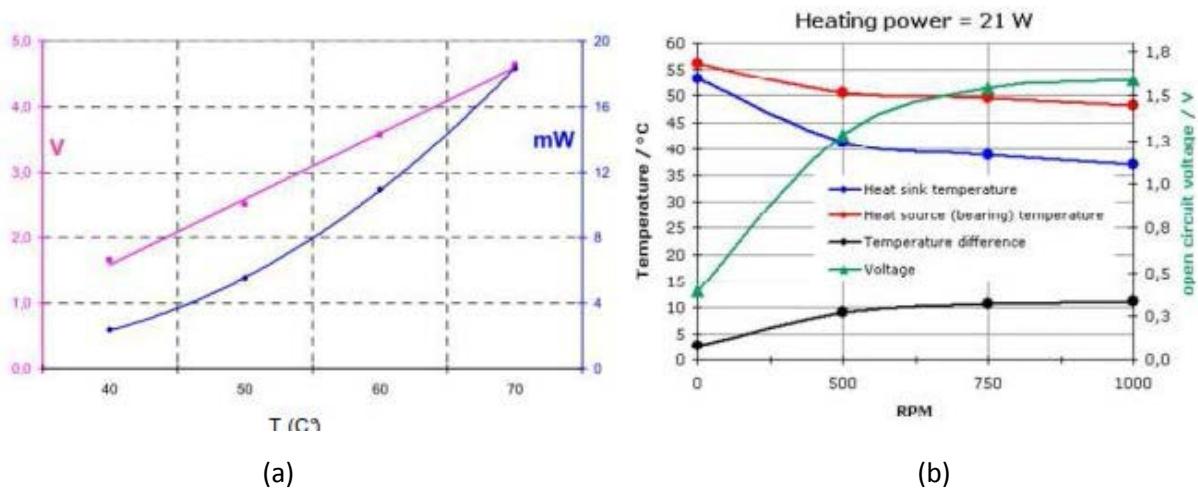
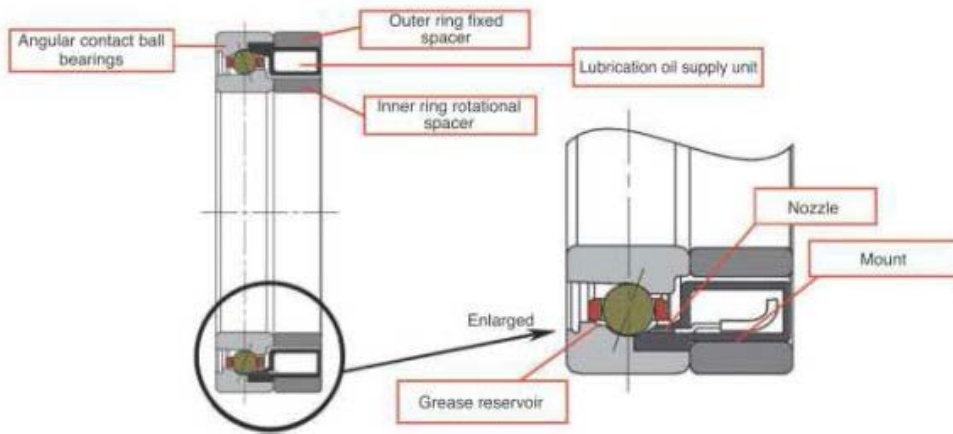


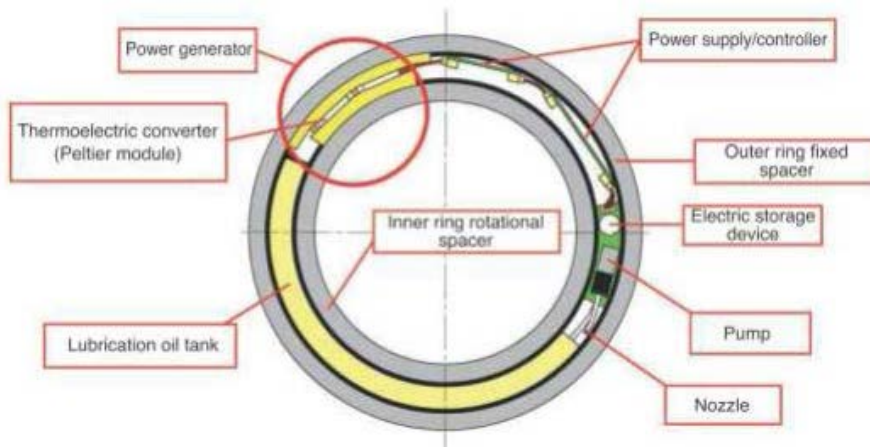
Figure 252. Caractéristiques du TE-power RING, (a) puissance et tension de sortie en fonction de la température chaude pour le thermogénérateur MPG-D751, (b) température et tension en circuit ouvert en fonction de la vitesse (adapté de [110])

Le constructeur Micropelt n'est pas le seul à avoir proposé un micro-générateur thermique pour des applications roulements. Le fabricant NTN développe roulement avec une lubrification autonome comme l'illustre la Figure 253 (a). Le but est de disposer d'un roulement capable d'ajouter le lubrifiant lorsque celui-ci vient à manquer le tout fonctionnant sans pile [112]. Pour cela un module thermoélectrique est intégré au roulement ainsi que l'électronique de conversion et de commande de la pompe comme le monde la Figure 253(b).

Les informations présentes dans le document sont parcellaires [112], par exemple aucune information n'est disponible sur la puissance nécessaire, la différence de température requise pour que le système fonctionne. La seule information concerne le temps de charge pour arriver à un niveau de tension (Figure 254). Au vu d'un temps de charge d'au minimum une heure, la puissance nécessaire pour actionner la pompe doit être importante. D'après les auteurs cela ne semble pas rédhibitoire sachant qu'il faut renouveler la lubrification toutes les 100 heures.



(a)



(b)

Figure 253. Produit de chez NTN à base de module thermoélectrique, (a) principe du circuit de lubrification, (b) schéma de principe du système complet (extrait de [112])

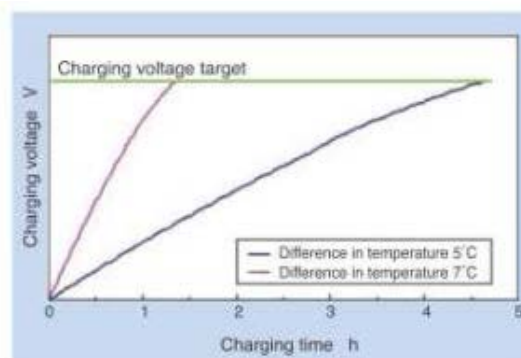


Figure 254. Temps de charge pour deux gradients de températures (extrait de [112])

NTN-SNR ainsi que SKF ont récemment déposé des brevets sur l'utilisation de module thermoélectrique pour l'alimentation de capteurs sur roulements [113], [114]. Cela démontre encore l'intérêt des acteurs industriels pour cette technologie. La communauté scientifique s'intéresse aussi au développement de micro-générateurs thermoélectriques pour des applications autour du monitoring des roulements.

A titre d'exemple l'Université des Sciences et technologies de, Krokow en Pologne, propose d'utiliser l'énergie récupérée à l'aide de module thermoélectrique pour réaliser du contrôle de vibration [115] [116]. Le principe du micro-générateur est disponible en Figure 255. Trois modules Seebeck sont insérés entre le « housing » du roulement et des dissipateurs thermiques pour maintenir un gradient thermique [117].

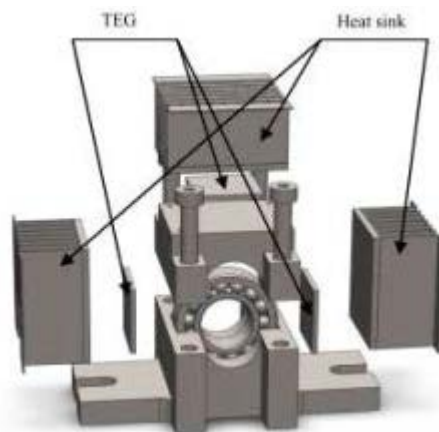


Figure 255. Structure de la récupération d'énergie sur le « housing » du roulement (extrait de [117])

Dans le but de tester leurs structures, un banc de test présenté en Figure 256 a été réalisé. Un moteur électrique produit l'excitation mécanique, une charge radiale est appliquée sur l'axe à l'aide d'un ressort de compression. Le système de récupération d'énergie est disposé en bout d'arbre M. L. Lubieniecki et al. ont réalisé différents essais sur des roulements détériorés et non-détériorés, pour une vitesse de 3000 tr/min et un effort radial de 100N [117]. Les auteurs ont mesuré des puissances récupérées comprises en 50mW et 100mW en sortie des modules, mais aussi que pour 30W de puissance dissipée, le système en convertissait 30mW en puissance électrique [117]. De plus avec cette énergie récupérée, ils ont proposé de faire du contrôle de vibration semi-actif à l'aide d'éléments piézoélectrique [115].

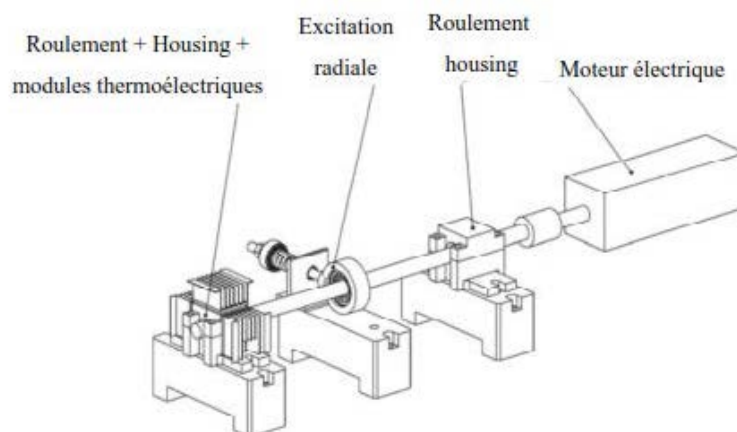


Figure 256. Principe du banc de test (adapté de [115])

### 5.1.2.3 Comparaison des différentes technologies

Comme dans le cas de micro-générateurs récupérant sur des vibrations mécaniques, les puissances récupérées par conversion thermique sont faibles, mais permettent l'alimentation de fonctions primaires (capteur) voire d'actionneur (pompe). L'état de l'art a montré l'existence de deux technologies, pouvant récupérer soit en exploitant des gradients temporels de température, soit en exploitant des gradients spatiaux. Le Tableau 17 résume les avantages et inconvénients inhérents à chaque technologie. Un avantage certain revient à la récupération par effet Seebeck, en raison des retours d'expériences positifs, réalisés par différents acteurs du marché, mais aussi la maturité technologique permettant d'avoir des solutions industrialisables rapidement. Il ne faut sans doute pas écarter les matériaux pyroélectriques qui commencent à prendre leur envol. En effet à l'heure actuelle, peu de recherches ont été lancées pour des applications roulements, malgré des densités de puissances intrinsèques supérieures à l'effet Seebeck [105].

	Pyroélectrique	Thermoélectrique
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Grande tension de sortie</li> <li>+ Possibilité de récupérer sur des variations temporelles rapides de température</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Maturité technologique</li> <li>+ Large gamme de matériau</li> <li>+ Circuit dédié pour la récupération d'énergie</li> <li>+ Robustesse</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les propriétés de conversion intimement liées à celles de l'élément pyroélectrique.</li> <li>-- Difficulté de récupérer sur des gradients spatiaux, nécessité d'une conversion de gradient spatial en temporel à l'aide de machine thermique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible rendement ~10%</li> <li>- Volume, nécessite des dissipateurs thermiques pour conserver le gradient spatial.</li> <li>- Difficulté de récupérer sur des fluctuations temporelles de la température</li> </ul>

Tableau 17. Comparaison entre les différentes technologies de récupérateur d'énergie thermique

## 5.2. Les solutions envisageables pour la récupération d'énergie sur roulements

L'émergence des roulements instrumentés et des dispositifs de communication ultra-basse consommation permet d'explorer de nouvelles solutions pour alimenter, par exemple des capteurs intégrés aux roulements, en vue de réaliser des systèmes de diagnostic autonome et communiquant. Le moyen le plus approprié pour alimenter de telles plateformes de capteurs est de récupérer de l'énergie environnante pour la transférer aux capteurs afin de les rendre autonomes. L'état de l'art réalisé dans les sections précédentes a montré que l'énergie mécanique représente une solution intéressante, car cette source d'énergie est peu limitée et les éléments piézoélectriques semblent de bons candidats pour la réalisation de micro-générateur d'énergie. Dans un premier temps, les principes de conversion piézoélectrique seront rappelés. Dans un deuxième temps, les différentes architectures envisageables autour du roulement seront introduites. Au final le rapport se focalisera sur les contraintes de mise en œuvre permettant de discuter de l'opportunité d'utiliser ce type de dispositifs pour alimenter les systèmes de la société SKF.

## 5.2.1. La récupération d'énergie par effet piézoélectrique

### 5.2.1.1 Généralités

Le processus d'extraction de l'énergie mécanique d'une structure vibrante est schématisé en Figure 257. Une perturbation extérieure (choc, appui, vibration...) impose un certain état de contrainte  $T_e$  et de déplacement  $u_e$  sur la structure, générant des vibrations. Cet état dépend directement des caractéristiques intrinsèques de la source perturbatrice et de la structure. Une quantité d'énergie  $E_i$  est alors injectée. Une part de cette énergie ( $E_d$ ) est dissipée par pertes mécaniques intrinsèques. Une autre part de cette énergie ( $E_e$ ) va être convertie par les éléments actifs par effet piézoélectrique et est de ce fait extraite de la structure. Cette énergie électrique ( $E_e$ ) permet ainsi d'alimenter un consommateur électrique quelconque en lui fournissant la tension et le courant requis. La plupart des circuits intégrés fonctionnant grâce à une alimentation électrique continue, il est nécessaire d'insérer un étage de conversion de la tension variable de l'élément piézoélectrique en tension continue et éventuellement un élément de stockage (condensateur, accumulateur).

Les micro-générateurs piézoélectriques peuvent être constitués d'un système mécanique présentant une fréquence de résonance qui couple le micro-générateur aux vibrations ambiantes, ou bien les éléments piézoélectriques peuvent être directement sollicités. La Figure 258 illustre les deux types de générateurs. Il s'agit dans les deux cas de convertir l'énergie vibratoire de la structure vibrante représentée en gris.

- Générateur à couplage direct (Figure 258 (a)) : Les éléments actifs sont couplés à la structure vibrante. Ils convertissent alors directement les perturbations mécaniques présentes dans la structure en énergie électrique. Ce type de générateur est particulièrement adapté aux structures se déformant en flexion. L'énergie récupérée dépend dans ce cas directement du champ de contrainte et de déformation imposé par la structure sur l'élément actif.
- Générateur à couplage indirect (Figure 258 (b)) : Les éléments actifs sont couplés à un oscillateur mécanique. Ils convertissent alors sous forme d'énergie électrique les vibrations de cet oscillateur. Ces oscillations sont induites par couplage mécanique à la structure.

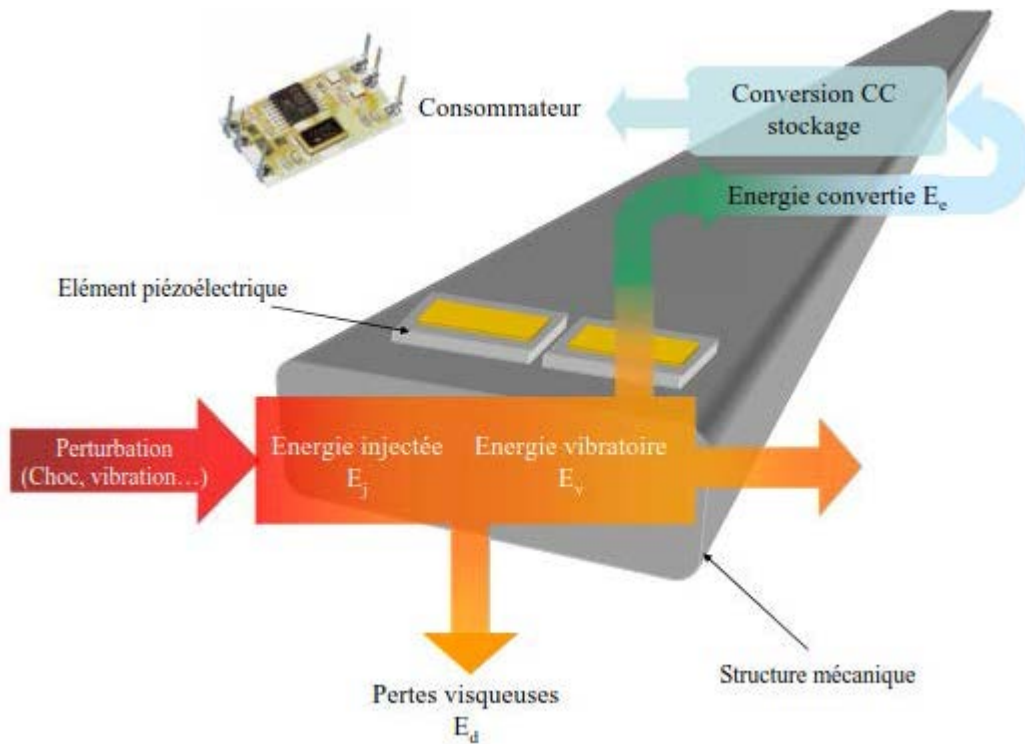


Figure 257. Processus d'extraction d'énergie d'une structure vibrante par élément piézoélectriques

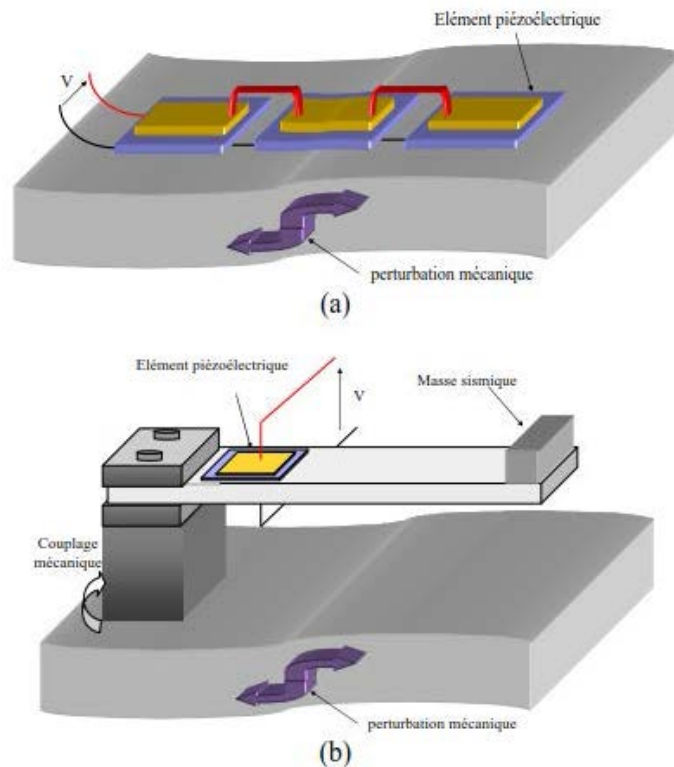


Figure 258. Les deux types de générateur piézoélectrique (a) Couplage direct (b) Couplage indirect par l'intermédiaire d'un oscillateur mécanique

Ce type de générateur convient aux structures vibrantes sans déformations locales. L'énergie récupérée dépend alors dans ce cas de l'accélération induite par le déplacement de corps rigide de la structure. Le Tableau 18. Comparaison des architectures à couplage direct et indirect résume les avantages et inconvénients de chacune des architectures de microgénérateurs.

	Couplage direct	Couplage indirecte
Avantages	+ Masse et encombrement réduit  + Large bande	+ Coefficient de couplage important  + Maintenance aisée (démontable)
Inconvénients	- Maintenance difficile (intégré dans la structure)  - Sensible aux évolutions des conditions aux limites	- Bande passante réduite  - Sensible à la direction de l'accélération  - Masse ramenée non négligeable

Tableau 18. Comparaison des architectures à couplage direct et indirect

Le choix entre ces deux types de générateurs est donc dicté avant tout par le type de structure hôte, par les déformations qu'elle subit et par les spécifications du cahier des charges, notamment en termes d'installation et de maintenance.

#### 5.2.1.2. Bilan énergétique

Une compréhension physique simple des mécanismes d'échange énergétiques est obtenue par une approche analytique basée sur un modèle simplifié à constantes localisées. Une structure quelconque (poutre, coque, plaque...) peut se modéliser autour d'un de ses modes de résonance par le système mass-ressort-amortisseur. La masse dynamique  $M$  inclue la masse de la structure hôte et celle des éléments piézoélectriques. La rigidité équivalente  $K_E$  est la rigidité globale résultante du couplage structure-élément piézoélectrique en court-circuit. Les pertes visqueuses intrinsèques sont modélisées par l'amortisseur  $C$ .

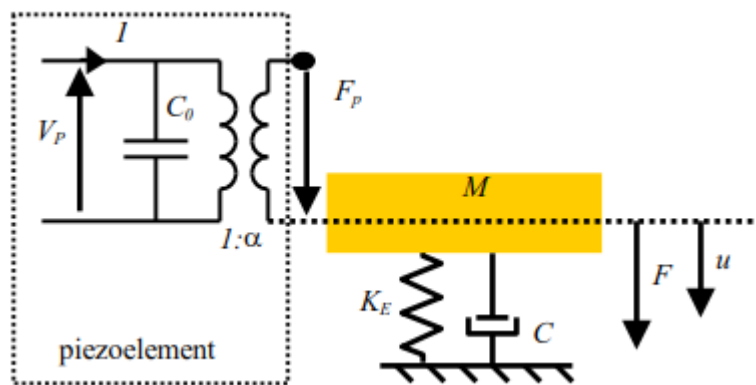


Figure 259. Modèle simplifié à constantes localisées.  $M$  est la masse dynamique équivalente,  $K_E$  est la rigidité équivalente et  $C$  l'amortissement équivalent. Élément piézoélectrique de capacité équivalente  $C_0$  et facteur de couplage  $a$

Les 2 équations constitutives du système données par (1) et (3) traduisent successivement l'équilibre dynamique et l'équilibre électrique. La conversion électromécanique est caractérisée par le facteur de force  $a$  traduisant la proportionnalité entre la force  $F_p$  appliquée sur l'élément piézoélectrique et la tension résultante  $V_p$  (2). Lorsque l'élément piézoélectrique est en circuit ouvert ( $I = 0$ ), le couplage électromécanique peut s'exprimer à partir de (3) sous la forme (4).

$$(1) M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K_E \cdot u = F + F_p$$

$$(2) F_p = -\alpha \cdot V_p$$

$$(3) I = \alpha \cdot \dot{u} - C_0 \cdot \dot{V}_p$$

La rigidité équivalente en circuit ouvert  $K_D$  est exprimée par (5). Le coefficient de couplage dynamique  $k$  du modèle simplifié est (6). Il traduit le rapport de l'énergie électrique emmagasinée dans le matériau  $W_E$  sur l'énergie élastique totale  $W_M$ .

$$(4) \dot{V}_p = \frac{\alpha}{C_0} \cdot \dot{u}$$

$$(5) K_D = K_E + \frac{\alpha^2}{c_0}$$

$$(6) k = 1 - \frac{K_E}{K_D} = \frac{\alpha^2}{C_0 \cdot K_D} = \frac{W_E}{W_M}$$

Le bilan énergétique du système est obtenu à partir des équations (1), (2) et (3) et (4) en multipliant par la vitesse  $u$  et en intégrant par rapport au temps :

$$(7) \underbrace{\int F \dot{u} dt}_{\text{Energie injectée } E_i} = \underbrace{\int M \ddot{u} dt}_{\text{Energie potentielle } E_p} + \underbrace{\int K_E u \dot{u} dt}_{\text{Energie cinétique } E_c} + \underbrace{\int C \dot{u}^2 dt}_{\text{Energie dissipée } E_d} + \underbrace{\int \alpha V_p \dot{u} dt}_{\text{Energie extraite } E_e}$$

Optimiser la part d'énergie extraite par conversion revient donc à maximiser le terme  $E_e$ . Le dispositif de conversion doit donc idéalement amplifier l'amplitude de la tension des éléments piézo-actifs tout en synchronisant cette tension  $V_p$  avec la vitesse de vibration  $\dot{u}$ , soit :

$$(8) \text{optimiser } \int \alpha V_p \dot{u} dt \Rightarrow \begin{cases} \text{augmenter } |V_p| \\ V_p \propto \text{signe}(\dot{u}) \end{cases}$$

### 5.2.1.3. Technique SSHI

Afin d'optimiser la conversion d'énergie comme présenté dans le paragraphe 5.2.1.3., le LGEF a développé les techniques SSHI (Synchronized Switching Harvesting on Inductor). Ces techniques reposent fondamentalement sur un traitement non linéaire de la tension obtenu à l'aide d'interrupteurs électroniques. La commande de ces interrupteurs est synchrone avec le déplacement vibratoire de la structure. La structure de base (Figure 260) utilise deux blocs fonctionnels principaux : un détecteur d'extremums de déplacement et l'étage de commande des interrupteurs. La Figure 260 détaille le traitement SSHI. Lorsque celui-ci est inactif (Figure 260 (a)), la tension en circuit ouvert aux bornes de l'élément piézoélectrique  $V_p$  est une simple image du déplacement  $u$  (d'après (4)). Lorsque le contrôle est actif, les interrupteurs  $S_{w1}$  (si  $V_p > 0$ ) ou  $S_{w2}$  (si  $V_p < 0$ ) connecte pendant un bref instant l'élément piézoélectrique sur l'inductance  $L$  à chaque fois que le déplacement atteint un maximum ou un minimum. Il en résulte une inversion de la tension  $V_p$ .



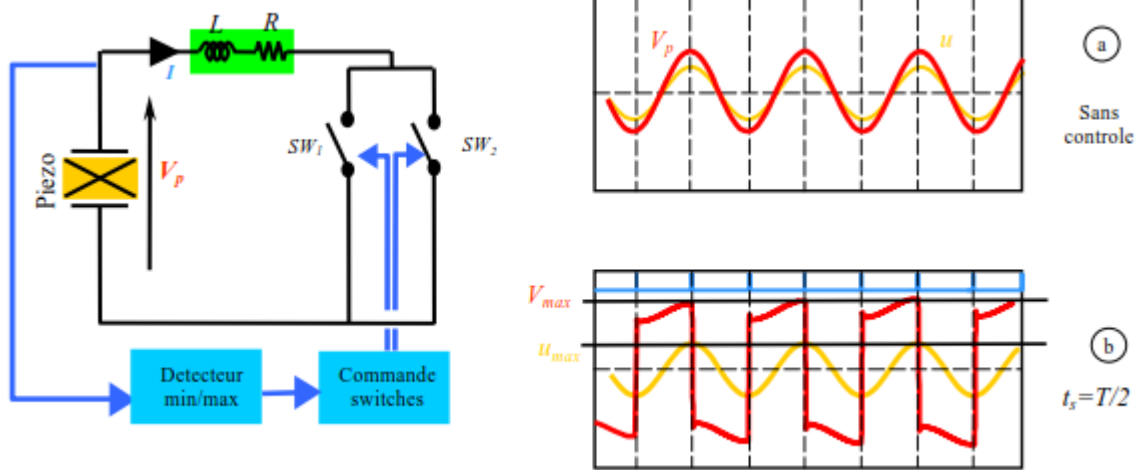


Figure 260. Principe de la technique SSHI

Entre deux commutations, l'élément est maintenu en circuit ouvert et la tension évolue de nouveau comme le déplacement  $u$ . La tension résultante  $V_p$  (Error! Reference source not found. (b)) voit donc son amplitude augmentée et se retrouve en quadrature de phase avec le déplacement  $u$ , autrement dit en phase avec la vitesse, ce qui répond aux conditions d'optimisation de l'énergie extraite énoncées en (8).

#### 5.2.1.4. Les micro-générateurs SSHI

Deux types de microgénérateurs exploitant la technique SSHI ont été développés à partir du schéma générique de la Figure 260, Ils sont principalement différenciés par la position de l'étage redresseur :

- Les microgénérateurs SSHI série (Figure 262) où l'étage redresseur est placé en série avec l'élément piézoélectrique et l'étage de commutation.
- Les microgénérateurs SSHI parallèle (Figure 263) où l'étage redresseur est placé en parallèle avec l'élément piézoélectrique et l'étage de commutation

Le développement théorique de ces microgénérateurs est largement détaillé dans les travaux de thèse de A. Badel [3]. Une analyse complète des aspects énergétiques peut également être trouvée dans [4]. Afin de situer les performances des microgénérateurs SSHI, ils sont ici comparés aux microgénérateurs standards (Figure 261).

Pour ces derniers, l'élément piézoélectrique  $P1$  fournit directement l'énergie électrique à l'élément de stockage au travers d'un pont redresseur. Tant que la tension  $V_p$  est inférieure à la tension  $V_b$ , l'élément piézoélectrique est en circuit ouvert et  $V_p$  est sinusoïdale. Lorsque le pont redresseur est passant, la tension  $V_p$  est égale à  $\pm V_b$

Dans la configuration SSHI série, l'inversion de la tension  $V_{p1}$  s'effectue autour de la valeur de  $V_p$  alors que dans la configuration SSHI parallèle, l'inversion de la tension  $V_{p1}$  a lieu autour d'un potentiel nul mais est limitée par la tension  $V_B$ , valeur limite de conduction des diodes.

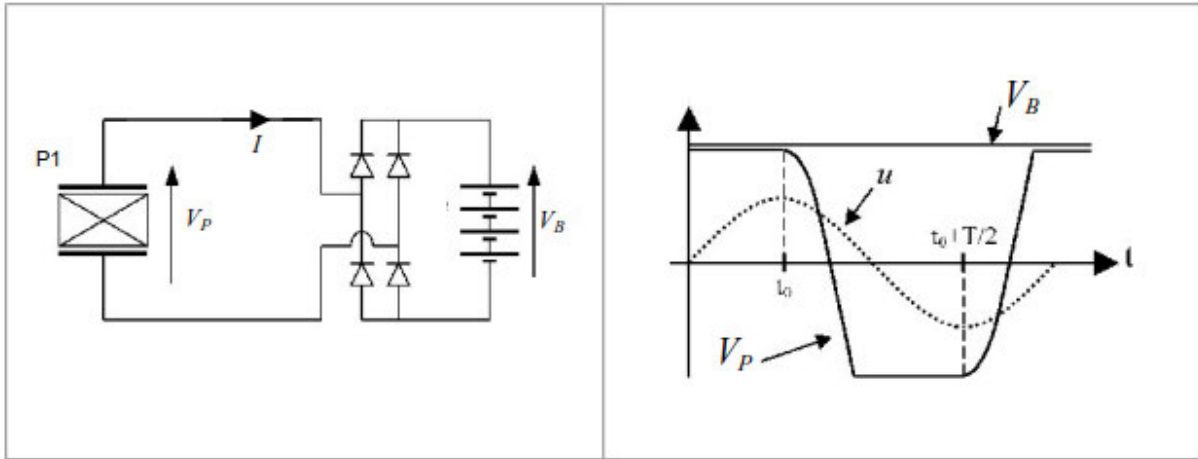


Figure 261. Système de récupération standard. Synoptique et formes d'ondes résultantes.

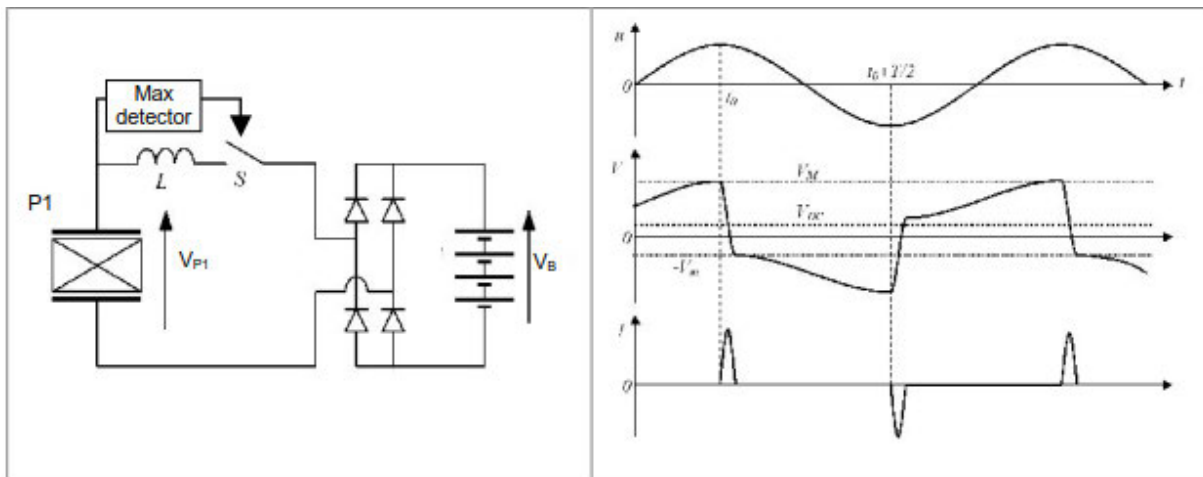


Figure 262. Système de récupération SSHI série. Synoptique et formes d'ondes résultantes.

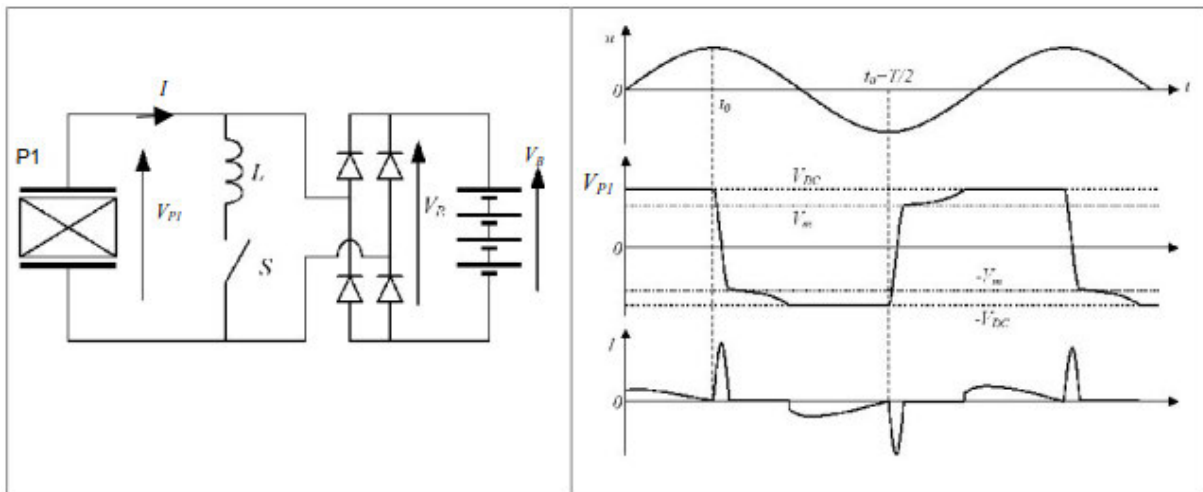


Figure 263. Système de récupération SSHI parallèle. Synoptique et formes d'ondes résultantes.

Dans les trois cas cités précédemment, la puissance récupérée atteint un maximum  $P_{max}$  lorsqu'il y a adaptation d'impédance ; soit pour une valeur optimale  $(V_b)_{opt}$  de la tension aux bornes de l'élément de stockage ; soit pour une valeur optimale de résistance  $R = R_{opt}$  si le micro-générateur alimente une simple charge.

Ces valeurs sont résumées dans le Tableau 19 lorsque la structure hôte est soumise à une vibration sinusoïdale d'amplitude maximale  $U_m$ . Le rendement maximal  $\eta_{max}$  est le rapport de l'énergie électrique récoltée à la résonance sur l'énergie élastique de la structure.

Le gain engendré par le traitement SSHI en termes de puissance récupérée dans le cas d'une excitation à amplitude constante est représenté Figure 264. Comparaison des différentes méthodes.. Ce facteur est donné en fonction du coefficient d'inversion  $\gamma$  pour des valeurs réalistes n'excédant généralement pas 0.95.

Des gains théoriques de l'ordre de 5 à 30 dans le cas optimal peuvent ainsi être observés avec les techniques SSHI. Ce cas optimal correspond au respect de la condition d'adaptation d'impédance (ou de tension) imposée par la valeur ( $R_{opt}$  ou  $(V_b)_{opt}$ ). A noter que cette valeur optimale est supérieure d'un facteur  $2/(1+\gamma)$  dans le cas de la technique parallèle par rapport à celle de la technique série, ce qui destine plutôt cette dernière à des applications à tension  $V_p$  élevée.

	$P_{max}$	$(V_b)_{opt}$	$R_{opt}$	$\eta_{max}$
Technique standard	$\frac{\alpha^2 \omega}{2\pi C_0} U_m^2$	$\frac{\alpha}{2C_0} U_m$	$\frac{\pi}{2C_0 \omega}$	$\frac{k^2}{\pi} Q_m$
SSHI série	$\frac{1+\gamma}{1-\gamma} \cdot \frac{\alpha^2 \omega}{2\pi C_0} U_m^2$	$\frac{1+\gamma}{1-\gamma} \cdot \frac{\alpha}{2C_0} U_m$	$\frac{1+\gamma}{1-\gamma} \cdot \frac{\pi}{2C_0 \omega}$	$\frac{1+\gamma}{1-\gamma} \cdot \frac{k^2}{\pi} Q_m$
SSHI parallèle	$\frac{\alpha^2 \omega}{(1-\gamma)\pi C_0} U_m^2$	$\frac{\alpha}{(1-\gamma)C_0} U_m$	$\frac{\pi}{(1-\gamma)C_0 \omega}$	$\frac{2k^2}{\pi(1-\gamma)} Q_m$

Tableau 19. Puissance maximale récupérée  $P_{max}$  à la valeur optimale  $(V_b)_{opt}$  et rendement maximale  $\eta_{max}$  pour les techniques standard, SSHI série et parallèle à amplitude de vibration constante.

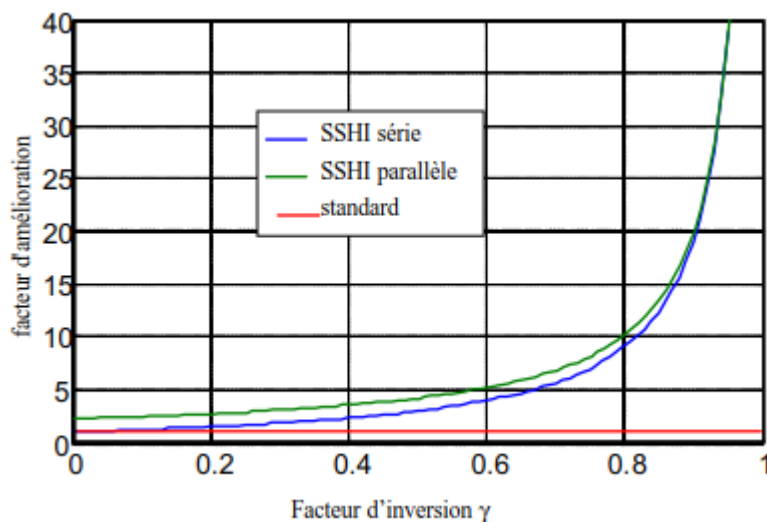


Figure 264. Comparaison des différentes méthodes.

### 5.2.2. Architecture de micro-générateur pour des applications sur roulement

La partie précédente a permis d'introduire, le principe de la récupération d'énergie à l'aide d'élément piézoélectrique. L'objectif de celle-ci est de présenter les architectures capables de convertir l'énergie

mécanique en électricité dans un environnement typique des roulements à billes. Les systèmes de récupération peuvent être intégrés sur trois positions :

- Intégration directement dans le roulement
- Intégration sur le carter
- Intégration sur l'arbre

Les prochains paragraphes s'attacheront à expliquer le fonctionnement de chacune des configurations, avant de passer à une étape de comparaison.

#### 5.2.2.1. Intégration sur le roulement

##### Présentation du principe de conversion

La configuration reposant sur l'intégration des micro-générateurs au sein du roulement, consisterait à disposer des éléments piézoélectriques sur le chemin de bille. Le matériau peut être aussi bien implémenté dans la bague extérieure ou intérieure (Figure 267). La contrainte exercée  $T_{cmax}$  par la bille du roulement sur le chemin est directement transmise aux éléments piézoélectriques ( $T_3 = T_{cmax}$ ). Cette solution modifie la topologie des bagues pour l'intégration des éléments piézoélectriques et de la connectique électrique. L'énergie ainsi récupérée est prélevée sur les pertes générées par le contact bille-bague.

Deux paramètres sont fondamentaux dans l'estimation de l'énergie récupérée :

- La contrainte  $T_{cmax}$  exercée par la bille sur la bague
- L'énergie récupérée sur un élément longitudinal piézoélectrique soumis à une contrainte  $T_3$ .

##### Evaluation de l'énergie récupérée sur un élément longitudinal

Lorsqu'un élément longitudinal tel que celui décrit en Figure 265. Élément piézoélectrique longitudinal soumis à une contrainte uni-axiale  $T_3$  est soumis à une contrainte uni-axiale  $T_3$  (produite par le passage d'une bille), une différence de potentiel  $V$  apparaît entre ses 2 électrodes. Si l'élément fonctionne à vide, le potentiel à vide  $V_0$  est :

$$(9) V_0 = E_3 l = g_{33} T_3 l \text{ (Volt)}$$

où  $g_{33}$  est la constante de tension, caractéristique intrinsèque au matériau piézoélectrique utilisé.

La capacité  $C$  de l'élément est :

$$(10) C = \frac{\epsilon S}{l} \text{ (Farad)} \text{ où } S \text{ et } l \text{ sont respectivement la section et la longueur de l'élément.}$$

L'énergie maximale stockée dans l'élément sous forme électrostatique est donc :

$$(11) E_1 = \frac{1}{2} C V_0^2 = \frac{1}{2} \epsilon g_{33}^2 T_3^2 S l = \frac{1}{2} d_{33} g_{33} T_3^2 v_p = \frac{1}{2} M T_3^2 v_p \text{ (Joule)}$$

où  $d_{33}$  est la constante de charge du matériau utilisé ( $d_{33} = \epsilon d_{33}$ ),  $v_p$  est le volume de l'élément

( $v_p = S l$ ), et  $M$  est le facteur de mérite ( $M = d_{33} g_{33}$ ).

Soit une densité d'énergie convertie :

$$(12) W_1 = \frac{E_1}{v_p} = \frac{1}{2} d_{33} g_{33} T_3^2 = \frac{1}{2} M T_3^2 \text{ (Joule/m}^3\text{)}$$

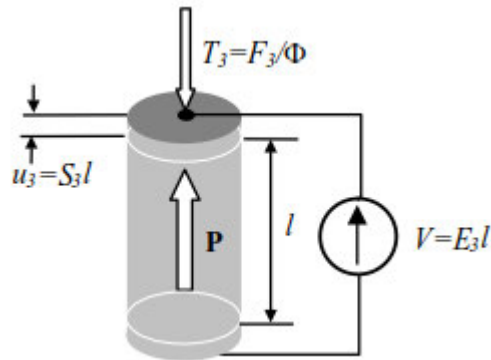


Figure 265. Élément piézoélectrique longitudinal soumis à une contrainte uni-axiale  $T_3$ .

Cette relation est primordiale car elle montre que l'énergie récupérée sur un bâtonnet dépend directement du carré de la contrainte mécanique appliquée sur celui-ci. La gamme des valeurs des coefficients des matériaux piézoélectriques les plus couramment utilisés, est résumée en Tableau 20.

Type	Piezo charge constant $d_{33}$ ( $10^{\text{e-12}}$ C/N)	Piezo voltage constant $g_{33}$ ( $10^{\text{e-3}}$ m <sup>2</sup> /C)	Dielectric constant $\epsilon_r$	Coupling factor $k_{33}$	Facteur de mérite M ( $10^{\text{e-12}}$ )
Hard PZT	250-350	15-30	500-2000	0,6-0,75	3-10
Soft PZT	300-700	15-32	2000-6000	0,70-0,80	5-13

Tableau 20. Caractéristiques typiques des matériaux piézoélectriques PZT

En prenant une valeur typique du facteur de mérite  $M = 10$ -11, la densité d'énergie  $W_1$  obtenue sur un élément longitudinal soumis à une pression uni-axiale est donnée en Figure 266. Densité d'énergie  $W_1$  en fonction de la contrainte uni-axiale  $T_3$  fonction de la contrainte appliquée  $T_3$ .

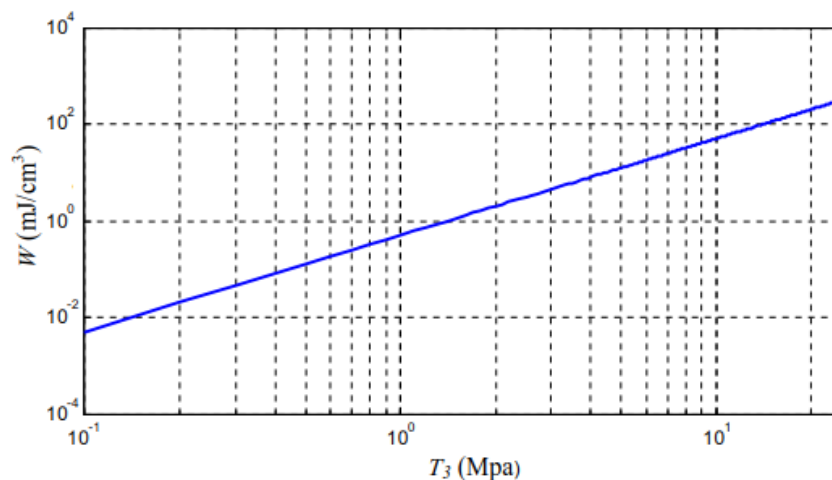


Figure 266. Densité d'énergie  $W_1$  en fonction de la contrainte uni-axiale  $T_3$

La valeur de la contrainte appliquée par la bille sur la bague est un paramètre crucial pour la détermination de l'énergie électrique générée par un élément piézoélectrique. Théoriquement, la

contrainte peut être déterminée en utilisant la loi de Hertz, même si d'autres méthodes sont possibles [1], [2]. Les valeurs disponibles dans la littérature varient sur plusieurs décades selon le type de roulements utilisés (1MPa à 100MPa) [3], [4]. Il est donc difficile de pouvoir réaliser une estimation de l'énergie récupérable. Par contre au vu des informations de la Figure 270, les densités d'énergie semblent prometteuses avec la dizaine de mJ/cm<sup>3</sup> pour des contraintes de 1MPa. La Figure 267 illustre de façon schématique l'implémentation des capteurs au sein d'une bague extérieure d'un roulement à billes.

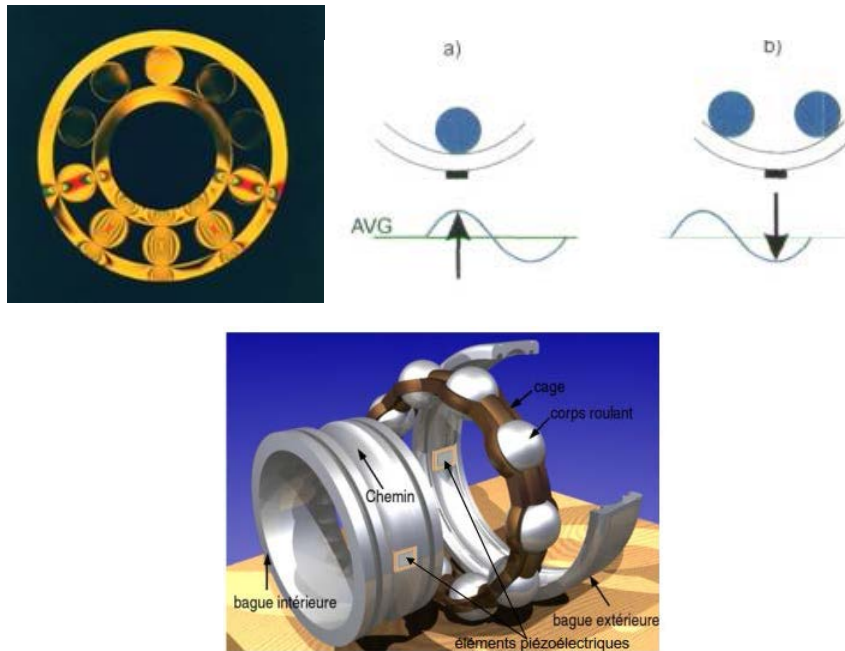


Figure 267. Implémentation possible de micro-générateur au sein d'un roulement

### 5.2.3. Intégration sur le carter

Le housing semble un élément intéressant pour intégrer des micro-générateurs piézoélectriques, plusieurs solutions d'architecture sont envisageables.

#### 5.2.3.1. Micro-générateur sismique intégré au housing

Dans cette configuration un micro-générateur sismique serait intégré sur le housing comme l'illustre la Figure 268.a. Le convertisseur mécano-électrique est alors excité par les vibrations du housing correspondant au cas classique de récupération d'énergie présentée dans le paragraphe 5.2.1. Typiquement l'architecture du micro-générateur correspond à une poutre encastree libre, une des extrémités de la poutre est encastree dans un bâti fixe, l'autre extrémité est libre. A titre d'exemple la Figure 269 illustre un système de récupération d'énergie développé lors du projet EPICE. La poutre a été obtenue par découpe dans un buzzer piézoélectrique (dimensions typiques de la poutre : 2cm x 3cm x 0.024cm) (Figure 269). L'élément piézoélectrique a été placé le plus près de l'encastrement là où la déformation est la plus importante. Deux aimants sont aussi positionnés sur l'extrémité libre de la poutre, formant une masse sismique qui permet de contrôler la fréquence de résonance. Les aimants peuvent être remplacés par des masses collées en bout de poutre. Dans l'objectif d'estimer la puissance qu'il est possible de récupérer sur la structure. Les données en termes de spectre vibratoire (accélération en fonction de la fréquence) doivent être fournies, afin de pouvoir déterminer la fréquence optimale de vibration du micro-générateur. La Figure 270 donne un exemple de spectre de vibration d'un carter de machine tournante [5].

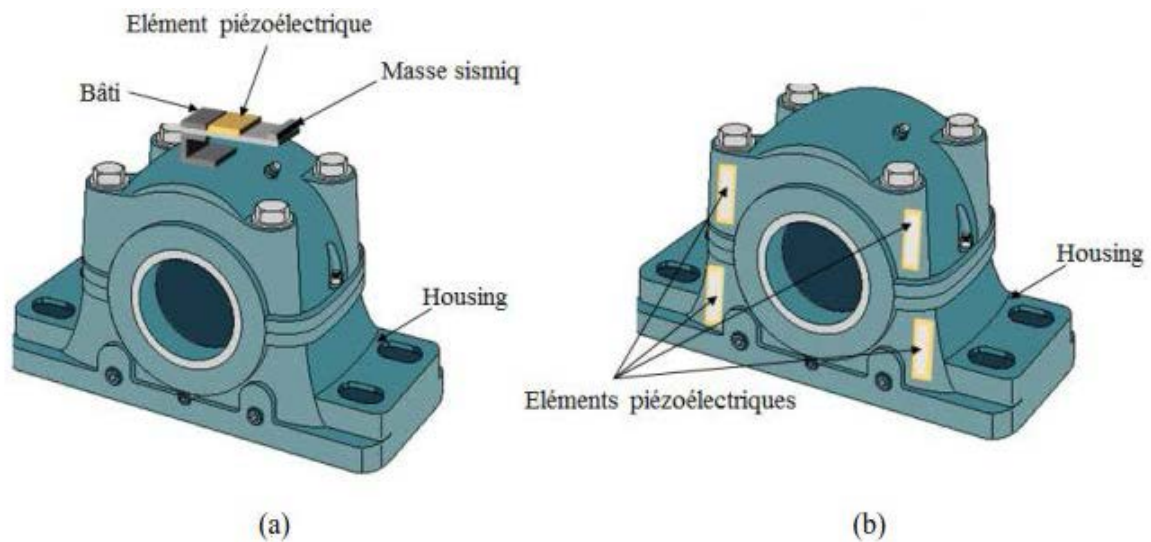


Figure 268. Configuration de micro-générateur monté sur housing (a) en couplage sismique, (b) en couplage direct

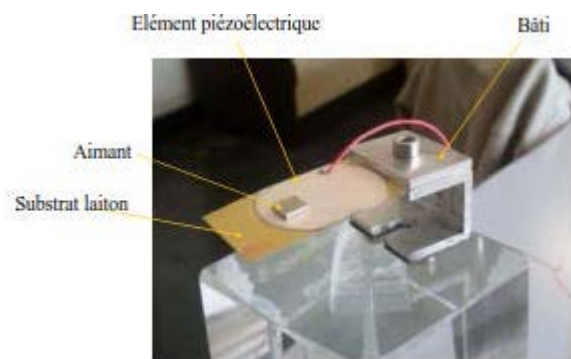


Figure 269. Exemple de micro-générateur sismique développé sur le projet EPICE

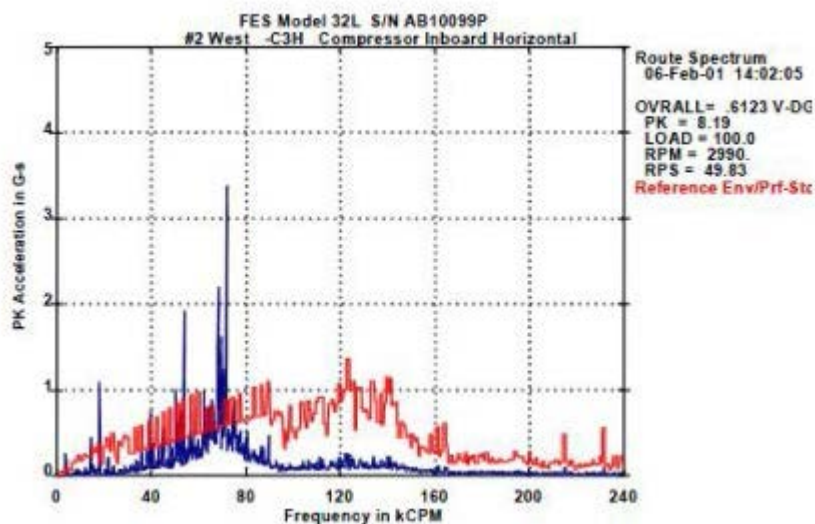


Figure 270. Exemple de spectre de vibration d'une machine tournante (extrait de [5])

En combinant les formules présentées dans les parties précédentes, et le spectre de vibration typique, il est possible de faire une prévision de la puissance récupérée avec les différentes techniques (standard, SSHII parallèle et SSHII série). Une étude complète sur le dimensionnement d'un micro-générateur piézoélectrique sera présentée en partie 2 du présent mémoire dans le cadre du projet

EPICE. D'après les différentes données disponibles dans la littérature sur les vibrations du carter l'amplitude des accélérations est de l'ordre de 1g pour une fréquence de 100Hz, comme l'illustre la Figure 271. Au vu de ces valeurs et du retour d'expérience du LGEF sur le domaine, les densités de puissances récupérables sont comprises entre 50 et 100 $\mu$ W/cm<sup>3</sup>. Il semble aussi envisageable de récupérer par couplage direct en collant les éléments piézoélectriques directement sur le carter Figure 268(b), mais les densités d'énergies risquent d'être faibles en plus des inconvénients énoncés dans le paragraphe 5.2.1.

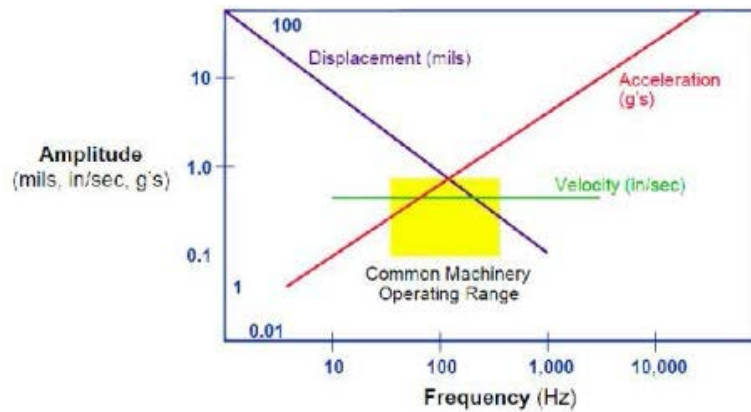


Figure 271. Gamme de vibration typique de machine tournante (extrait de [5])

#### 5.2.4. Architecture hybride

Les micro-générateurs sismiques ne sont pas les seules architectures à pouvoir être implémentées aux carters. Des structures reposant sur l'intégration mixte entre la partie en rotation et la partie fixe (carter ou bague) peuvent être imaginées. Le principe de ces solutions consiste à exciter un élément piézoélectrique sous forme de poutre à l'aide d'aimant ou de buté mécanique. A titre d'exemple, Brusa [6] propose d'intégrer des aimants dans la partie en rotation du roulement et un autre un bout de poutre sur lequel un élément piézoélectrique est collé, comme l'illustre la Figure 272. Le principe de fonctionnement est disponible en Figure 273 ; lorsque l'aimant fixé sur la partie en rotation, passe devant la poutre composée de l'élément piézoélectrique et d'un aimant en bout de poutre, les deux aimant s'attirent, provoquant une déformation de la structure. Ensuite l'aimant en rotation se déplace, la poutre n'est plus contrainte et oscille sur son mode propre. En jouant sur le nombre d'aimants et leur force, il est alors possible d'obtenir une oscillation entretenue des poutres. L'auteur indique des puissances récupérées de l'ordre de la 10 mW, obtenues par modélisation par éléments finis, aucune information n'est disponible concernant les caractéristiques sur un prototype.

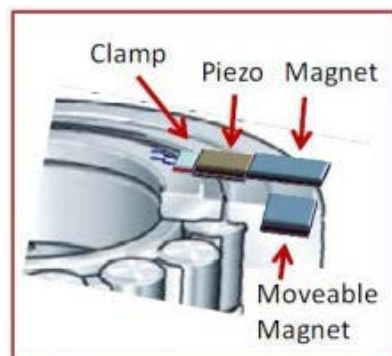


Figure 272. Architecture de micro-générateur combinant élément piézoélectrique et aimant (extrait de [6])



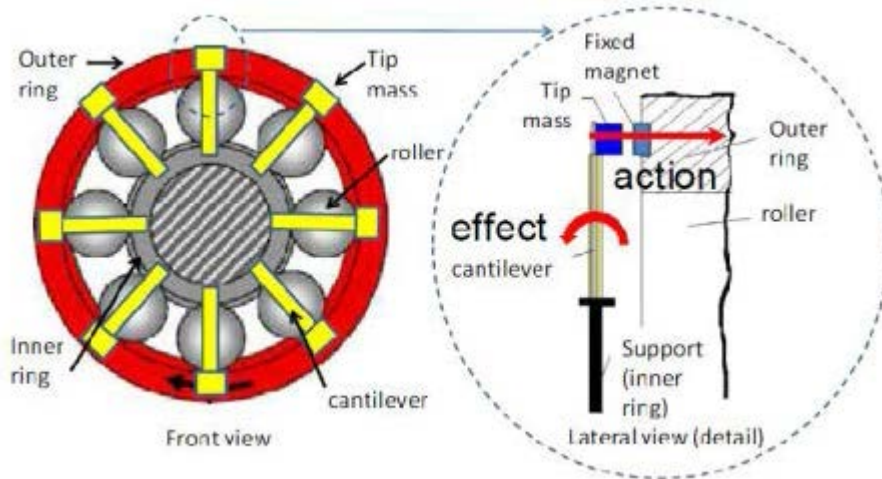


Figure 273. Principe de fonctionnement de l'architecture proposé par Brusa (extrait de [6])

Pour éviter des interactions avec des particules magnétiques présentes dans le lubrifiant, les aimants pourraient être remplacés par des ergots qui rentreraient en contact avec la poutre comme l'illustre la Figure 274. Celle-ci étant soumise à un choc, elle sera excitée sur l'ensemble de son spectre. Si la structure est bien sûr tendue, elle répondra sur son premier mode. En fonction du nombre d'ergots utilisés, ainsi que de la vitesse et de la dimension de la poutre, il sera possible d'obtenir un régime d'oscillation entretenue. Cette architecture est proche du système proposé par l'Université de Cranfield (Figure 275). Une puissance de 2mW a été mesurée en sortie du système, sur les mouvements de la marche [7], [8]. Suivant les vitesses de rotation des roulements généralement situés deux décades au-dessus (1000 tr/min), les puissances récupérées pourraient être importantes. D'après l'architecture du micro-générateur, il est possible d'imaginer d'implémenter les poutres directement sur la bague fixe. Par contre, il faudra vérifier que les vibrations produites par le choc entre l'ergot et la poutre, n'induisent pas des vibrations détériorant le fonctionnement du roulement.

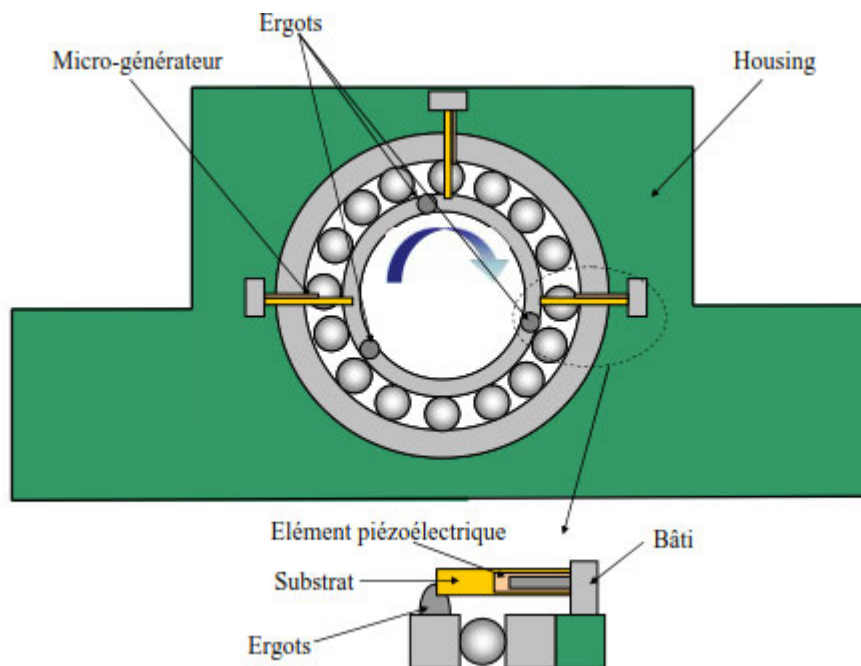


Figure 274. Principe de fonctionnement de l'architecture à l'aide d'ergots

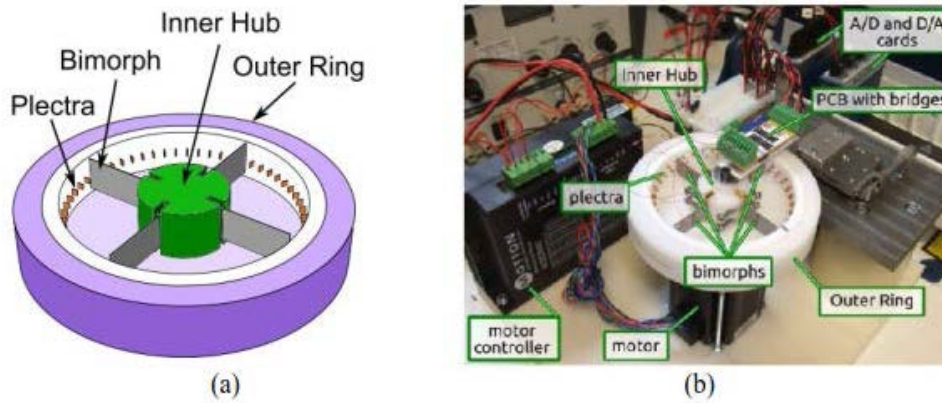


Figure 275. Récupérateur d'énergie piézoélectrique à partir des mouvements de rotation humains, (a) principe de la structure, (b) photographie du prototype (extrait de [7], [8]).

#### 5.2.4. Intégration sur l'axe ou la partie en rotation

De par sa nature le mouvement à bille est sujet à des mouvements de rotation. Il est alors possible de convertir en une énergie électrique, pour cela différentes stratégies peuvent être envisagées. Les micro-générateurs pourraient être implémentés sur l'axe ou sur la bague en rotation. La Figure 276 illustre de façon schématique une structure de micro-générateur. Le principe consiste à exploiter les accélérations subies par les poutres, lorsque l'ensemble est soumis à un mouvement de rotation. Cela engendre une résonance des poutres sur leur mode propre. Les masses sismiques permettent d'augmenter les déflexions de la structure.

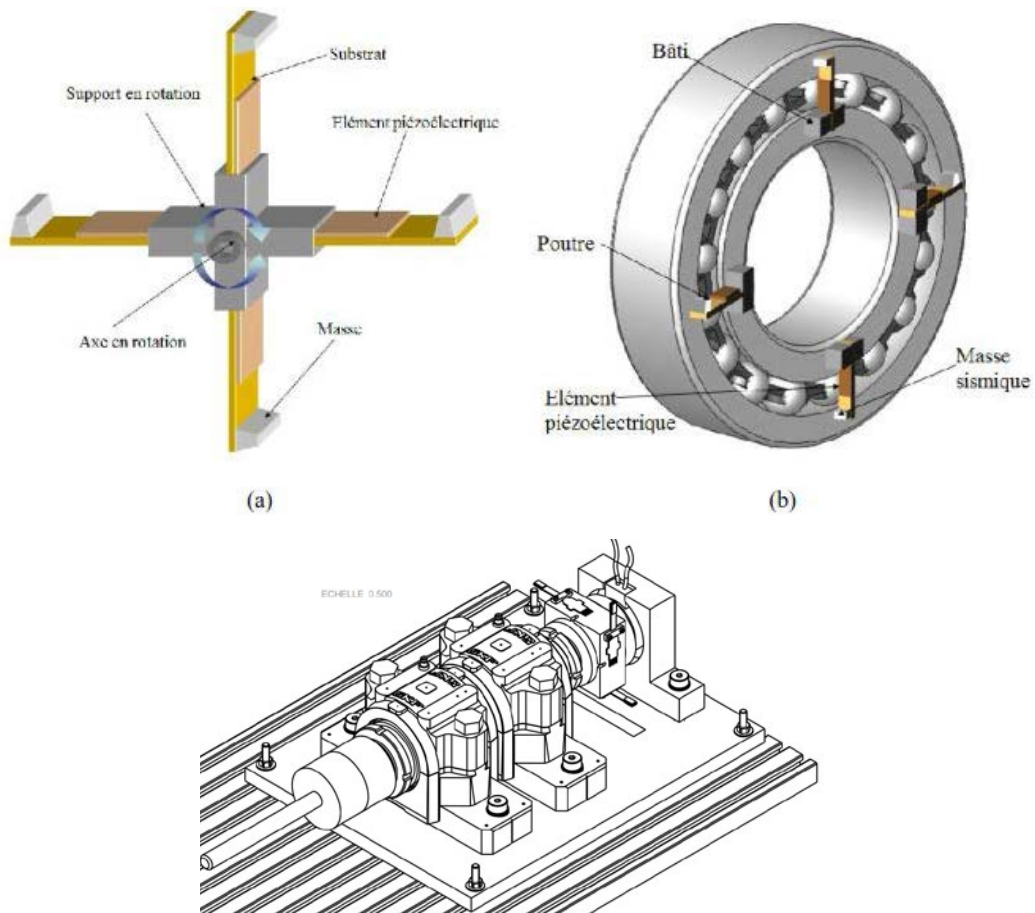


Figure 276. Architecture de récupération d'énergie sur les mouvements de rotation (a) sur l'axe, (b) sur le roulement.

Une autre configuration consiste à utiliser le principe de la montre Autoquartz (Figure 277). Le principe de fonctionnement est le suivant : une masse oscillante transmet son énergie mécanique (cinétique et potentielle) à un ressort spiral intégré dans un micro-barillet permettant sa charge quel que soit le sens de rotation de la masselotte. Lorsque le ressort atteint un état de charge donné, il se décharge en entraînant une génératrice à aimants permanents monophasée, dont la tension est redressée par un pont à transistors MOS afin de charger un accumulateur électrique. La montre de Seiko commercialisée en utilisant de ce principe génère une puissance  $5\mu\text{W}$  sur des mouvements du poignet typiquement inférieur à 1Hz.

Pour éviter de coupler le système de masse oscillante avec une génératrice, un élément piézoélectrique pourrait être intégré directement dans la masse oscillante. C'est autour de cette idée que l'équipe de l'Imperial College of London a proposé une configuration de micro-générateur comme l'illustre la Figure 278 [9], [10]. Dans le design présenté, l'élément piézoélectrique est fixe et c'est le mouvement de la masse sur laquelle sont intégrés des aimants, qui provoque la vibration de la poutre, donc une conversion d'énergie. Pour pallier à l'utilisation d'aimant, une solution consisterait à intégrer des ergots afin de générer un choc à chaque passe de la masse oscillante devant la poutre. Par contre il est intéressant de noter que ce principe de conversion est efficace pour les faibles fréquences typiquement inférieures à 5 Hz.

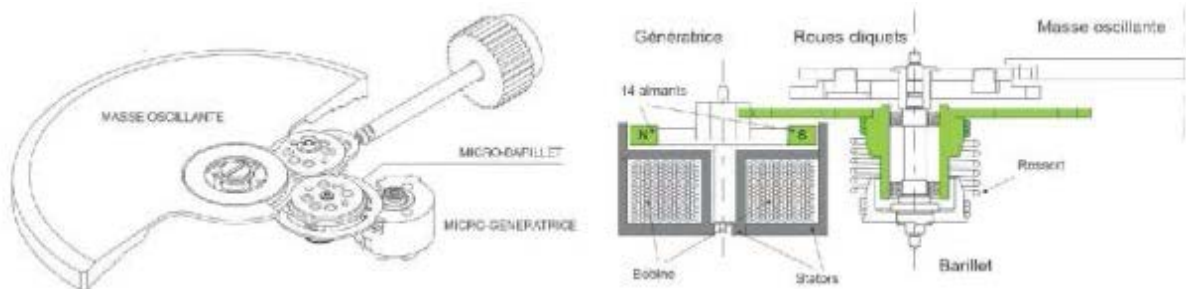


Figure 277. Principe de fonctionnement montre Autoquartz (extrait de [11])

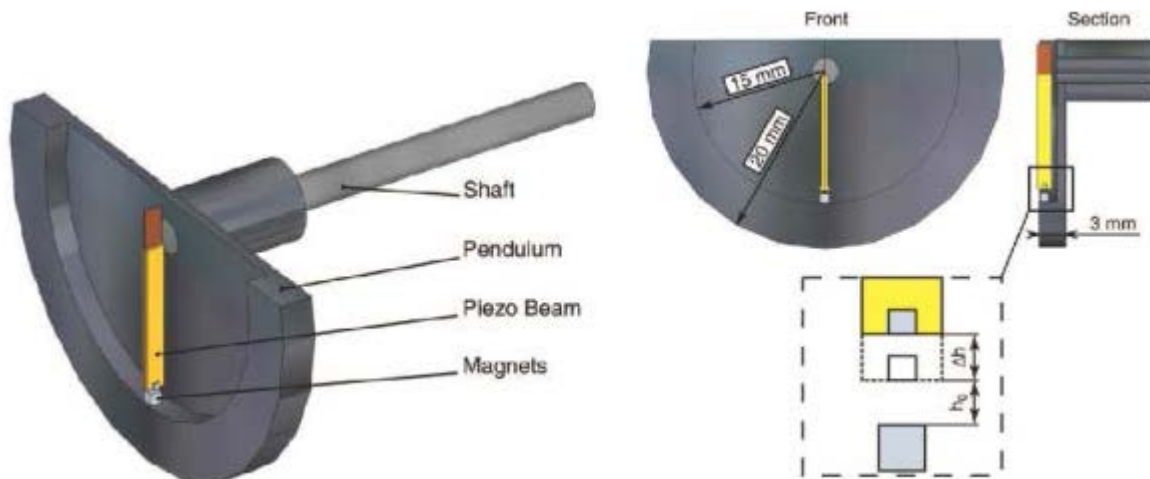


Figure 278. Principe de fonctionnement du micro-générateur piézoélectrique à masse oscillante (extrait de [9], [10])

### 5.2.5. Comparaison des différentes solutions

La partie précédente a permis de mettre en avant les différentes architectures possibles de micro-générateur d'énergie basé sur l'utilisation d'élément piézoélectrique. Au final trois possibilités d'implémentation ont été analysées :

- Intégration dans le roulement

- Intégration sur carter
- Intégration sur l'arbre guidé par le roulement

Le Tableau 21 donne les avantages et inconvénients de chacun des designs proposés. La solution basée sur l'intégration d'élément piézoélectrique sur le chemin de bille est la plus compacte et la modélisation disponible au paragraphe 5.2.1. laisse présager des densités de puissance importante. Par contre cette solution est très intrusive pour le roulement, risquant de provoquer un redimensionnement complet de celui-ci en termes de tenue mécanique. De plus l'élément de conversion étant soumis à des chocs mécaniques, des questions de durée de vie des contacts électriques reste en suspens. La possibilité d'utiliser le housing comme structure hôte pour les micro-générateurs, est aussi intéressante, car elle est fabriquée par SKF et bien moins intrusive sur le roulement. Par exemple, l'architecture utilisant un élément sismique est très facile à mettre en place même sur des éléments déjà existants et en fonctionnement. Par contre, les propriétés énergétiques sont intimement liées au système dans lequel le roulement est intégré. Des micro-générateurs qualifiés d'hybrides pourraient être aussi mis en œuvre. Ils sont basés sur un couplage entre l'élément en rotation du roulement et des poutres piézoélectriques. Le but étant de faire vibrer la poutre lors du choc entre un ergot et celle-ci. Toujours pour récupérer sur les mouvements de rotation, une architecture analogue à celle des montres autoquartz, pourrait être mise en œuvre. En raison de son principe de fonctionnement basé sur l'utilisation d'une masse oscillante, le système est limité pour des faibles fréquences. Des solutions sous forme d'hélice avec des poutres piézoélectriques sont aussi envisageables.

Intégration	Architecture	Avantages	Inconvénients
<b>Roulement</b>	Élément piézoélectrique sur le chemin de bille	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Système compact</li> <li>+ Densité de puissance</li> <li>+ Large bande de fréquence</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usure des contacts électriques par le passage de la bille</li> <li>- Intrusif pour le roulement (changement des propriétés mécaniques)</li> </ul>
<b>Carter</b>	<p>Couplage à l'aide de sismique</p> <p>Couplage direct</p> <p>Hybride magnétique</p> <p>Hybride mécanique</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Sans contact (pas d'usure)</li> <li>+ Maintenance facile</li> <li>+ Masse et encombrement réduit</li> <li>+ large bande passante</li> <li>+ Sans contact avec la structure en mouvement (pas d'usure)</li> <li>+ Densité de puissance importante si la structure est bien couplée</li> <li>+ Pas d'élément magnétique</li> <li>+ Densité de puissance importante si la structure est bien couplée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible bande passante</li> <li>- Sensible à direction de l'accélération</li> <li>- Sensible aux évolutions des conditions aux limites</li> <li>- Intégration complexe, petit entrefer entre les 2 aimants</li> <li>- Interaction des aimants avec les particules du lubrifiant, et sans doute les mesures de vitesse et position si roulement instrumenté.</li> <li>- Usure mécanique des éléments soumis au choc</li> <li>- Perturbation du monitoring du roulement (accélération, vibration) à cause des chocs.</li> </ul>
<b>Arbre</b>	<p>Autoquartz + ergot</p> <p>Hélice</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Solution compact</li> <li>+ Retour d'expériences sur les montres</li> <li>+ Large bande de fréquence</li> <li>+ Simplicité de mise en œuvre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Si monté sur l'axe en rotation, ne dépend plus de SKF</li> <li>- provoque un balourd sur l'axe</li> <li>- efficace pour des faibles fréquences</li> <li>- Besoin de contact tournant</li> </ul>

Tableau 21. Comparaison des différentes typologies de micro-générateurs.

A l'examen des applications visées par SKF, les structures de micro-générateurs peuvent être comparées selon quatre critères :

- Intégration
- Densité de puissance
- Invasif pour le roulement
- Robustesse des architectures

Le Tableau 22 donne une comparaison entre les trois possibilités d'intégration (Roulement, carter, arbre).

	Roulement	Carter	Arbre
<b>Intégration</b>	<b>+</b>	<b>0</b>	<b>-</b>
<b>Densité de puissance</b>	<b>+</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Invasif pour le roulement</b>	<b>-</b>	<b>+</b>	<b>+</b>
<b>Robustesse des architectures</b>	<b>-</b>	<b>+</b>	<b>0</b>

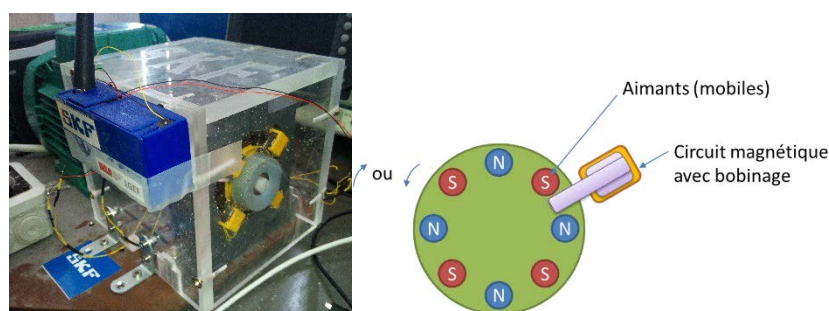
Tableau 22. Comparaison des solutions de micro-générateurs

### 5.2.6. Conclusion

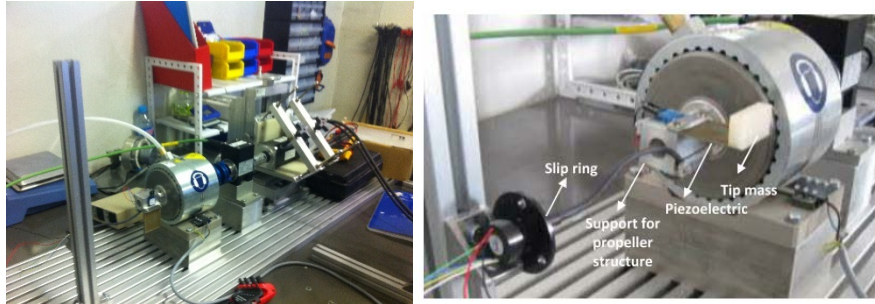
L'objectif de cette section, était de présenter les solutions envisageables pour réaliser des micro-générateurs autoalimentés à partir de vibration mécanique. Différents concepts ont été introduits, avec leurs lots d'avantages et d'inconvénients. Le choix d'une architecture étant intimement lié avec l'application envisagée mais aussi en termes d'intégration sur des produits SKF. Trois preuves de concept ont été réalisées pour étude et seront présentées en annexes 3 du présent mémoire (Figure 279).



(a) Intégration d'un élément piézoélectrique



(b) Récupérateur à reluctance magnétique



(c) Structure à hélice

Figure 279. Preuves de concept de récupérateurs d'énergie sur structure tournante

## Annexe 3 : Micro-générateurs tournants

### 2.1. Introduction

Le nombre de périphériques et de capteurs connectés augmente chaque jour. Gartner s'attend à ce que le nombre de périphériques connectés à l'Internet des Objets (IoT) atteigne 26 milliards d'unités d'ici à 2020, soit une augmentation de près de 30 fois par rapport à 0,9 milliard en 2009 [1]. Pour atteindre ces perspectives de croissance, et encore plus utiliser le potentiel de capteurs sans fil et d'Internet des Objets dans les applications industrielles, la robustesse et la disponibilité sont indispensables. Pour réaliser leur déploiement à long terme avec une installation manuelle minimale et une maintenance, des microgénérateurs fiables sont de la plus haute importance.

Dans ce chapitre, nous allons étudier des démonstrateurs technologiques de générateur pour l'alimentation de systèmes embarqués dans des environnements tournants (par exemple des roulements, des arbres ou des engrenages) avec une alimentation électrique. Afin de pouvoir évaluer l'intérêt du prototype, on considérera le profil de consommation du microsystème suivant, représentatif d'un système de surveillance de roulement (Tableau 23).

N	Tache	Durée $t_n$	Power $P_n$
0	Standby	98ms	0.1 mW
1	Echantillonnage et traitement du signal	1ms	5mW
2	Emettre et recevoir	1ms	10mW

Tableau 23. Consommation et durée des taches

Le microsystème embarqué considéré est un nœud de capteurs mesurant les conditions opératoires et les paramètres de santé d'un roulement à bille. Pour communiquer les informations dans un la communication sans fil est en général nécessaire pour éviter l'utilisation de contact tournant et le cheminement de câbles.

La consommation d'énergie pour les capteurs sans fil est spécifique à l'application et dépend du mode de fonctionnement du système :

- Echantillonner et traiter les données,
- Communiquer
- Tourner au ralenti

La partie I du présent mémoire a présenté les différentes méthodes pouvant être associée à une structure tournante afin de réaliser un microgénérateur pour un roulement embarquant u système de diagnostic. Les réalisations présentées dans les paragraphes suivant se focalisent sur la récupération de l'énergie cinétique générée par la rotation de roulements. Afin de pouvoir évaluer chaque preuve de concept réalisées en utilisant l'équation (1) avec les valeurs estimées dans le Tableau 23 :

$$(1) P_{moy} = \frac{\sum_{i=0}^n t_i P_i}{\sum_{i=0}^n t_i}$$



On obtient une puissance moyenne de 0,25 mW. Pour tenir compte des pertes de conversion dans les circuits de récupération, nous avons fixons la puissance minimale requise du générateur à 0.5 mW.

Pour pouvoir évaluer les technologies par rapport à l'application, nous avons également identifié un nombre de contraintes physiques et environnementales que toutes les générateurs étudiés doivent respecter, voir le Tableau 24. Ces contraintes sont définies en ce qui concerne les applications industrielles, de sorte que de nombreux environnements tournants dans les industries et les usines devraient remplir ces conditions.

Paramètres	Valeur	Unité
Fréquence de rotation	100	Hz
Diamètre maximum	0.1	m
Poids maximum	0.05	kg
Puissance minimale	0.5	mW

Tableau 24. Paramètres techniques du récupérateur

A ces critères techniques s'ajoutent les critères qualitatifs d'évaluation suivant :

**Complexité du générateur :** ce critère comprend le nombre de composants et les difficultés d'intégration. Ce critère est souvent lié au coût du système.

**Robustesse :** La capacité à résister à des conditions extérieures difficiles, comme la poussière, la saleté, les vibrations et les grandes variations de température.

**Transférabilité :** Cela concerne la portée générale de la technologie (la technologie peut-elle être facilement utilisée sur plusieurs applications différentes).

**Puissance dispensée :** La capacité de générer de l'énergie électrique.

## 2.2. Reluctance variable

Les capteurs à réluctance variable sont souvent utilisés pour mesurer la vitesse de rotation dans les systèmes rotatifs, mais la tension induite dans la bobine peut également être utilisée pour fournir un capteur sans fil autoalimenté. Sur la Figure 281, le principe d'un capteur de réluctance variable est représenté, un aimant permanent induit un champ magnétique dans une bobine

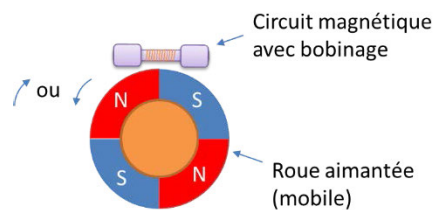


Figure 280. Principe du microgénérateur à roue polaire.

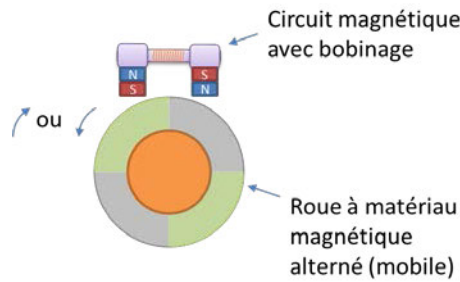


Figure 281. Principe du microgénérateur à roue à matériau magnétique alterné.

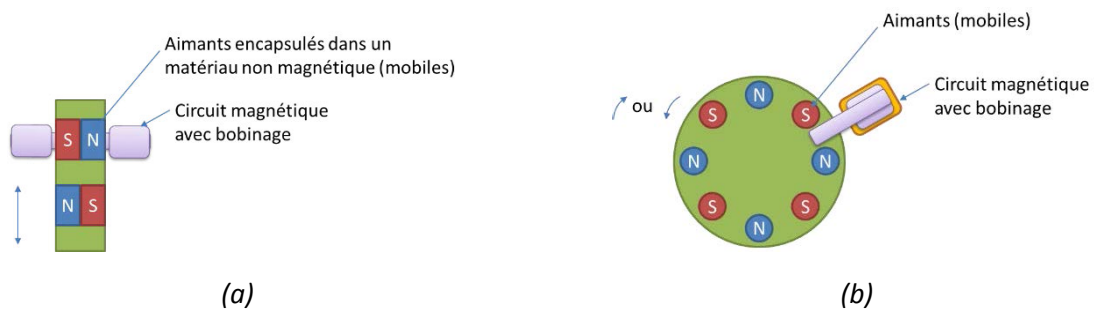


Figure 282. Principe du microgénérateur à variation de flux par fermeture d'entrefer à aimant : (a) par translation ; (b) par rotation.

Lorsque la roue aimantée tourne, le chemin du flux magnétique change à cause du mouvement de la roue dentée, entraînant une variation du champ magnétique à travers la bobine. Cela génèrera une tension aux bornes de la bobine qui peut être décrite par la loi d'induction de Faraday, voir l'équation (2).

$$V_{emf}(t) = -N \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

$V_{emf}$  est la tension induite par le champ magnétique aux bornes de la bobine,  $\phi$  est la densité du flux magnétique à travers une spire de la bobine,  $N$  le nombre total de spires.

Les récupérateurs électromagnétiques qui reçoivent un champ magnétique variable par rapport au déplacement relatif des aimants permanents peuvent générer de l'énergie électrique sans circuit actif et énergie nécessaire au démarrage. Cela donne aux microgénérateurs basé sur ce concept une complexité et une aptitude au transfert moyenne et une grande robustesse.

La Figure 283 présente des relevés tension en sortie d'un générateur réalisé présenté en Figure 284.

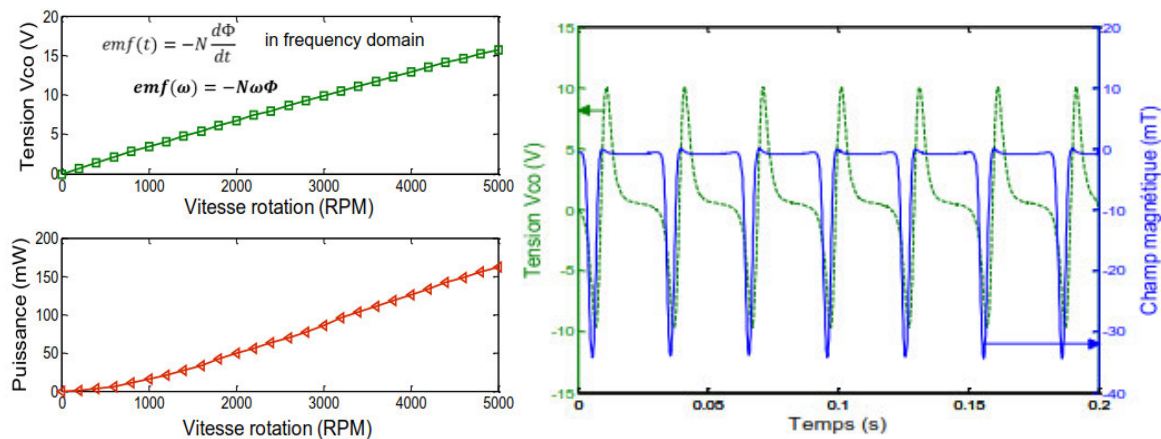


Figure 283. Tension en sortie d'une génératrice électromagnétique



(a)



(b)

Figure 284. Intégration des microgénérateurs dans les systèmes en rotation : (a) roue polaire (sur roulement) ; (b) fermeture d'entrefer.

Lorsque le champ magnétique change, on remarque un changement de polarité de la tension aux bornes de la bobine avec un pic de tension. Cette variation de tension a une faible dépendance à la fréquence de variation du champ magnétique. La variation du phénomène en circuit ouvert reste relativement brève pour pouvoir être exploitable.

Le couplage électromagnétique diminue de manière spectaculaire avec l'entrefer, limitant ainsi l'efficacité du transfert d'énergie électromagnétique et imposant une construction rigoureuse du circuit magnétique. En outre, les variations des conditions de fonctionnement peuvent conduire à une modification de la fréquence de l'onde électromagnétique, ce qui peut être préjudiciable pour les bonnes opérations du système.

L'utilisation des méthodes de traitement non linéaire sur le courant délivré par une source réceptrice de cette énergie magnétique, qui transforme ce dernier en électricité (principes d'un enroulement secondaire d'un transformateur), conduisant à un processus cumulatif permettent une augmentation significative de ce courant ainsi qu'un décalage temporel. Ces deux phénomènes permettent une augmentation artificielle du couplage électromagnétique donnant une augmentation de l'énergie reçue pour alimenter le système. Cette approche s'inspire des méthodes de récupération non linéaires développées au LGEF pour les éléments piézoélectriques.

Afin d'augmenter le couplage entre la source électromagnétique et le récepteur électromagnétique, le principe consiste à ajouter en parallèle avec le récepteur un commutateur numérique SW et un condensateur C, comme illustré sur la Figure 285. Le commutateur SW est presque toujours en position fermée, sauf lorsqu'une valeur maximale ou minimale sur le courant I apparaît. À ce moment, le commutateur est ouvert, formant ainsi un réseau oscillant résonnant constitué de l'inductance du récepteur et du condensateur. Parce qu'il y a un courant initial, une oscillation apparaît, et si le commutateur numérique est fermé après la moitié de la pseudo-période de l'oscillation, un effet d'inversion de courant apparaît. Grâce à cette inversion de courant sur les minimums et les maxima actuels, un décalage horaire ainsi qu'un processus cumulatif d'augmentation de courant apparaît (car la continuité actuelle est assurée par l'inductance), ce qui augmente la puissance en sortie du dispositif.

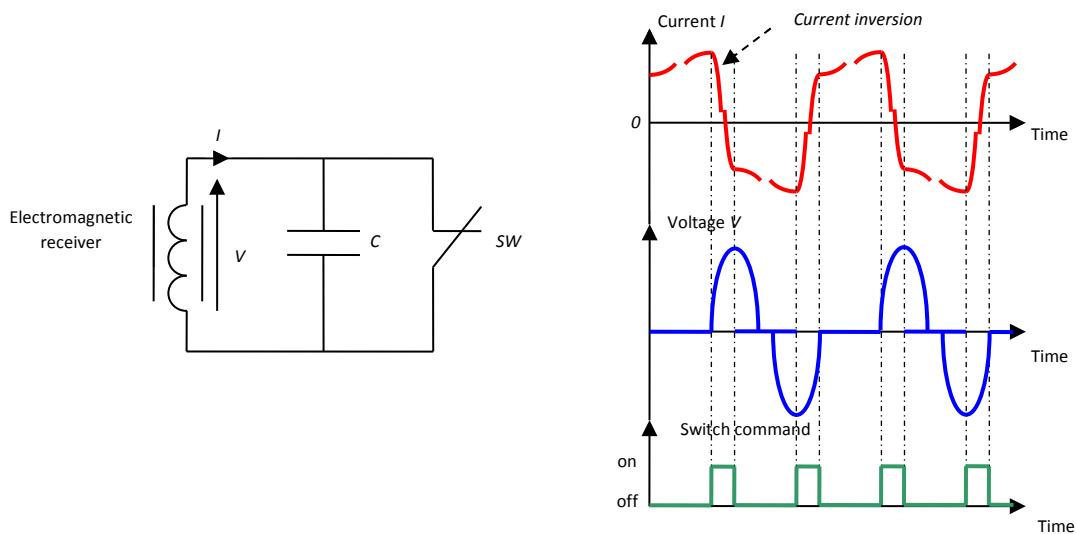
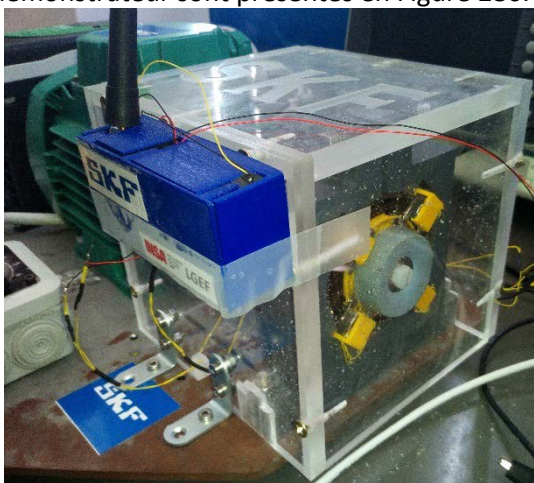
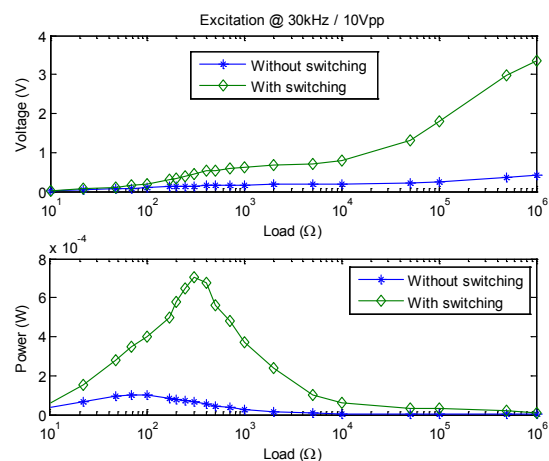


Figure 285. Schéma du concept et formes d'ondes associées

Ce concept a été implémenté dans un démonstrateur de roulement. Pour des questions de confidentialité, le schéma électronique ne sera pas donné. Les résultats et la photo du démonstrateur sont présentés en Figure 286.



(a)



(b)

Figure 286. Dispositif et amélioration du récupérateur par ajout de la technique non linéaire

L'utilisation de technique non lineaire sur le récupérateur à reluctance variable permet d'obtenir le niveau de puissance recherché.

## 2.2. Piézoélectricité

Les matériaux piézoélectriques sont couramment utilisés pour générer de l'électricité à partir de vibrations. En utilisant un résonateur mécanique pour appliquer une contrainte cyclique sur le matériau piézoélectrique, ce dernier générera une charge lorsque le matériau sera déformé. La gravité terrestre en combinaison avec un mouvement de rotation peut être utilisé pour induire une force variable pour exciter l'élément piézoélectrique comme illustré en Figure 287.

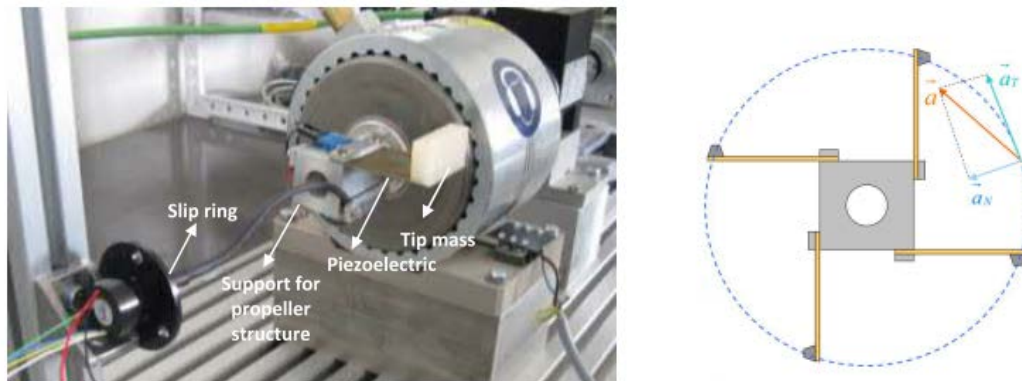


Figure 287. Générateur tournant utilisant la piézoélectricité

Ce concept a été étudié en l'associant avec les méthodes de récupération non linéaire développées au LGEF. Le schéma bloc est présenté en Figure 288, ainsi que le diagramme-interface en Figure 289.



Figure 288. Schéma bloc récupérateur piézoélectrique en hélice

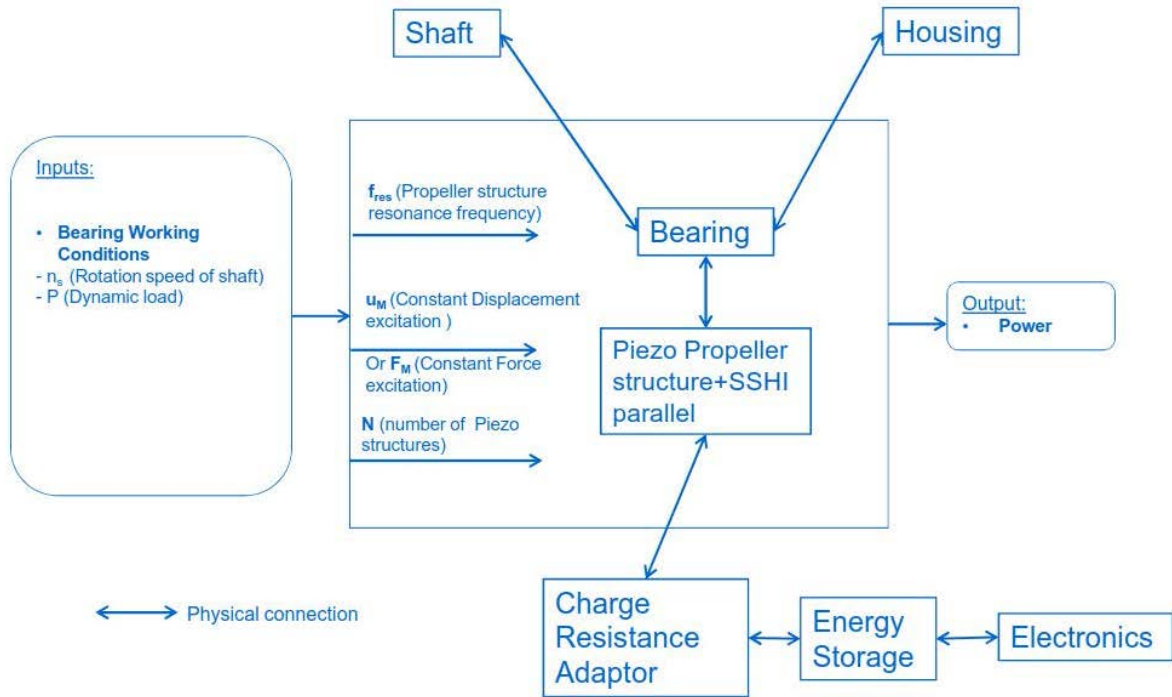


Figure 289. Diagramme interface du système

La partie mécanique de ce concept a été modélisé sous Simulink (Figure 290) avec les paramètres de modélisation présentés en Tableau 25.

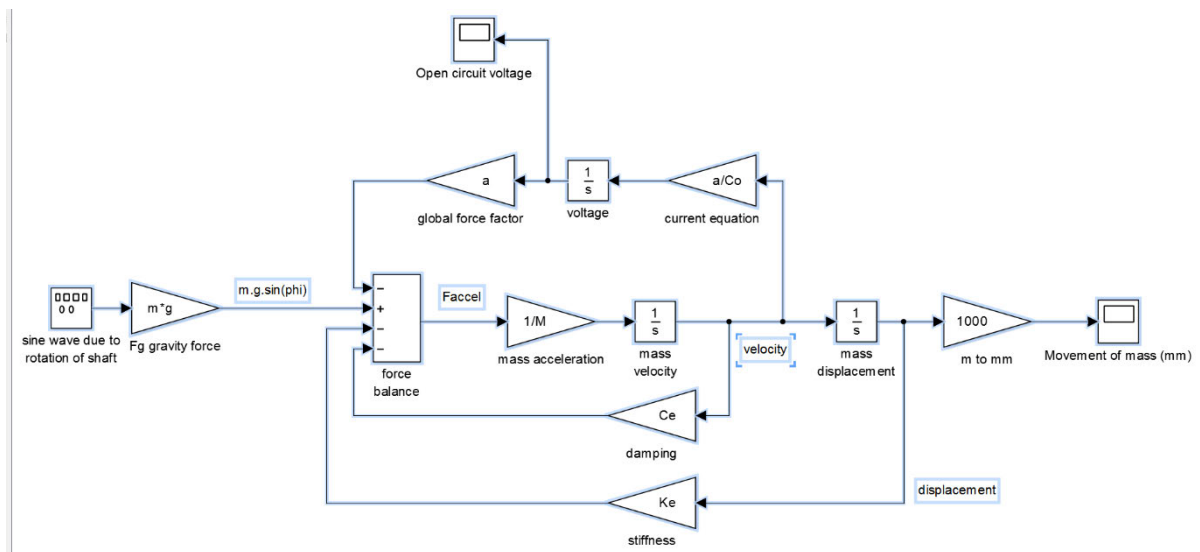


Figure 290. Modèle Simulink récupérateur piézoélectrique en hélice

Paramètres	valeur	unités
Masse totale, avec une masse sismique de 5g	$M=9.28 \times 10^{-3}$	kg
Masse sismique	$m=5 \times 10^{-3}$	kg
Gravité	$g=9.8$	m/s <sup>2</sup>

Paramètres	valeur	unités
Raideur	$K_e=1/(2.81 \times 10^{-4})$	N/m
Amortissement	$C_e=0.69$	N/m/s
Fréquence de rotation	$F_{rot}=41$	Hz
Capacité équivalente	$C_0=32 \times 10^{-9}$	F
Coefficient piézoélectrique	$a=2.11 \times 10^{-3}$	N/V

Tableau 25. Paramètres de modélisation

Les résultats de la modélisation circuit ouvert sont données en Figure 291.

On remarque la finesse du pic de résonance, qui justifie l'utilisation des modules SSHI pour pouvoir maximiser la récupération d'énergie de ce concept.

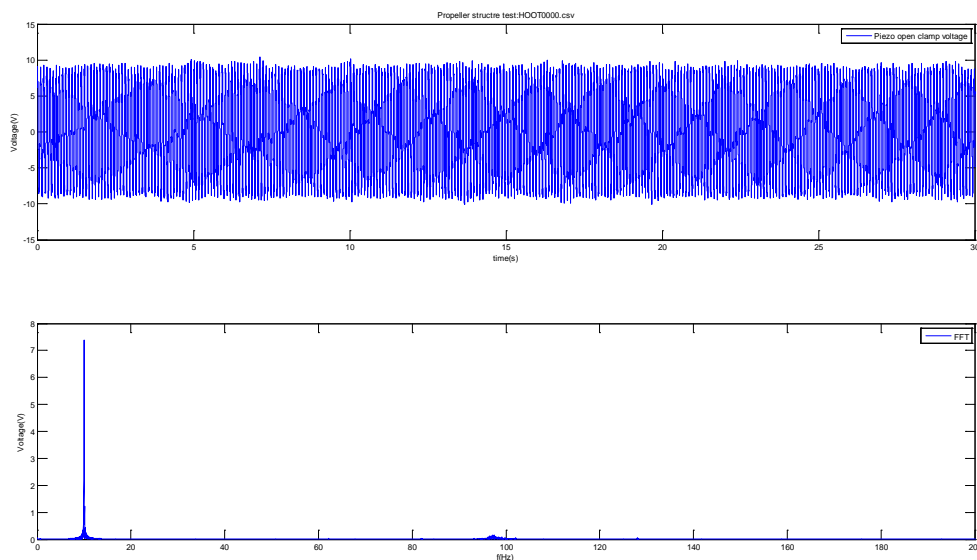


Figure 291. Tension en sortie du modèle en circuit ouvert

Dans ce concept, la force centripète peut être utilisée pour auto-accorder la résonance mécanique pour afin de pouvoir opérer à plus larges bandes de fréquence. [5] A. Khaligh, P. Zeng, and C. Zheng, "Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies" 12 state of the art," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 57, no. 3, pp. 850–860, 2010.

Le système complet avec l'étage SSHI a été maqueté. Les résultats de la caractérisation expérimentale sont présentés en Figure 292.

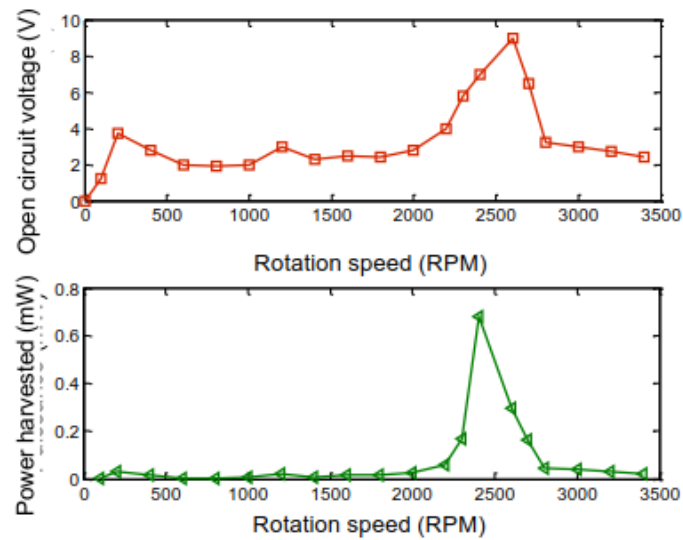


Figure 292. Caractérisation expérimentale du générateur en hélice

On peut remarquer l'augmentation de la bande fréquentielle pour la récupération apportée par l'étage SSHI. Le niveau de puissance récupéré reste assez limité, proche du besoin visé mais sans marge supplémentaire.

D'autres moyens peuvent être utilisés pour déformer l'élément piézoélectrique à mesure que le système tourne. Les récupérateurs piézoélectriques étant principalement basé sur la résonance à une fréquence spécifique. Le concept suivant illustre cette recherche avec l'ajout d'un aimant en bout d'arbre afin de déformer l'élément piézoélectrique par utilisation de la force magnétique de l'aimant sur un embout métallique placé sur l'extrémité de l'élément piézoélectrique, illustré en Figure 293.

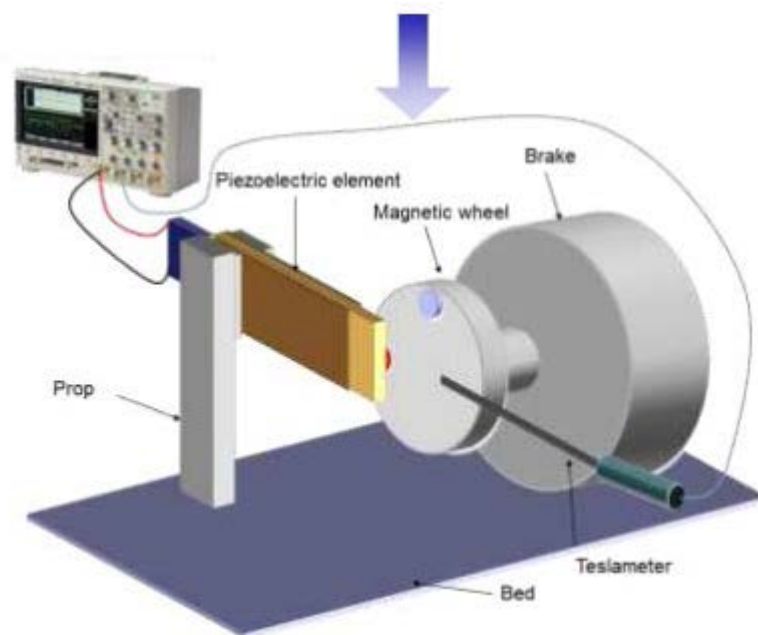


Figure 293. Récupérateur piézoélectrique utilisant un aimant pour la déformation



L'avantage de cette approche est de ne plus soumettre l'élément piézoélectrique à la force centripète et de pouvoir fixer le nombre de déformation par tour en jouant sur le nombre d'aimants. Ce concept a donné lieu à une caractérisation expérimentale en circuit ouvert jouant sur le nombre d'aimant, la distance en circuit ouvert et la vitesse de rotation. Les résultats sont présentés en Figure 294. Le niveau du champ magnétique est mesuré avec un capteur à effet hall.

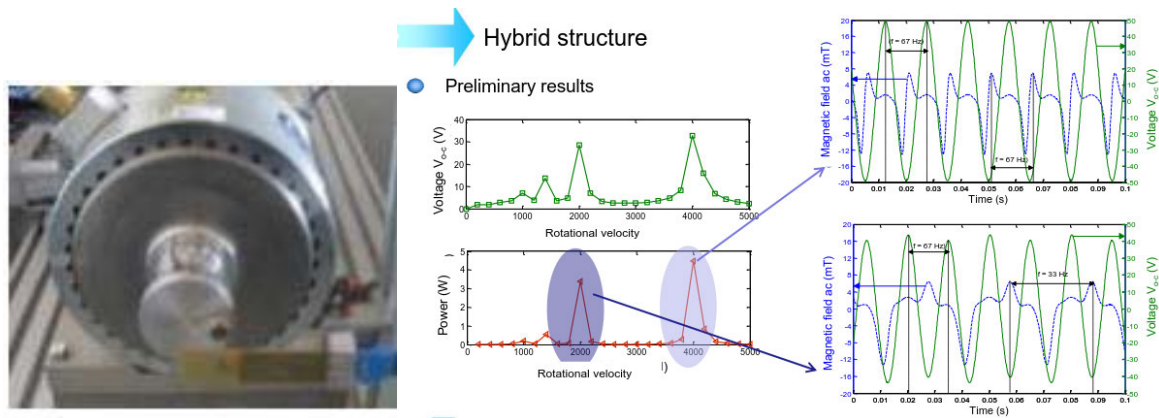


Figure 294. Caractérisation en circuit ouvert

Générateur présente un double pic de résonance. La dépendance avec le niveau de l'effort magnétique a été étudiée et est présentée en Figure 295.

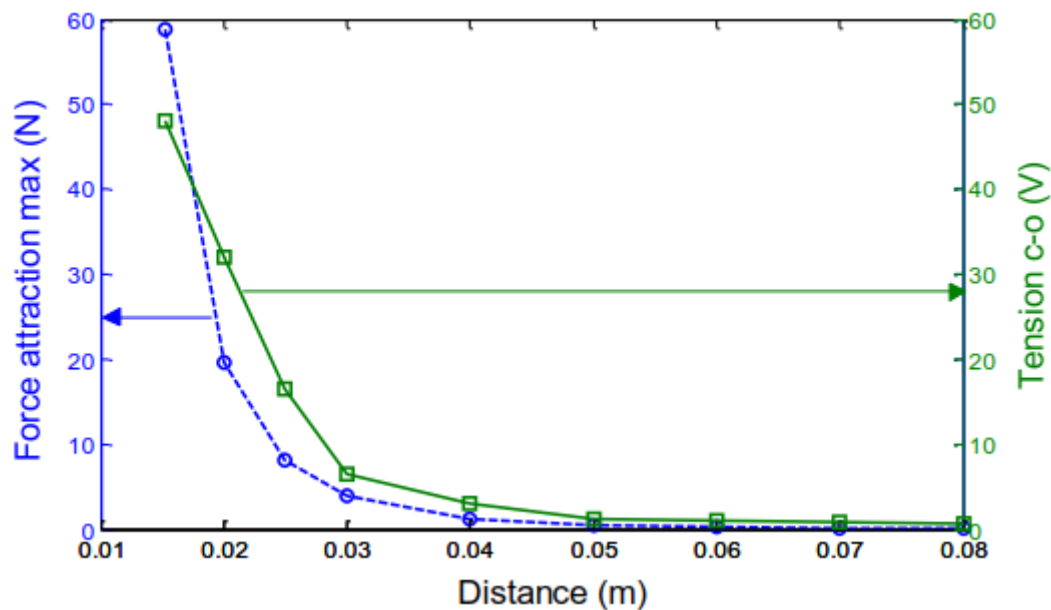


Figure 295. Tension en circuit ouvert, influence de la force d'attraction magnétique

La chute de tension en circuit ouvert est assez bien corrélée avec la valeur de la force d'attraction magnétique, qui a une dépendance quadratique avec la distance. Le récupérateur a été ensuite caractérisé sur toute la plage de vitesse avec un seul ou deux aimant. Les résultats sont présentés en Figure 296.

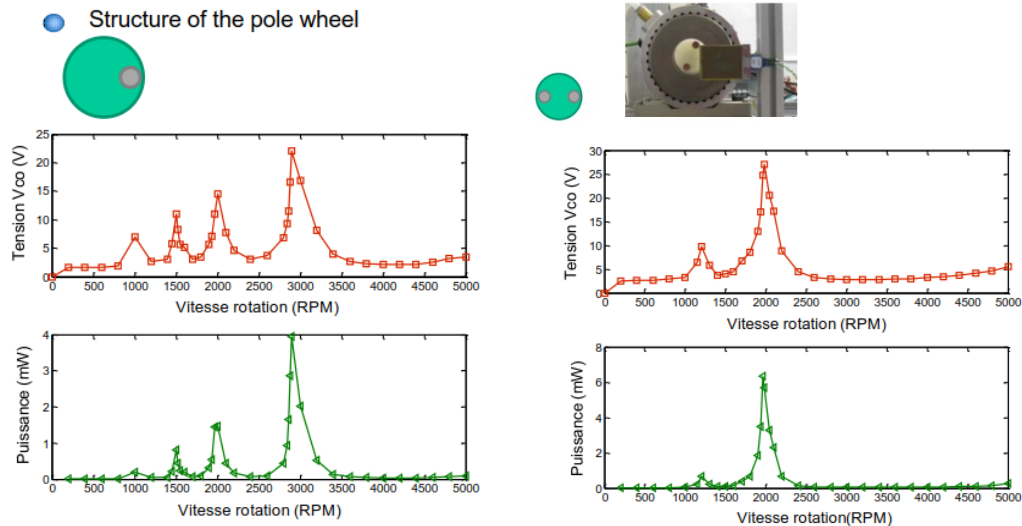


Figure 296. Caractérisation en circuit ouvert pour un ou deux aimants

La structure à deux aimants a généré plus d'énergie avec un seul pôle centré autour de la résonance de la structure. Les deux concepts génèrent plus d'énergie que le concept en hélice. Ceci est principalement due au fait que la force générant la déformation de l'élément piézoélectrique est plus stable dans la structure utilisant des aimants. Ce concept produit suffisamment d'énergie par rapport à notre besoin.

### 2.3. Comparaison des concepts

Les composants élémentaires nécessaires à la construction d'un générateur utilisant la conversion électromagnétique sont en général robuste et supportent les environnements sévères. La limite de température est de 125°C avec la plupart des matériaux et peut même atteindre 150°C avec une sélection adaptée. Le système utilisant la reluctance variable nécessite l'ajout d'une bobine et d'un champ magnétique sur la partie fixe du roulement, et uniquement un entrefer variable sur la partie rotor. L'utilisation de circuits de récupération non linéaire augmente l'efficacité de ce type de récupérateur de manière significative.

Les récupérateurs piézoélectriques utilisent généralement des céramiques PZT connues pour être moins stables que les aimants. Les forts niveaux de tension en circuit ouvert nécessitent un bloc de conversion AC-DC pour alimenter des modules. Le Tableau 26 présente la comparaison des concepts présentés en fonction de nos critères de sélection.

Concept	Puissance (mW)	Robustesse (1-5)	Complexité (1-5)	Transférabilité (1-5)
Reluctance variable + SSHI	6	5	3	5
Piézoélectrique hélice + SSHI	0.6	3	1	2
Piézoélectrique 1 aimant	4	4	2	3
Piézoélectrique 2 aimant	6	4	2	3

Tableau 26. Comparaison des concepts

Le concept de récupération par reluctance magnétique, avec utilisation d'un circuit SSHI semble être le plus prometteur pour être intégré sur la structure tournante du roulement.

## THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : HEBRARD

DATE de SOUTENANCE :22/01/18

Prénoms : YOANN

TITRE : PHM autonome, application au roulement intelligent

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2018LYSEI004

Ecole doctorale : MEGA

Spécialité : Génie mécanique

RESUME : Dans un marché aéronautique en plein essor marqué par une croissance rapide du parc d'avions utilisées à travers le monde, l'optimisation de la maintenance devient une préoccupation pour les avionneurs. Il s'agit de maximiser la disponibilité des aéronefs tout en réduisant les couts directs d'exploitation sans compromis sur la sécurité des hommes et en respectant les contraintes environnementales. Une stratégie possible pour relever ce challenge est de renforcer la capacité à anticiper les défaillances afin de recourir à des actions préventives le plus juste possible sur les composants les plus critiques comme les roulements à billes. La mise en œuvre de processus de Prognostic Health Management (PHM) prend ainsi une part grandissante et le processus de pronostic est considéré comme l'un des principaux leviers d'action. Son déploiement requiert que le comportement du système étudié puisse être observés. Il peut ainsi bénéficier de l'apport des récentes avancées dans le domaine des microsystèmes autonomes en énergie permettant des mesures intelligentes et un transfert de données d'une manière distribuée, sans aucune aide externe. L'association de ses deux champs de recherche mène naturellement vers le roulement intelligent qui pourrait être la transition d'une maintenance programmée à une maintenance prédictive. Cependant les solutions de PHM autour du roulement et le roulement intelligent, ne restent pas moins le fruit de l'évolution des techniques et technologies de surveillance, de récupération d'énergie et de connectivité. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce mémoire de thèse par Validation des Acquis de l'Expérience (VAE). Il s'articule en trois parties principales : motivations du VAE, état de l'art autour du roulement mécatronique et exemple de contributions autour de la récupération d'énergie et la communication sans fil à des fins de surveillance.

MOTS-CLÉS : Roulement intelligent, PHM, diagnostic, pronostic, condition monitoring, récupération d'énergie, RFID, capteurs, télémétrie

Laboratoire (s) de recherche : LGEF INSA-Lyon

Directeur de thèse : Pr. Laurent LEBRUN INSA-Lyon

Président de jury : Pr. Emmanuelle VIDAL-SALLE INSA-Lyon

Composition du jury :

Pr. Yves BERNARD Université de PARIS-SUD	Rapporteur
Pr. Benoit GUIFFARD Université de NANTES	Rapporteur
Dr Oscar D'ALMEIDA SAFRAN	Rapporteur
Pr. Jocelyn BONJOUR INSA-Lyon	Représentant ED MEGA
Pr. Colette LACABANNE UNIVERSITE TOULOUSE 3	Examinatrice
Pr. Laurent LEBRUN INSA-Lyon	Directeur de thèse
Dr. HDR Pierre-Jean COTTINET INSA-Lyon	Invité
Yves MAHEO SKF-AEROSPACE	Invité