

LaMCoS – INSA de Lyon  
INSA / CNRS UMR5259  
Bâtiment Jean d'Alembert  
18-20 rue des Sciences  
69621 Villeurbanne Cedex

☎ 04 72 43 84 52  
☎ 04 78 89 09 80  
✉ lamcos@insa-lyon.fr

### **Rapport sur le mémoire intitulé**

### **Analyse de l'effet Morton dans les turbines à vapeur**

### **Présenté par Monsieur Silun ZHANG**

### **En vue d'obtenir le grade de Docteur de l'Université de Poitiers**

Du point de vue industriel, la maîtrise de l'effet Morton est de première importance car il peut être à l'origine de crises vibratoires sévères. Son principe général de fonctionnement est maintenant bien connu mais, malheureusement, la complexité du mécanisme qui le porte est réelle et son traitement numérique reste encore actuellement largement à consolider. Les difficultés rencontrées ont deux sources principales. Tout d'abord la nature totalement multi-physique du phénomène qui couple la dynamique des rotors, la lubrification hydrodynamique et la thermomécanique. Ensuite la difficulté de traitement numérique engendrée par la très grande différence entre les échelles de temps associées au problème de vibration et celles mises en jeu dans le cadre des transferts thermiques. L'introduction générale précise bien le contexte et les objectifs de l'étude.

Le premier chapitre est consacré à l'étude de la bibliographie associée au problème. Elle aborde dans le premier paragraphe les deux effets associant thermique et dynamique du rotor, effet Newkirk et effet Morton, en pointant leurs similitudes mais également leurs différences. La suite est centrée sur l'effet Morton. Dans le second paragraphe il s'agit de recenser les études basées sur des contextes industriels et plus globalement de décrire et commenter les études expérimentales disponibles. Le troisième paragraphe s'intéresse à la modélisation et argumente les difficultés liées aux aspects multi-physiques, à la nature potentiellement transitoire et non linéaire du comportement, à la problématique de différences d'échelles de temps caractérisant les différentes physiques. Enfin le chapitre se termine par une présentation généralisée des stratégies de modélisation recensées et une conclusion.

Les deux chapitres suivants détaillent les modèles nécessaires pour décrire les physiques de base. Le chapitre 2 s'intéresse à la lubrification hydrodynamique dans le cadre des paliers, en tenant compte des effets thermiques. La prise en compte des déformations thermiques ou mécaniques conduisent à considérer un désalignement entre l'arbre et le palier. Les développements présentés visent tout d'abord à trouver les modèles les plus adaptés au problème. Dans ce contexte, par exemple, deux modèles de cavitation différents sont testés. Mais l'autre objectif visé est de rendre les modèles retenus efficaces du point de vue numérique, tout en conservant le meilleur niveau de précision. Pour cela, la température sera par exemple approximée sur une base de polynômes de Legendre. Une fois les choix de modèles effectués et justifiés, la suite du chapitre décrit la stratégie de résolution adoptée pour l'analyse couplée de l'équation de Reynolds et de l'équation de l'énergie, basée sur un algorithme en quatre étapes. Le chapitre se termine par deux études de cas issues de la littérature et une conclusion. Ces études de cas, sur un patin incliné et un palier à deux lobes, permettent d'illustrer la pertinence des choix et de les valider. Cette étape permet de rendre compte des efforts de réaction et de la chaleur générées au niveau du palier.

Le chapitre 3 s'intéresse à la modélisation thermomécanique du rotor permettant d'aborder la déformation thermique, puis à la dynamique du rotor. Pour ce dernier point le rotor est considéré flexible ou idéalisé en rotor rigide modélisé par un système à quatre degrés de liberté. La résolution est abordée en combinant les schémas d'intégration de Newmark et itératif de type Newton Raphson. Dans la mesure où c'est le



régime stable, périodique, qui est visé le processus de résolution utilise des approches de type shooting pour réduire l'effort de calcul. Pour la prise en compte du déséquilibre, deux solutions sont envisagées : masse concentrée ou prise en compte de la déformée induite.

Le chapitre 4 utilise les modèles retenus pour étudier l'effet Morton et vise à les valider à partir de données expérimentales. Le premier paragraphe décrit le modèle non linéaire transitoire global construit. Compte tenu de la problématique liée aux échelles de temps et pour rester dans des limites raisonnables pour l'effort de calcul, une hypothèse de flux thermique moyen est considérée. Le flux thermique est moyenné sur une période de rotation et n'est recalculé que lorsque l'orbite synchrone a évolué de manière significative. Ce type d'approximation n'est pas remis en cause mais il est dommage que son effet et les conditions pour qu'elle soit utilisée dans de bonnes conditions n'aient pas été plus approfondis. Un exemple simplifié aurait pu permettre d'examiner cet aspect en comparant différents degrés d'approximation avec une solution non approximée, pour définir des règles de bonne pratique à respecter. La simulation numérique se fait ensuite avec deux configurations de rotor identiques à celles du banc d'essai développé à l'institut Pprime, soit un rotor court et une version de même nature mais plus longue. Ces configurations sont bien décrites et pourront utilement être diffusées pour constituer des applications de référence. La première phase de calcul se base sur des analyses modales effectuées avec une approche de type coefficients dynamiques. Les résultats confirment les essais et détectent un comportement instable, mais il est bien noté que la précision attendue n'est pas assurée du fait de la linéarisation associée à ce type de modèle. Le troisième paragraphe du chapitre donne les résultats issus de l'approche couplée non linéaire et les compare aux résultats expérimentaux. La comparaison est bonne en terme de convergence au cours du temps mais les résultats numériques sont assez éloignés des résultats expérimentaux avant convergence. Ces écarts sont bien expliqués par des conditions initiales réelles qui varient très rapidement et sont difficiles à reproduire. Pour le rotor court, l'effet Morton est stabilisant d'où la conception et l'étude d'un rotor plus long qui lui présente un comportement instable. Malheureusement les expérimentations n'ont pu porter que sur le rotor court et même si un premier niveau de validation solide est atteint le comportement instable présenté s'installe très vite, dans une zone d'étude où le modèle s'est montré assez éloigné de la réalité expérimentale pour le rotor court. La non disponibilité des données expérimentales s'explique aisément, en revanche une étude de sensibilité du comportement instable aux conditions initiales aurait pu apporter des informations intéressantes.

Le chapitre 5 vise à mettre au point des analyses de stabilité aisément utilisables et exploitables dans un contexte industriel. L'objectif est d'établir des coefficients d'influence qui relient les phénomènes physiques de base qui participent à l'effet Morton : influence du balourd total sur la dynamique du rotor, différence de température induite et déformation thermomécanique du rotor. Pour optimiser le ratio précision/coût, deux approches de complexité différente sont proposées. La première se base sur la littérature et la seconde est développée dans le cadre de cette thèse pour pallier les limitations évidentes de l'existant. Les limites possibles de ces approches sont bien soulignées et elles sont appliquées aux deux configurations rotors considérées précédemment, confirmant la faiblesse de la plus simple. La participation des trois coefficients d'influence dans le comportement instable est bien analysée et illustrée. En revanche l'analyse n'a pu porter que sur un nombre trop restreint de configurations et devra être complétée par une étude plus systématique, en particulier pour mieux en estimer les limites (degré de non linéarité...). Pour cela, le modèle numérique validé pourra servir de base d'étude. Le troisième paragraphe du chapitre reprend les cas connus et documentés et fait en sorte de les expliquer à partir de l'analyse de stabilité réalisée avec les trois coefficients d'influence. Cette initiative est originale et intéressante.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et quatre annexes. La première porte sur la résolution numérique de l'équation de l'énergie, la seconde sur la discrétisation éléments finis pour la conduction thermique, la troisième s'intéresse à la détermination du point haut et enfin la dernière donne les coefficients d'influence utilisés pour l'étude de stabilité.

En conclusion le travail présente une contribution importante pour la compréhension, la prédiction numérique et la mise au point de techniques d'analyse de stabilité associées à l'effet Morton. Réalisée en synergie entre l'institut Pprime et EDF R&D elle offre un équilibre entre avancée numérique et apport de techniques simplifiées utilisables dans un contexte industriel. Cette thèse constitue une première étape et les voies de progrès futurs sont bien soulignées dans la conclusion générale.

Pour l'ensemble de ces raisons je suis tout à fait favorable à ce que ce travail soit présenté en vue d'obtenir le grade de Docteur de l'Université de Poitiers.

Villeurbanne le 11 Mars 2019

Pr Georges Jacquet-Richardet

