

Modélisation angulaire de transmissions mécaniques par engrenages pour la détection de défaut

Type de Contrat : CIFRE

Encadrement Industriel : EDF – service DTG et R&D

Encadrement Scientifique : LaMCoS – INSA de Lyon

Contexte général :

EDF est leader mondial en production d'électricité.

Dans les CNPE (Centrale Nucléaire de Production d'Electricité), des pompes assurent la circulation d'eau de refroidissement.

Une défaillance d'un groupe motopompe aura un impact sur la disponibilité. L'enjeu majeur du dossier **est donc la disponibilité des moyens de production.**

Le second enjeu lié à l'**optimisation de la maintenance** des pompes, la découverte d'une dégradation importante pouvant générer un allongement des arrêts. Ce risque est toutefois limité.

Il est donc d'une grande importance pour EDF de disposer de méthodes qui permettent d'effectuer une détection précoce des défauts de ces pompes (au rang desquels les défauts d'engrenages sont les plus fréquents) pour être en mesure d'anticiper et de planifier convenablement les opérations de maintenance lors des arrêts de tranche.

En complément des méthodes traditionnelles basées sur la mesure vibratoire, d'autres méthodes basées sur la mesure de la vitesse instantanée de rotation (IAS, Instantaneous Angular Speed) émergent actuellement dans différents domaines de surveillance de machines tournantes. Développées au LaMCoS, ces méthodes ont donné des résultats intéressants et prometteurs sur les paliers à roulements. Ces méthodes ont été également utilisées pour détecter les défauts d'engrenages mais uniquement sur des architectures simples. Par ailleurs, elles ont conduit à proposer de nouvelles approches de modélisation originales, compatibles avec les approches classiques de type Eléments Finis, mais autorisant la prise en compte de couplage entre les excitations cycliques et les voies de transfert structurales. Elles ouvrent clairement de nouvelles voies d'investigation pour proposer de nouvelles techniques de surveillance, qui plus est en conditions non stationnaires. C'est ce champs d'investigation qui est visé dans le cadre de cette thèse.

Contexte scientifique et proposition de recherche :

On se propose ici de mettre en œuvre ces approches de modélisation sur des architectures nettement plus complexes dans la mesure où de nombreux couplages sont à prendre en compte avec plusieurs voies de transfert entre les différentes grandeurs physiques. Dans le cadre de cette architecture de type réducteur épicycloïdal, l'analyse vibratoire se heurte à l'exploitation de signaux **présentant de très fortes modulations** liées au mouvement des zones de chargement. A notre connaissance, la voie de transfert sur la rotation de la machine n'a que trop peu été étudiée alors qu'elle s'avère très pertinente, sur la base de résultats expérimentaux, pour des architectures similaires dans le domaine

des éoliennes [1]. La compréhension des phénomènes liés à ces manifestations nous conduit à **reprenre le corpus des modélisations de composants de machines tournantes** dans un cadre original qui s'appuie sur la connaissance de la relation angle-temps (vitesse instantanée de rotation) comme présenté sur la figure 3.

Les outils de modélisation avancée ont beaucoup progressé dans les dernières décennies. Ils restent cependant cloisonnés à une voie de transfert très traditionnelle, orientés vers une surveillance et des phénomènes purement vibratoires, dans la plupart des cas en faisant l'hypothèse d'un **régime stationnaire** [2-4]. Dans le but d'une surveillance plus globale de la machine, une approche multiphysique s'avère indispensable, remettant en cause un certain nombre d'hypothèses simplificatrices traditionnelles (non prise en compte de la rotation dans le modèle dynamique et régime stationnaire).

Dans le cadre de précédentes thèses, plusieurs modèles, simple et original d'un multiplicateur [5, 6] ou plus complexe pour une machine électrique [7], ont été développés au LaMCoS de l'INSA de Lyon. Ces modèles proposent une description par efforts de restitution des interactions entre les parties tournantes et les parties fixes de la machine (roulements, engrenements, couple magnétique, ...), en améliorant la description des répartitions d'efforts (voir figure 2). Une des originalités de ce modèle est d'utiliser une approche dite « angulaire » [6] qui permet de s'affranchir de l'hypothèse de régimes stationnaires en introduisant explicitement le degré de liberté en rotation (voir Figure 3). Le couplage fort entre les géométries discrètes en rotation et les parties fixes se fait essentiellement par la vitesse de rotation (relation angle-temps) afin de correctement décrire les excitations cycliques dans le fonctionnement de la machine. Ce couplage introduit également de manière naturelle la vitesse de rotation comme grandeur d'intérêt pour la surveillance mais également comme grandeur "intermédiaire" représentative du couple d'excitation. Ces premiers travaux, préliminaires à une modélisation réaliste, ont montré la faisabilité d'une telle approche pour des machines où les modèles d'engrenement étaient simplifiés (architecture conventionnelle simple) et ont ouvert de nombreuses perspectives.

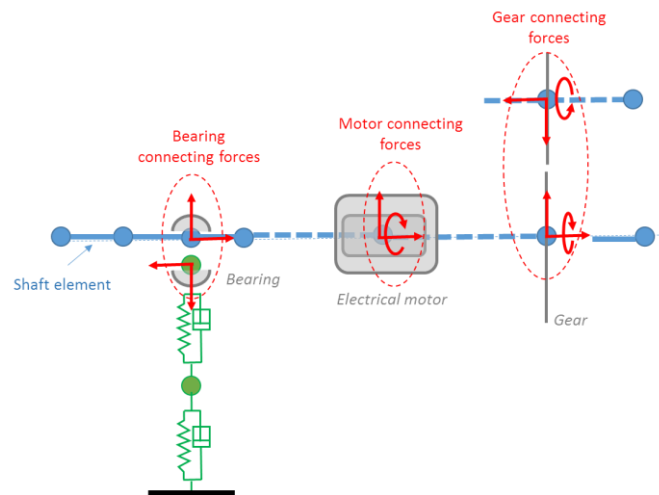


Figure 2 : modèle générique illustrant les couplages potentiels entre parties tournantes et fixes.

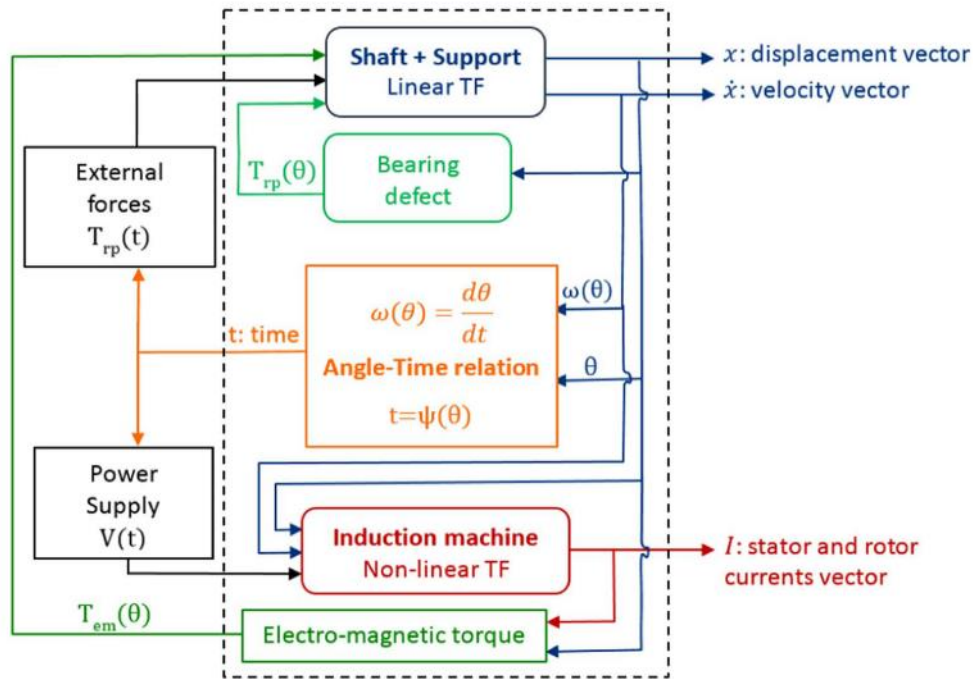


Figure 3 : Schéma méthodologique du couplage électro-magnéto-mécanique dans le cas d'un modèle simplifié de machine électrique [6].

Les objectifs de cette thèse seront donc d'explorer ces perspectives de modélisation dans le cadre d'un partenariat avec une entreprise leader dans le domaine afin de mieux comprendre et modéliser les **phénomènes non linéaires fins** qui conduisent à **des comportements dynamiques particuliers**, comme, par exemple, les phénomènes de modulation. Ces comportements s'exprimeront sur des grandeurs traditionnelles comme les vibrations pour la partie fixe mais également par d'autres grandeurs plus originales comme la vitesse instantanée de rotation.

L'intérêt de ces modélisations consiste également à explorer **des voies de transfert alternatives** par l'intermédiaire de grandeurs originales comme la vitesse de rotation de la machine. Ces alternatives ont été trop peu exploitées et représentent un potentiel très intéressant pour la compréhension des phénomènes induits sur ces nouvelles grandeurs. Dans le cas des trains planétaires, la connaissance de la vitesse de rotation des différents composants sera évidemment un élément décisif dans cette compréhension. L'intérêt scientifique d'aborder le train épicycloïdal est d'avoir des informations de vitesse interne au dispositif qui permettront **par la simulation de mieux comprendre les phénomènes de modulation** sur les différentes voies de transfert.

Par ailleurs, les **conditions de fonctionnement non stationnaires**, issues de chargements variables et de pilotage électrique non conventionnel lors des phases d'arrêt des pompes, seront également explorées afin de vérifier l'intérêt de ces situations pour faire ressortir des comportements révélateurs de la présence de défaut.

Plusieurs champs scientifiques sont directement en jeu dans le cadre de cette thèse :

- la dynamique des architectures de trains planétaires intégrant la composante en rotation à la fois comme signal (éventuellement à mesurer) mais comme couplage entre les excitations cycliques et les résonances structurales,

- l'élaboration de modèles de comportement de l'engrènement, revisités par la nécessité d'introduire des sollicitations, en couple, de défauts de type écaillage ou fissure en pied de dent,
- le développement de couplage mécanique entre les différentes parties tournantes dans une cinématique complexe,
- la prise en compte et la maîtrise de conditions de fonctionnement non stationnaires pour identifier les conditions de fonctionnement révélatrices des manifestations des défauts d'engrènement,
- l'exploration par l'intermédiaire de modèles phénoménologiques de situations extraites des campagnes de maintenance existantes sur le parc, par l'exploitation de mesures prototypes réalisées hors situation d'exploitation,
- la maîtrise de la complexité des modèles et de leur prédictibilité pour définir des stratégies de surveillance des machines soit en exploitation soit en période de maintenance.

Afin de préparer cette thèse et outre les différents travaux réalisés par les deux partenaires, industriel et académique, un stage prospectif M2 a eu lieu lors de la précédente année scolaire, encadré par Adeline Bourdon et suivi par J. Soulliard.

Enjeux industriels :

Plusieurs enjeux et/ou finalités importants pour EDF concernent la capacité à simuler un comportement réaliste d'architectures nouvelles prenant en compte des phénomènes non-linéaires en conditions de fonctionnement non stationnaires. Parmi ces enjeux, on peut retenir :

- la compréhension des phénomènes de manifestations de défauts à leur stade précoces de maturité pour assurer une détection en service ou lors des périodes de maintenance,
- la préconisation de capteurs et de leur localisation, de mesures complémentaires (mesures de courant) aux mesures actuellement opérées pour la maintenance prévisionnelle,
- la préconisation des outils d'analyse et de traitement du signal pour une extraction d'indicateurs pertinents à ce suivi opérationnel,
- la formation aux nouvelles approches en surveillance de machines, puis l'industrialisation des modèles retenus pour un meilleur suivi des matériels,
- l'extension à d'autres matériels par la diversification des modèles proposés,
- la possibilité de proposer des solutions innovantes pour la surveillance des machines tournantes en situation d'exploitation ou en situations maîtrisées pour évaluer la gravité du défaut,
- le développement incrémental d'un déploiement sur un parc de machines, avec une étape d'expertise après suspicion de défaut par sollicitations hors conditions de service, avec une éventuelle instrumentation supplémentaire.

Objectifs attendus en fin de thèse :

Les principaux objectifs attendus en fin de thèse peuvent être synthétisés dans les points suivants, s'agissant en particulier :

- de poser les bases des modélisations de l'engrènement juste nécessaire pour traduire correctement les différentes sources d'excitation (défaut d'écaillage, fissure en pied de dent) ainsi que les différentes voies de transfert vers les points de mesure alternatifs. Ces modélisations doivent reprendre les hypothèses faites dans les approches traditionnelles pour

aboutir à une modélisation pertinente, tirant bénéfice des connaissances des deux partenaires,

- de développer le formalisme des approches angulaires proposé par le laboratoire dans le cadre des modèles de comportement d'engrènement pour obtenir des algorithmes de résolution numérique efficaces et adaptés à la simulation des sources d'excitation et des conditions de fonctionnement éventuellement non stationnaires,
- d'obtenir des modèles numériques fiables de trains d'engrenages simples puis complexes, avec la prise en compte de configurations de fonctionnement des trains planétaires. Ces modèles numériques devront être qualifiés sur la base de mesures expérimentales existantes ou à venir sur des matériels présentant des soupçons de défaut ou des défauts avérés.
- de construire un référentiel de simulations permettant de spécifier les matériels de surveillance (capteurs, chaîne d'acquisition) nécessaires à la détection de défaut plus ou moins précoces. Ces spécifications devront également prendre en compte les conditions de fonctionnement (en opération ou lors des arrêts de tranches).

Plus en détails, les problématiques et difficultés scientifiques associées sont notamment focalisées sur les points suivants :

- *Pour la partie modélisation mécanique*, les chargements qui conduisent à des couplages sont liés à des interactions et des efforts entre les parties tournantes et les parties fixes, qui peuvent être de très faibles amplitudes. Il s'agira donc d'étudier l'interaction de ces chargements avec des comportements vibratoires et modaux des parties fixes et tournantes. Cela nécessite de bien comprendre et décrire les chargements mécaniques dynamiques, mais également les positions et déformations dynamiques des pièces, tout cela dans le cadre d'un modèle de comportement suffisamment fin mais sans être complexe et lourd.
- *Pour la partie détection de défaut*, il est nécessaire de reprendre l'ensemble des hypothèses des modèles existants pour garantir que les efforts ne se réduisent pas à un torseur simplifié mais qu'ils sont correctement estimés et appliqués sur les différentes pièces. Pour les défauts d'écaillage et sur la base de modèles de contact simplifiés (théorie de Hertz) il faudra correctement décrire les répartitions de charge dans les dentures avec une description cyclique. Pour les défauts de fissure en pied de dent, les variations de rigidité présentent un caractère cyclique mais conduisent également à des modifications sur les modes de résonance. Cette description plus fine passe par l'expression des efforts radiaux et tangentiels pour une compréhension des effets induits sur les grandeurs mesurables. Les simulations de comportement offriront également une capacité à mieux spécifier les lieux où doivent être implémentés d'éventuels capteurs supplémentaires ou les analyses en traitement du signal à privilégier.

Une des difficultés majeures de ce travail de thèse consiste à correctement décrire les excitations à périodicité angulaire ou cyclique et les réponses ou voies de transfert à périodicité temporelle (résonances) dans le cas d'un fonctionnement stationnaire ou non stationnaire. Ainsi, l'existence de plusieurs périodicités cycliques d'engrènement imposent d'avoir une description angulaire. Les résonances liées aux structures mécaniques peuvent être modélisées de façon pertinente et adéquate par des approches traditionnelles, elles constitueront une nouvelle voie d'investigation pour une surveillance plus fine.

Organisation des travaux de recherche :

Les travaux de recherche s'organiseront autour de 4 grands thèmes qui pourront éventuellement être abordés en parallèle :

- analyse et proposition de modélisation améliorée de l'engrènement sur la base de modèles existant en intégrant l'approche angulaire. Ces modèles devront éventuellement prendre en considération des simplifications nécessaires pour le passage à l'échelle du nombre d'engrènement à simuler en parallèle,
- premiers modèles d'architecture de type trains planétaires en configuration simple (porte-satellites fixe). Dans cette première approche, le travail consistera à bien introduire la discrétisation de type Eléments Finis juste nécessaire pour décrire les souplesses des pièces,
- extension de ces modèles sur des configurations plus complexes (couronne fixe) avec la prise en compte d'éléments structuraux plus nombreux. L'optimisation de ces modèles et de leur implémentation se focalisera vers des temps de simulation les plus courts possibles,

Mois 1 à 6 : Analyse bibliographique et prise en main de l'approche proposée

Dans un premier temps les travaux se focaliseront sur *la modélisation de l'engrènement*, avec une analyse bibliographique précise des hypothèses traditionnellement faites (éventuellement implicites), en particulier sur la vitesse de rotation. L'objectif est de proposer des modèles de prise en compte de défauts (écaillage et fissure) sur la base des différents modèles de roulement développés au LaMCoS.

Mois 6 à 12 : Première modélisation d'une architecture de type train planétaire

Il s'agira dans cette étape de réaliser le modèle numérique correspondant au matériel avec une cinématique réaliste mais une discrétisation grossière. Une première série de simulations sera réalisée pour quantifier la sensibilité du modèle aux paramètres de modélisation, en particulier en terme de raideur d'engrènement. Cette étape sera réalisée sur une architecture simple d'un point de vue comportement dynamique et cinématique pour avoir des temps de calcul réduits. Une première analyse des phénomènes et des voies de transfert sera également extraite de ces simulations.

Mois 12 à 18 : Analyse des modèles précédents

Pour réaliser cette analyse, il sera nécessaire de bien comprendre les différentes manifestations sur les signaux extraits des simulations. Cette phase d'analyse pourra être accompagnée de confrontations avec des événements passés sur le parc de machines. Elle conduira certainement à un premier niveau de corrections et de modifications du modèle sur la base d'une étude paramétrique.

Mois 18 à 30 : Extension du modèle et complexification des architectures

Il s'agira durant cette période de proposer des modèles plus complets (discrétisation) et plus proches de l'architecture ciblée avec l'intégration d'une cinématique plus complexe (porte-satellites tournant). Dans cette complexification, les résultats et les choix qui auront été faits durant les étapes précédentes pourront être revus et étendus à des modèles d'engrènement plus complexes et/ou à l'introduction de modèles de comportement de roulements. En fonction des retours d'expériences sur le parc et des différents possibilités d'instrumentation hors conditions opérationnelles, des premières préconisations pourront être extraites pour instrumenter une ou plusieurs machines.

Mois 30 à 36: Rédaction Mémoire – Transfert de compétences et de code

Bibliographie

- [1] H. André, A. Bourdon and D. Rémond, **Instantaneous Angular Speed monitoring of a 2MW wind turbine using a parametrization process**, in 'Proceedings of the International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, pp. 415-423, Hammamet, Tunisia, March 26-28, 2011.
- [2] M. Inalpolat, A. Kahraman, **A dynamic model to predict modulation sidebands of a planetary gear set having manufacturing errors**, J. Sound Vib. 329 (4) (2010): 371-393.
- [3] J. Parra, C. Molina Vicuña, **Two methods for modeling vibrations of planetary gearboxes including faults: Comparison and validation**, Mech. Syst. Signal Process. (2017) 213-225.
- [4] Y. Lei, Z. Liu, J. Lin, F. Lu, **Phenomenological models of vibration signals for condition monitoring and fault diagnosis of epicyclic gearboxes**, Journal of Sound and Vibration, 369 (2016) 266-281.
- [5] J.L. Gomez, A. Bourdon, H. André, D. Rémond, **Modelling deep groove ball bearing localized defects inducing Instantaneous Angular Speed variations**, Tribology Int. 98:270-281, 2016.
- [6] A. Bourdon, H. André, D. Rémond, **Introducing angularly periodic disturbances in dynamic models of rotating systems under non-stationary conditions**, Mech. Syst. Signal Process. 44:60-71, 2014.
- [7] A. Fourati, A. Bourdon, N. Feki, D. Remond, F. Chaari and M. Haddar, **Angular-based modeling of induction motors for monitoring**, Journal of Sound and Vibration, 395, 371-392, 2017.

Profil et candidature

Diplôme requis.

Master Recherche en Mécanique, ou à défaut Master Professionnel en Ecole d'ingénieurs, avec obligatoirement une expérience significative (stage de fin d'études) en Recherche.

Profil de formation.

Profil requis

- forte compétence en programmation MatLab,
- compétences en Dynamique (solide et déformable), en modélisation et en compréhension du comportement dynamique, en résolution d'équations différentielles.
- compétences en traitement du signal traditionnel (Analyse de Fourier)
- profil analytique et numérique, avec une capacité à l'analyse expérimentale.

Profil recherché ou attendu

- engrenages et modélisation de défauts, cinématique
- roulements et modélisation de défauts, cinématique
- vibrations et comportement en torsion, expérience significative en modélisation de machines tournantes
- modélisation par Eléments Finis ou discrétisée
- un plus serait une compétence dans les approches angulaires et l'utilisation de la Vitesse Angulaire Instantanée (Instantaneous Angular Speed).

Dossier de candidature.

Le dossier de candidature sera constitué d'un CV, d'une lettre de motivation détaillant les expériences, l'intérêt pour une thèse et plus particulièrement sur ce sujet et le lien entre les compétences et les objectifs du sujet. Des relevés de notes de la dernière année (M2) et une lettre de recommandation d'une personne seront également appréciés.

Tous les éléments se rapportant aux critères énoncés plus haut seront pris en compte pour sélectionner la meilleure candidature sur ce poste.

Le dossier de candidature est à envoyer par messagerie électronique à Didier Rémond (didier.remond@insa-lyon.fr) ou à Adeline Bourdon (adeline.bourdon@insa-lyon.fr) avec les pièces