

Impact de l'angle d'incidence du nombre de Mach et de la géométrie du profil sur la stabilité aérodynamique d'une aube en mouvement

Faiza BRAHIMI^{1*}, Ahmed OUIBRAHIM¹

¹Laboratoire d'Energétique Mécanique et Matériaux
Département Energétique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur. Université Mohamed Bougara, 35000 Boumèrdès,
Algérie

*auteur correspondant : brahimifaiza70@yahoo.fr

Résumé

L'écoulement autour des aubes étant un réservoir d'énergie des instabilités sont possibles, conduisant souvent à des niveaux vibratoires dangereux. L'objectif de ce travail est d'analyser la stabilité des aubes en mouvement sous l'influence des forces aérodynamiques instationnaires et ceci via la simulation numérique du couplage fluide-structure. Le mouvement de l'aube peut être imposé tel qu'un mouvement de tangage, un mouvement de flexion ou une combinaison de ces deux mouvements ou bien un mouvement rigide quelconque. Nous nous sommes intéressés à délimiter les conditions de stabilité de ces aubes et ce en relation avec certains paramètres de fonctionnement tel que l'angle d'incidence et le nombre de Mach et avec la géométrie des aubes. L'analyse est basée sur des aubes à profil NACA65-10% qui est très utilisé dans le domaine des turbomachines et à profil NACA0012 qui a fait l'objet de nombreuses études.

Mots Clés : Ecoulement Instationnaire, Instabilité, Interaction Fluide-Structure, Profil NACA, Simulation Numérique.

Nomenclature

[K] matrice raideur, $kg.s^{-2}$

[M] matrice masse, kg

P pression statique, Pa

q vecteur déplacement, m

\dot{q} vecteur vitesse, $m.s^{-1}$

T_{osc} période de vibration, s

u_{aube} vitesse de l'aube, $m.s^{-1}$

W_{cyc} travail aérodynamique, J

1. Introduction

L'écoulement d'air autour de structures peut induire des instabilités qui dans les cas les plus sévères, conduisent très rapidement ces structures à leur ruine. Il suffit pour cela qu'une portion infime de l'énergie cinétique contenue dans l'écoulement soit transférée à la structure [1], [2]. Ceci est dû à l'interaction fluide-structure gouvernée par un couplage favorable entre d'une part, les forces élastiques et inertielles de la structure et d'autre part les forces aérodynamiques instationnaires. Les instabilités fluide-structure sont prépondérantes pour le dimensionnement de nombreuses structures soumises à des écoulements (aile d'avion, rotor d'hélicoptère, turbomachines à gaz, générateur de vapeur...) ce qui justifie l'intérêt primordial qu'on leur porte.

Les techniques actuelles pour la détection des instabilités en interaction fluide-structure rentrent dans deux catégories bien différenciées [3]. On peut situer, dans une première catégorie, les méthodes d'analyse instationnaires des phénomènes aéroélastiques. Il s'agit de résoudre le problème instationnaire couplé fluide-structure en prenant comme donnée initiale un mode structural associé à l'instabilité, ou à défaut, une combinaison des modes plus représentatifs du mouvement de la structure. Puis une analyse de l'amortissement du déplacement de la structure permettra de conclure sur la stabilité ou l'instabilité du système. Ces méthodes, pouvant devenir inabornables en temps de calcul, permettent d'utiliser des codes de calcul fluide-structure évolués et précis. Dans une deuxième catégorie on peut classer les méthodes de recherche de conditions

d'instabilités. Il s'agit de déterminer pour une gamme précise de paramètres (vitesse de l'écoulement, géométrie, etc.) les conditions dans lesquelles le système est prédisposé à être instable. La maîtrise des conditions pour lesquelles on peut observer ces phénomènes constitue actuellement un axe de recherche important [4].

Les instabilités sont pilotées par les forces induites résultant du mouvement de la structure. La connaissance de ces forces d'interaction est la clé de l'analyse de stabilité du système bouclé fluide-structure. Une multitude de méthodes et de modèles sont utilisés pour résoudre l'interaction fluide-structure. Ceci révèle l'extrême complexité de ce type de problèmes, malgré l'ajout de certaines simplifications [5]. Avec le développement des codes de calcul en mécanique des fluides et l'augmentation des ressources informatiques, la simulation numérique devient une alternative intéressante et complémentaire pour l'étude des instabilités dans le cas des couplages fluide-structure. Ces problèmes étant complexes à étudier, certaines simplifications peuvent cependant être mises en œuvre. Dépendant du cas étudié, la structure est modélisée comme un corps rigide ou comme un corps déformable. Ce choix est caractérisé par le type de mouvement jugé plus représentatif du phénomène en question. Dans le cas d'un corps solide rigide, la cinématique de son mouvement peut être décomposée en une translation (deux ou trois degrés de liberté) et/ou une rotation (un ou trois degrés de liberté) suivant que le problème est bidimensionnel ou tridimensionnel [6], [7].

Les motivations de cette étude sont basées sur l'approfondissement des mécanismes physiques liés à la naissance d'instabilités dans les écoulements autour d'obstacles. Dans le travail que nous présentons ici des outils numériques et mathématiques sont utilisés afin de modéliser, résoudre l'écoulement de l'air autour des aubes et mettre au point une méthodologie pour la prédiction d'instabilités aéroélastiques de ces aubes. La méthode de calcul développée est basée sur un concept relativement simple, le couplage entre codes fluide et structure se fait de la façon suivante: on calcule dans un premier temps, les chargements fluides exercés sur la structure. Ensuite ce chargement est utilisé pour le calcul mécanique et on en déduit le déplacement de la structure utilisé comme condition limite du calcul fluide à l'itération suivante. L'analyse de stabilité proposée ne s'intéresse qu'à la réponse du fluide au mouvement des aubes. Cette réponse de l'écoulement conduit selon le cas et par cycle de mouvement à un travail moteur ou à un travail résistant sur l'aube (amortissement aérodynamique négatif ou positif) C'est donc en fonction du signe de ce travail qu'on peut juger de la stabilité de l'aube c'est-à-dire que quand il est négatif le mouvement de l'aube est amplifié et cette dernière est instable, dans le cas contraire le mouvement est amorti et l'aube est stable.

2. Résolution numérique

Les problèmes d'interactions fluide-structure et en particulier l'aéroélasticité sont un domaine où la simulation numérique améliore la compréhension et la prédiction des phénomènes physiques. La simulation numérique de l'écoulement autour des aubes en mouvement nécessite la résolution simultanée de problèmes de dynamique des fluides en domaine déformable et de dynamique des structures. Le fluide étant visqueux et compressible, on résout dans ce milieu, les équations de Navier-Stokes en régime instationnaire et bidimensionnel avec un modèle de fermeture à une équation. La formulation est appliquée au moyen d'un maillage dynamique qui s'adapte au mouvement des aubes. On détermine ainsi les forces aérodynamiques agissant sur la structure.

Pour le cas du mouvement forcé l'aube peut être excitée suivant un déplacement vertical (mouvement de flexion) ou suivant une rotation d'angle α (mouvement de tangage) ou une combinaison de ces deux mouvements. Pour le cas du mouvement libre les équations du mouvement de l'aube sont résolues.

L'interaction fluide- structure est réalisée par les forces aérodynamiques et par le mouvement de la structure. A chaque pas de temps, on résout simultanément le système des équations de Navier-

Stokes et le système des équations du mouvement de la structure. Pour effectuer un calcul couplé, on fait communiquer les deux milieux à travers les surfaces communes. On applique un algorithme de couplage faible. Dans le cadre du couplage aéroélastique, le fluide transmet les efforts au solide et reçoit un déplacement de la part de celui-ci. Après un certain nombre d'échanges successifs, on atteint un état stationnaire couplé dans lequel le système et les quantités échangées n'évoluent plus.

3. Analyse de stabilité

L'existence d'instabilités est révélée par les courbes de fréquence et d'amortissement résultant de calculs ou d'expériences (présence d'amortissement négatif). Une interprétation de ces résultats s'appuyant sur une bonne connaissance des mécanismes de couplage permet de bien orienter les procédures de recalage des modèles de calcul et la recherche de solutions susceptibles de rendre au système la stabilité [8]. Le critère de stabilité basé sur l'amortissement du système (structural et aérodynamique) est défini comme suit :

- Si l'amortissement est inférieur ou égal à zéro, on a divergence ou oscillations croissantes.
- Si l'amortissement est supérieur à zéro, on a oscillations décroissantes d'un système dynamiquement stable.

L'amortissement aérodynamique est défini comme étant le travail des efforts aérodynamiques instationnaires accompli au cours d'un cycle de vibration, normalisé par l'énergie cinétique moyenne de l'aube. L'amortissement aérodynamique est normalement plusieurs dizaines de fois plus grand que l'amortissement mécanique. C'est lui qui assure la sécurité de fonctionnement des turbomachines. Cet amortissement aérodynamique est le résultat de phénomènes forts complexes comportant l'émission de tourbillons au sein du fluide dès les plus faibles vitesses, puis l'émission des ondes sonores d'intensité significatives aux vitesses plus élevées, enfin l'apparition d'ondes de choc aux grandes vitesses.

Du fait du couplage aéroélastique, un échange d'énergie mécanique se produit entre le fluide et la structure qui oscille. On dit que la structure est stable lorsque l'énergie mécanique est transférée de la structure vers le fluide qui la dissipe. C'est-à-dire que lorsqu'un événement extérieur engendre une petite oscillation initiale, alors cette oscillation va s'amortir. Mais si l'énergie se transfère du fluide vers la structure, l'oscillation initiale s'amplifie à cause du couplage aéroélastique jusqu'à la ruine, et la structure est instable. Le phénomène de croissance transitoire de l'énergie est un concept récent en aéroélasticité. Lorsqu'une structure subit une excitation initiale, on peut observer une amplification temporaire de l'énergie qui décroît ensuite. Cette amplification peut conduire à une fatigue prématurée de la structure [9]. Le meilleur et le plus physique choix est l'examen de l'énergie totale notée E_t de la structure donnée par la somme de l'énergie cinétique E_c et l'énergie de déformation E_{pint} .

$$E_t = E_c + E_{pint} \quad (1)$$

$$E_t = \frac{1}{2} \dot{q}^t [M] \dot{q} + \frac{1}{2} q^t [K] q \quad (2)$$

Le taux de variation temporelle de E_t est égal au taux de variation du travail des forces extérieures. Si on néglige les forces d'amortissement de la structure, seules les forces aérodynamiques sont prises en compte dans le bilan d'énergie.

Le travail aérodynamique est défini alors comme étant le travail des efforts aérodynamiques instationnaires accompli au cours d'un cycle de vibration (eq.3). C'est donc en fonction du signe de ce travail qu'on peut juger de la stabilité de l'aube

$$W_{cyc} = \int_0^{T_{osc}} \int p \cdot u_{aube} dS dt \quad (3)$$

4. Résultats

Les profils utilisés dans ces simulations sont le NACA 0012 qui est un profil symétrique et le NACA 65-10% qui est dissymétrique dont les paramètres géométriques sont inspirés des valeurs utilisées en pratique pour la conception des turbomachines. Nous recherchons les zones de stabilité pour des conditions aérodynamiques susceptibles d'être rencontrées par les aubes pour déterminer ainsi les régimes de fonctionnement stables et instables. Les conditions de fonctionnement qui sont des données importantes pour le modèle aérodynamique sont représentées par l'angle d'incidence et le nombre de Mach.

4.1 Cas test : écoulement autour d'un profil NACA 0012 en mouvement de tangage

Les oscillations de tangage se font autour d'un axe situé au quart avant de la corde du profil en régime transsonique. Ce cas test correspond à l'Agard CT5 [10]. Le mouvement de rotation du profil est régi par la loi sinusoïdale : $\alpha(t) = \alpha_m + \alpha_0 \sin \omega t$ avec $M_\alpha = 0,755$; $\alpha_m = 0,016$; $\alpha_0 = 2,51$ et $\omega = 0,1628$. Les calculs ont été effectués sur un maillage de 38671 nœuds. La solution stationnaire est illustrée par la distribution du coefficient de pression représentée sur la figure 1 où on compare les résultats obtenus par nos simulations et ceux de la référence [10]. La dispersion des résultats pour ce calcul reste très modérée, ceci permet d'ores et déjà d'affirmer que les grandeurs de l'écoulement instationnaire sont prédites correctement.

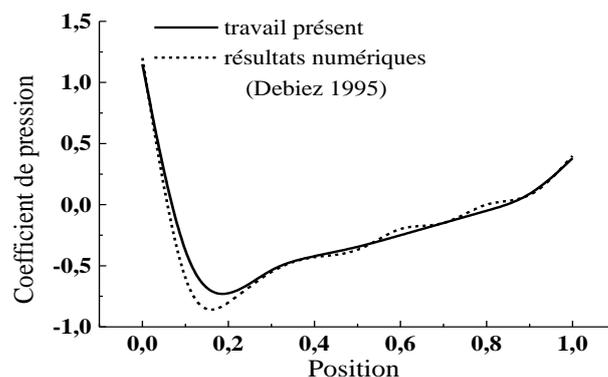


Figure 1 : Comparaison des distributions du coefficient de pression le long de la corde

4.2 Mouvement forcé de translation

L'aube est mise en vibration avec une fréquence ω égale à 282 rd/s. Le mouvement d'oscillation s'effectuant en translation (battement vertical), pour simuler le mode en flexion, est obtenu en faisant varier la position du profil suivant l'axe vertical de manière sinusoïdale autour d'une position moyenne h_m de 4.10^{-5} m. Les conditions initiales sont données par l'écoulement en amont du domaine de calcul. Pour toutes les simulations, les itérations sont arrêtées lorsque le résidu des variables conservatives décroît de trois ordres de grandeurs. Pour juger de la stabilité des profils d'aubes, on a tracé la variation du travail aérodynamique par cycle de mouvement en fonction de l'angle d'incidence et ceci pour les deux types de profils figure 2 et figure 3. Les résultats retenus correspondent à une plage de variation de l'angle d'incidence de -25° à $+25^\circ$. Par comparaison des figures 2 et 3 nous pouvons déduire que les profils symétriques présentent des zones de stabilité plus étendues par rapport à celles des profils dissymétriques. Pour le profil NACA0012, l'incidence 0° est un angle de transition, le profil est nettement stable pour les incidences positives et il est instable pour les incidences négatives. Par contre pour le profil NACA65-10%, l'instabilité se manifeste jusqu'à un angle d'incidence de 7° au-delà de cet angle le profil devient stable.

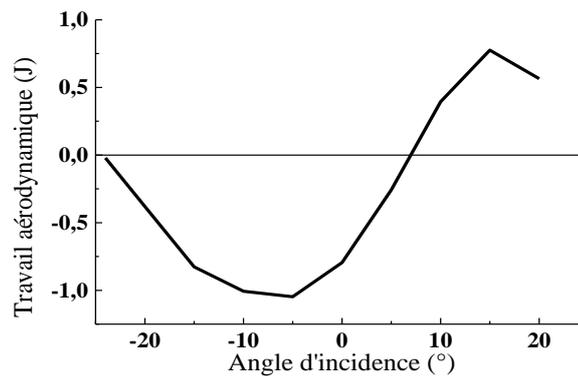


Figure 2 : Variation du travail aérodynamique en fonction de l'angle d'incidence pour le NACA 65-10%

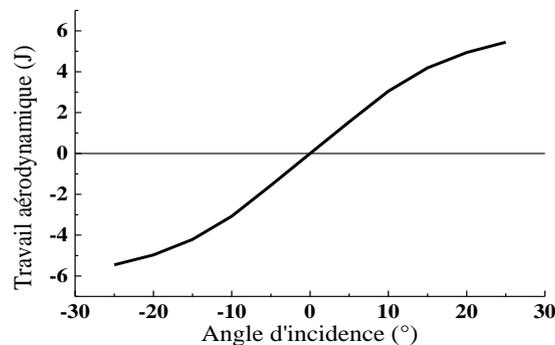


Figure 3. Variation du travail aérodynamique en fonction de l'angle d'incidence pour le NACA 0012

Pour déterminer la vitesse de l'écoulement qui conduit les aubes au mode aéroélastique instable nous avons représenté sur les figures 4 et 5 l'évolution du travail aérodynamique en fonction du nombre de Mach pour différentes incidences. Pour le NACA65-10% on constate que pour les différents angles d'incidence l'instabilité apparaît pour un nombre de Mach critique qui correspond à la limite de stabilité. C'est-à-dire pour des nombres inférieurs à ce Mach critique l'aube est aérodynamiquement stable par contre pour des nombres de Mach supérieurs à cette valeur critique l'effort sur l'aube travaille en force d'excitation et l'aube devient instable. La valeur du nombre de Mach critique dépend aussi de l'incidence. On constate bien que, quand l'angle d'incidence est plus élevé, la limite de stabilité est déplacée vers des nombres de Mach plus grand. La même figure indique que l'aube à incidence négatif n'est jamais stable quelque soit le type d'écoulement subsonique ou transsonique.

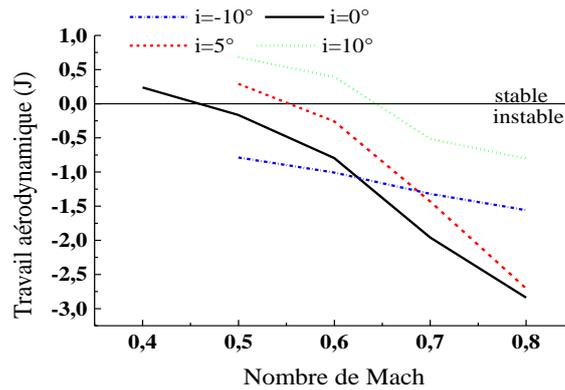


Figure 4 : Variation du travail aérodynamique de translation en fonction du nombre de Mach pour le NACA 65-10%

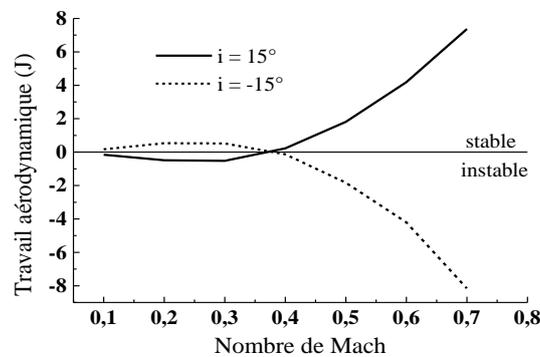


Figure 5 : Variation du travail aérodynamique de translation en fonction du nombre de Mach pour le NACA 0012

Pour le profil NACA0012 nous constatons que pour un écoulement à faible nombre de Mach (0.1 à 0.4) le profil n'est stable que quand l'incidence est négative par contre pour des nombres de Mach plus élevés (0.4 à 0.7) la stabilité du profil n'est atteinte que quand l'incidence est positive. La détermination des zones de stabilité des aubes en mouvement forcé dans un écoulement par rapport aux paramètres de fonctionnement ne peut se faire de manière indépendante.

4.3 Mouvement libre

Dans cette étape, l'analyse de stabilité proposée ne s'intéresse qu'à la réponse du fluide aux vibrations des aubes. Cette réponse de l'écoulement conduit selon le cas et par cycle de vibration à un travail moteur ou à un travail résistant sur l'aube (amortissement aérodynamique négatif ou positif).

Sur la figure 6 la courbe représente l'évolution de l'énergie acquise par la structure au cours du temps, nous pouvons remarquer que pour des angles d'incidence négatifs ($-20^\circ \leq i \leq -10^\circ$) la courbe a un comportement stable. Par contre pour $-5^\circ \leq i \leq 0^\circ$ la courbe est croissante mais avec une faible pente au regard des échelles en jeu. En augmentant l'angle d'incidence jusqu'à 20° on voit que la structure accumule sans cesse de l'énergie sans le moindre retour vers le fluide. Nous sommes sans doute en présence d'un cas d'instabilité similaire à des conditions de flottement. Il est apparent sur la figure 7 traduisant l'évolution du travail aérodynamique en fonction de l'angle d'incidence que faire varier les conditions aux limites, tel que l'angle d'incidence, permet de modifier significativement le comportement du profil, synonyme d'apparition d'un comportement instable

pour des angles d'incidence positifs et surtout quand la valeur de l'angle augmente. Ce comportement instable disparaît pour des incidences négatives.

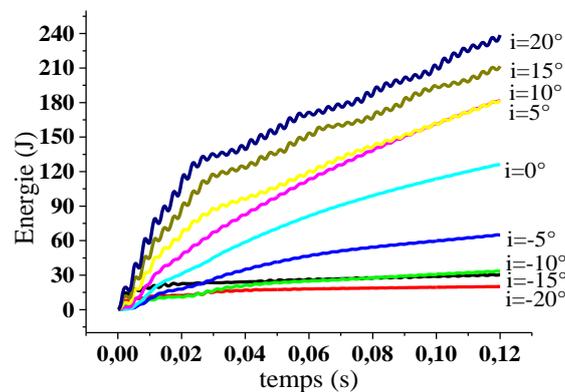


Figure 6 : Evolution de l'énergie fournie à la structure pour le NACA 65-10% avec différents angles d'incidence

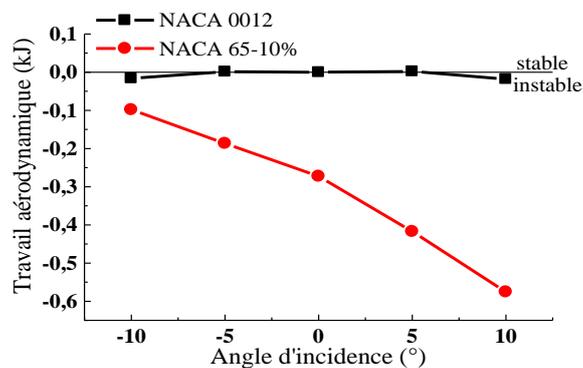


Figure 7 : Comparaison de la variation du travail aérodynamique en fonction de l'angle d'incidence pour les profils NACA 65-10% et NACA 0012

Sur la figure 8 nous avons représenté la variation du travail aérodynamique en fonction du nombre de Mach pour trou ver le nombre critique qui conduit au mode aéroélastique instable.

Selon cette courbe le profil est à la limite de stabilité aérodynamique pour des écoulements faiblement subsoniques correspondant à un $Mach \leq 0,2$, au-delà de cette valeur, la courbe décroît vers les valeurs négatives importantes indiquant l'instabilité du profil qui s'explique par le transfert d'une énergie importante du fluide vers la structure comme le montre la figure 9. Quoique les temps d'exploration soient différents, cette même figure montre que pour des Mach allant de 0.1 à 0.3 l'énergie transférée par le fluide à la structure est faible et présente aussi une variation faible, au-delà de 0.4 l'énergie croît remarquablement avec une pente importante.

On observant les figures représentant respectivement la comparaison des évolutions des énergies au cours du temps (fig.10) et la comparaison des travaux aérodynamiques (fig. 7 et 8) on aperçoit l'effet de la cambrure du profil qui est du à la distribution de l'épaisseur et son impact considérable sur la stabilité du profil. En raison de sa cambrure positive, le profil NACA 65-10 % conduit à une portance plus importante que le NACA 0012 et en raison de sa symétrie, le NACA 0012 conduit à une traînée très faible par rapport à celle du NACA 65-10 %. L'énergie acquise alors par le profil NACA 0012 est très faible conduisant à un travail aérodynamique presque nul ce qui lui permet de

contenir une stabilité aérodynamique quelque soit l'angle d'incidence (fig.7)) et quelque soit le nombre de Mach (fig.8) et ce pour les conditions de fonctionnement choisies pour ces simulations.

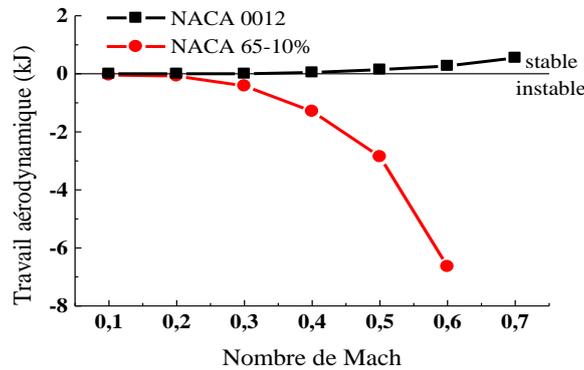


Figure 8 : Comparaison de la variation du travail aérodynamique en fonction du nombre de Mach pour les profils NACA 65-10% et NACA 0012

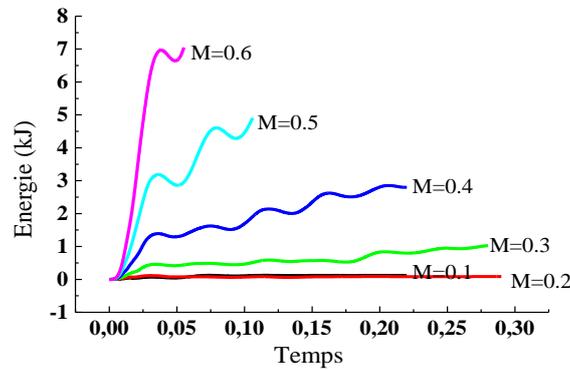


Figure 9 : Evolution de l'énergie fournie à la structure pour le NACA 65-10% avec différents nombres de Mach

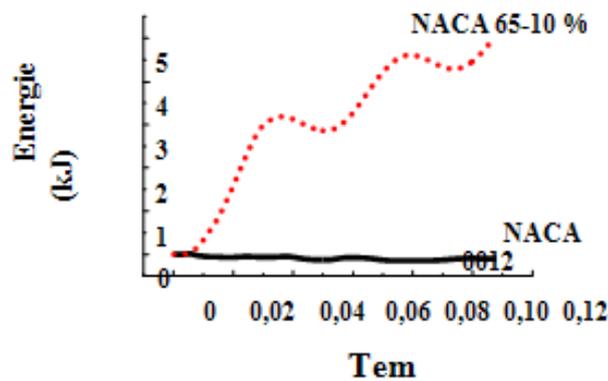


Figure 10 : Comparaison de l'évolution de l'énergie fournie à la structure pour les profils NACA 65-10% et NACA 0012

5. Conclusion

Dans le but d'analyser l'effet de certains paramètres de fonctionnement tels que l'angle d'incidence et le nombre de Mach ainsi que l'effet de la géométrie des aubes sur la stabilité de ces

dernières quand elles sont en mouvement, nous avons effectué des simulations numériques d'écoulements autour de profils NACA basées sur un couplage entre le fluide et la structure. Deux types de mouvement ont été traités, le mouvement forcé en translation caractérisé par un degré de liberté et le mouvement libre caractérisé par trois degrés de liberté. Nous avons quantifié l'énergie transférée du fluide vers la structure et évalué le travail des forces aérodynamiques dont le signe est le paramètre qui nous indique sur l'état de la structure stable ou instable. Ceci nous a permis de délimiter les zones de stabilité des aubes et de déterminer les conditions favorisant cette stabilité.

Les résultats obtenus montrent clairement que la stabilité des aubes qu'elles soient en mouvement forcé ou en mouvement libre est très affectée par la variation de l'angle d'incidence et le nombre de Mach. On dispose ainsi d'un outil d'analyse qui nous permet d'éviter l'apparition des instabilités ou du moins de les bien contrôler. La géométrie des aubes constitue aussi un paramètre important qui peut être pris en considération dès le stade de conception. Des comparaisons des résultats de distributions du coefficient de pression obtenus avec des résultats trouvés dans la littérature ont montré une bonne concordance.

Références

1. Neubauer. J. (2004), *Aérodynamique 3-D instationnaire des turbomachines axiales multiétages*. Thèse de doctorat spécialité Mécanique, Université de Paris 6.
2. Axisa. F. (2001), *Modélisation des Systèmes Mécaniques, Interactions Fluide Structure*, Hermès.
3. Fernandez Varela. M. A. (2001), *Modèles Simplifiés d'Interaction Fluide –Structure*, Thèse de Doctorat en sciences, Spécialité : mathématiques appliquées, Université Paris IX Dauphine.
4. Chassaing. J-C. (2009), *Aéroélasticité Supersonique d'une Surface Portante 2-D*, Proposition de Stage de M1, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
5. Bodard. N. (2006), *Interaction Fluide-Structure par la Méthode des Eléments Spectraux*, Thèse de Doctorat N° 3603, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
6. Glowinski. R., T-W. Pan, T.I. Helsa, D.D. Joseph, et J. Periaux (2000), *A Distributed Lagrange Multiplier/Fictitious Domain Method for the Simulation of Flow Around Moving Rigid Bodies: Application to Particulate Flow*, **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering** 184, pp. 241-268.
7. Robertson. I., L. Li, S.J. Sherwin et P.W. Bearman (2003), *A Numerical Study of Rotational and Transverse Galloping Rectangular Bodies*, *J. of fluids and structure*, 17: pp. 681-699.
8. Dat. R. (1995), *Sur les Mécanismes de Couplage Ecoulement-Structure*, *Revue Française de Mécanique* N° 1, pp. 13-22.
9. De Langre. E. et P. Hemon (2008), *Interactions Fluide - Structure, Aéroélasticité*, Cours, Ecole Polytechnique, CNRS LadHyX, France.
10. Debiez. Ch. (1995), *Etude d'un Traitement par Petites Perturbations du Domaine pour l'Equation d'Euler Instationnaire*, Programme 6 calcul scientifique, modélisation et logiciel numérique, Projet Sinus, Rapport de Recherche n° 2691, 47 pages, Unité de recherche INRIA Sophia-Antipolis, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique