



Rapport sur le mémoire intitulé :  
**«Analyse de l'effet Morton dans les turbines à vapeur»**  
présenté par Monsieur Silun Zhang  
en vue de l'obtention du titre de Docteur de l'Université de Poitiers spécialité  
Mécanique

Le mémoire de thèse de Monsieur Silun Zhang porte sur l'étude numérique de l'effet Morton sur la stabilité des machines tournantes. Ce travail, réalisé sous la direction du Professeur Mihaï Arghir et co-encadré par Monsieur Mohamed-Amine Hassini ingénieur de recherche expert chez EDF R&D, comporte 175 pages divisées en 5 chapitres et plusieurs annexes.

Après une introduction rapide sur la problématique de l'effet Morton et ses enjeux d'un point de vue industriel et scientifique, le candidat réalise une étude bibliographique au travers de son chapitre 1 (18 pages). Dans ce chapitre, l'auteur se focalise sur 2 phénomènes physiques que sont l'effet Newkirk et l'effet Morton. Concernant le premier effet, il est rappelé qu'il s'agit d'un problème d'échauffement localisé sur le rotor (lié à un contact « faible ») qui ne modifie en rien le caractère synchrone de la vibration mais qui peut s'avérer instable selon le régime étudié (avant ou après la vitesse critique). Certains résultats, issus de la littérature, sont rappelés qui permet d'interpréter et modéliser cet effet. Concernant le deuxième effet, qui est le cœur de la thèse, Monsieur Silun Zhang rappelle que le processus d'instabilité est assez semblable à celui de l'effet Newkirk. En effet, il s'agit de l'existence d'un échauffement provenant, cette fois, du cisaillement du fluide. Le fluide étant présent sur toute la circonférence du palier, il s'agit désormais d'une distribution de

température variable et non plus d'un point précis localisé au niveau du contact (comme dans le cas de l'effet Newkirk). La dissymétrie de la carte thermique va conduire à une flexion de l'arbre qui va engendrer un balourd plus important (dit balourd thermique) et augmenter le cisaillement dans le fluide et donc la température. C'est ce bouclage mécanique/thermique qui est à la source des instabilités de type « effet Morton ». Dans cette étude bibliographique, il est souligné que plusieurs essais expérimentaux ont été réalisés qui démontre la présence de l'effet Morton. En l'occurrence, une étude assez récente de 2016 permet de corréler le modèle développé par Murphy et Lorenz avec les résultats d'un banc d'essai développé par Panara. Dans la dernière partie de ce chapitre, le candidat présente les différents niveaux de modèle existant pour analyser l'effet Morton. On retiendra que le modèle de Lorentz et Murphy 2010 permet d'introduire, via des coefficients d'influence (linéaire), le couplage entre la vibration, le balourd et les effets thermiques. L'auteur termine ce chapitre en rappelant des éléments bibliographiques concernant l'évaluation du balourd critique pour déclencher l'instabilité ainsi qu'un critère thermique permettant d'estimer la sensibilité à l'effet Morton d'une machine tournante. Il précise aussi que plusieurs simulations du régime transitoire ont pu être réalisées allant de modèle simple à des modèles 3D fluide/structure incluant les déformations thermiques du rotor. L'auteur rappelle que les méthodes présentées reposent sur 3 briques : l'estimation du niveau vibratoire, l'estimation du niveau thermique et l'estimation du balourd. Dans ce chapitre très général, il n'est pas toujours facile d'évaluer les fondements théoriques et les approximations sous-jacentes des différentes méthodes évoquées. Cependant, il permet d'entrevoir les outils qu'il faudra mettre en place pour obtenir un modèle de simulation pertinent et efficace.

Le chapitre 2 (30 pages) est consacré à la modélisation des paliers hydrodynamiques. L'auteur présente un modèle de lubrification thermodynamique qui s'appuie sur les équations de Reynolds et qui intègre les effets de la cavitation ainsi que l'équation d'énergie. Après avoir présenté le cadre générale des équations de Reynolds Monsieur Silun Zhang se concentre sur les modèles de cavitation (Pi film, JFO et MCA). On retrouve ici l'expertise du laboratoire dans la modélisation de ce type de physique. D'ailleurs l'auteur semble s'appuyer sur un code développé au sein de l'équipe. Le système d'équations ainsi obtenu est complété par l'équation d'énergie. Se pose alors le problème de l'interpolation du champ de température. L'auteur opte pour une interpolation par les polynômes de Legendre en cohérence avec d'autres travaux de la littérature. Ce choix le conduit à définir un système d'équations couplées. L'équation de Reynolds avec cavitation étant classiquement traitée par une discrétisation en volumes finis. L'équation d'énergie est quant à elle

traitée aussi en volume fini 3D en s'appuyant sur les variables associées à la projection sur les polynômes de Legendre. La résolution du système est obtenue en chainant un calcul des équations de Reynolds avec cavitation avec celle de l'équation d'énergie jusqu'à convergence de la solution. L'auteur n'évoque pas d'autres stratégies de résolution. Y-a-t-il une raison ? L'algorithme ainsi développé est ensuite validé sur le cas d'un patin incliné 1D. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de la méthode mise en place et valide l'approximation par les polynômes de Legendre avec une résolution aux points de collocation de Lobatto. Pour aller plus loin, Monsieur Silun Zhang calcul les efforts au niveau d'un palier dont il possède des résultats expérimentaux. Là encore, la corrélation avec les résultats de simulation est très bonne. Le développement ainsi réalisé rassemble beaucoup d'expertises à la fois du côté équations de Reynolds avec cavitation mais aussi sur le calcul approché des cartes de température. Ce travail est très intéressant car il permet un couplage de qualité en assurant des performances de simulation remarquable. Le candidat peut désormais aborder l'aspect rotor afin de réaliser le couplage nécessaire à l'analyse de l'effet Morton.

Le chapitre 3 (22 pages) est dédié à la modélisation du rotor en incluant le couplage avec les aspects thermiques. En s'appuyant sur un modèle thermique linéaire du rotor, l'auteur introduit les conditions aux limites nécessaires à l'évaluation de la distribution thermique. On retrouve des hypothèses de températures imposées, de flux imposés et de condition adiabatique. Ces hypothèses auraient mérité d'être mieux justifiées afin que le lecteur puisse en saisir les limites. La simulation sera réalisée à l'aide du code Aster. Le calcul thermomécanique permettra d'évaluer le balourd thermique introduit par le champ de température. La simulation dynamique du rotor se base sur un modèle de poutre de Timoshenko pour le rotor et sur la présence de paliers non-linéaires. Une simulation hybride Newmark/Newton-Raphson est mise en place pour estimer le niveau vibratoire du système. A cette étape, l'algorithme présenté est découplé de l'aspect thermique. L'influence de la température est introduite via le balourd thermique obtenu par deux approches. La première permet de définir un ensemble de masse concentré responsable des efforts de balourd en relation avec la déformation de la fibre neutre issue du calcul thermique. Ces valeurs peuvent être utilisées aussi bien sur le modèle de rotor rigide que flexible. La deuxième approche introduit directement le modèle de déformation thermique dans l'estimation des équations du mouvement et donc génère automatiquement le champ de balourd. Bien évidemment, cette dernière technique ne peut être utilisée que sur le modèle de rotor flexible. Dans ce chapitre, l'auteur évoque deux méthodes de simulations de solutions périodiques. Il serait plus exact de dire qu'il n'y en a qu'une (méthode de shooting) car la recherche de la solution périodique par intégration directe n'est pas une méthode

dédiée à la recherche de ce type de solution spécifique. Par ailleurs, il existe bien d'autres stratégies spécifiques comme : la balance harmonique, schéma aux différences finies avec conditions de périodicité... Il aurait été judicieux de citer des travaux plus complets sur ce sujet.

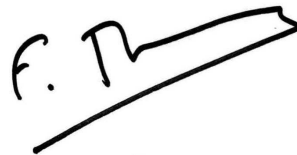
Le chapitre 4 (26 pages) s'attache à la simulation numérique du modèle mis en place en les comparant avec des essais réalisés à l'institut Pprime. Après avoir pris soin de bien exprimer les quantités d'intérêt dans les bons repères, l'auteur présente le chaînage numérique envisagé et l'importance de bien estimer le flux de chaleur moyen sur une rotation. Afin de comparer ses résultats à des données d'essai, un modèle de banc est construit qui présente deux configurations : arbre court (430 mm) et arbre long (700 mm). Les résultats numériques obtenus sur l'arbre court montrent que l'instabilité doit naître à partir de 3000 rpm. Les essais quant à eux font apparaître une instabilité sous-synchrone avec, semble-t-il, de fortes vibrations associées à un balourd important. Bien évidemment, comme le souligne l'auteur, l'analyse numérique linéaire réalisée ne permet pas de prendre en compte ces grandes amplitudes. La configuration de l'arbre court n'impliquant qu'un mouvement de corps rigide de l'arbre, la configuration arbre long a été ensuite analysée. La vitesse critique du premier mode flexion apparaît, d'après l'auteur, vers 8000 rpm (sur le graphe le croisement du 1X avec le FW est plutôt vers 8500 rpm et avec le BW vers 6600 rpm) et ne semble pas comporter d'instabilité. Dans une étape suivante, Monsieur Silun Zhang utilise le modèle numérique complet qu'il a mis au point pour analyser ces deux rotors. Le premier cas ne montre pas d'instabilité de type « Morton », par contre l'arbre long, au travers de l'analyse des phases et des niveaux vibratoires, permet d'identifier un effet Morton déclenché à partir d'un certain niveau de balourd. La configuration arbre court a pu être confrontée à des essais et montre une bonne cohérence des résultats numériques et expérimentaux à la fois en dynamique et en température (une fois que cette dernière est stabilisée). On pourra regretter que la configuration arbre long n'ait pas été, elle aussi, comparée avec des données d'essai car elle présentait l'effet Morton attendu.

Le dernier chapitre (28 pages) est principalement consacré à l'analyse de stabilité des exemples du chapitre 4. En s'appuyant sur la méthode des coefficients d'influence mise en place par Murphy et Lorenz, l'auteur propose d'analyser le risque d'instabilité. Le critère ainsi défini sous-estime très nettement la possibilité d'apparition d'un phénomène instable. Ceci est principalement dû, comme le montre l'auteur, à une mauvaise évaluation des effets thermiques sur la dynamique. En s'appuyant sur son modèle, il montre clairement qu'une bonne estimation du balourd thermique permet de se rapprocher des résultats obtenus par simulation. Cette analyse permet de bien

comprendre le processus responsable de l'instabilité et d'en identifier le paramètre sensible (coefficient d'influence C entre le balourd thermique et le champ de température). Ce paramètre étant, d'un point de vue du design, celui qui semble intervenir au premier ordre.

En conclusion, Monsieur Silan Zhang a réalisé un travail de qualité qui couple des expertises multiples et de hauts niveaux. Les simulations, qu'il a mené, fournissent des résultats très intéressants et montrent l'importance de la prise en compte des effets thermiques dans les paliers en dynamique des rotors. Ces travaux ont donné lieu à plusieurs publications qui démontrent la pertinence de sa recherche vis-à-vis de la communauté scientifique du domaine. En conclusion, ce travail de qualité mérite d'être soutenu pour l'obtention du grade de docteur de l'Université de Poitiers

Fait à Lyon, le 08 mars 2019

A handwritten signature in black ink, consisting of the letters 'F.' followed by a stylized 'T' and a long horizontal stroke.

Professeur Fabrice Thouverez