



Investigation Numérique de L'Extraction de L'Energie par une Aile Oscillante

A. Boudis^{*1,2}, A. Benzaoui², H. Oualli³ O. Guerri¹, M. Mekadem³

¹ Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, BP 62 Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340, Alger, Algérie.

² LTSE, Faculté de Physique-USTHB, Bp N° 32 El Alia-Bab Ezzouar 16111 Alger, Algérie.

³ LMF, École Militaire Polytechnique, BP 17c Bordj El Bahri, 16046, Alger, Algérie.

* a.boudis@cder.dz

Abstract— In the present work, we carried out numerical investigations of the trajectory effect on the energy extraction process by an oscillating wing. We consider a NACA 0012 airfoil in combined pitching and heaving motions. The unsteady Navier-Stokes equations governing the flow around the airfoil are solved in a two-dimensional domain at a low Reynolds number, $Re = 10^4$, using the industrial CFD code ANSYS Fluent 16. The oscillating mesh motion is provided by the dynamic layering method. An adjustable parameter S (flatness coefficient) is used to simulate two types of trajectory, sinusoidal and non-sinusoidal. The obtained results show that the use of a non-sinusoidal pitching motion improves the extraction performances of 25%.

Keywords— energy extraction, oscillating wing, non-sinusoidal trajectory, aerodynamic force.

Résumé— Dans le présent travail, nous avons effectué une investigation numérique de l'influence de la nature du mouvement sur le processus d'extraction d'énergie par une aile oscillante. Nous considérons un profil NACA0012 de 100 mm de corde. Le profil est animé de mouvements oscillatoires en pilonnement et tangage combinés et est placé dans un écoulement à faible nombre de Reynolds $Re=10^4$. Les équations de Navier-Stokes qui régissent l'écoulement autour du profil sont résolues dans un domaine bidimensionnel, en calculs instationnaires avec maillage mobile. Le code industriel ANSYS Fluent 16[®] est utilisé. La technique *dynamic layering* est appliquée pour mettre à jour le domaine d'étude à chaque pas de temps. Un paramètre réglable S (coefficient d'aplatissement) est retenu pour simuler différents mouvements (sinusoïdal et non-sinusoïdal) du profil. Les résultats obtenus dans cette étude montrent que les trajectoires non sinusoidales pour le mouvement en tangage permettent une amélioration de 25% des performances d'extraction d'énergie.

Mots-clefs— extraction d'énergie, aile oscillante, trajectoire non sinusoidale, force aérodynamique.

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, les besoins énergétiques sont de plus en plus croissants et les problèmes environnementaux liés aux émissions de CO₂ sont devenus une préoccupation à l'échelle mondiale.

Produire plus d'énergie et réduire les émissions des gaz à effet de serre nécessite l'utilisation des énergies renouvelables non polluantes. Dans ce cadre, l'utilisation de l'énergie cinétique du vent ou des courants marins pour produire de l'énergie offre aujourd'hui des perspectives d'avenir très intéressantes. Ces dernières années, un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des mécanismes bio-inspirés de la nature pour produire de l'énergie. En biomécanique, plusieurs systèmes récents tentent d'imiter la cinématique de la nageoire caudale des poissons ou encore le mouvement des ailes d'un oiseau. D'où l'idée de développer des engins volants, bateaux et systèmes sous-marins propulsés par aile oscillante. Toutefois, le champ d'application d'un mécanisme à aile oscillante ne se limite pas seulement à la propulsion, celle-ci présente également un grand intérêt dans le domaine de l'extraction d'énergie.

On doit le premier système d'aile oscillante destiné à l'extraction d'énergie à McKinney et DeLaurier (1981)[1]. Depuis, plusieurs systèmes à ailes oscillantes, autant pour la propulsion que l'extraction d'énergie, ont été développés ([2], [3] et [4]). A titre d'exemple, des chercheurs japonais ont réalisé des essais sur un chalutier de 15.7 m de long, doté d'une aile oscillante passive, installée à la proue du bateau et destinée à l'extraction de l'énergie des vagues. Ces tests ont montré que ce système pouvait être utilisé pour réduire la traînée et/ou comme propulseur passif. On cite également, le bateau de pêche russe de 174 tonnes, dédié à la recherche, qui est équipé d'un dispositif à aile battante pour extraire l'énergie des vagues. Des tests, sur un prototype de ce bateau à échelle réelle, ont montré qu'un tel dispositif pouvait augmenter la puissance des moteurs jusqu'à 45-87%.



Plus récemment, Kinsey et Dumas ([5] à [6]) ont montré qu'il était possible d'appliquer des ailes oscillantes aux éoliennes ou hydroliennes et qu'un système regroupant plusieurs ailes battantes pouvait conduire à une efficacité d'extraction d'énergie supérieure aux turbines classiques à pales rotatives.

Dans la quasi-totalité des études traitant le problème de génération de poussée et/ou d'extraction d'énergie par aile oscillante, on ne considère que des trajectoires de mouvement sinusoïdal. Dans cette perspective, l'objectif principal du présent travail consiste à évaluer l'effet de la nature de la trajectoire (mouvement) de battement sur le coefficient d'extraction d'énergie et sur le rendement propulsif. L'écoulement autour du profil d'aile NACA0012 est résolu en bidimensionnel à l'aide du code industriel CFD-ANSYS Fluent 16©. Les paramètres cinématiques du mouvement de battement de l'aile sont introduits et contrôlés dans l'environnement Fluent via des fonctions UDF écrites en langage C.

II. EXTRACTION D'ENERGIE PAR AILE BATTANTE

Comme présenté dans la Figure 1, une aile oscillante est définie ici comme étant une aile qui accomplit simultanément un mouvement de pilonnement et un mouvement de tangage. Le tangage est la rotation de l'aile autour d'un axe prédéfini alors que le pilonnement est le déplacement vertical de l'aile.

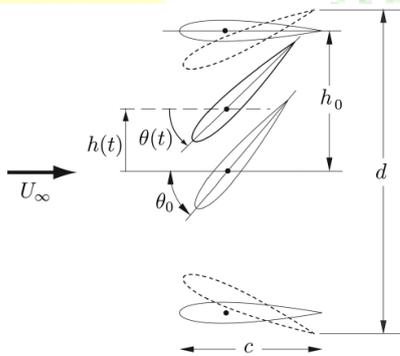


FIG. 1 : Mouvement typique d'une aile battante [5].

Habituellement, le mouvement d'oscillation considéré dans la quasi-totalité des études, est sinusoïdal et il est décrit par les relations suivantes :

Mouvement de pilonnement :

$$h(t) = h_0 c \cos(\omega t) \quad (1)$$

Mouvement de tangage :

$$\theta(t) = \theta_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$

Dans le présent travail, le mouvement de l'aile est représenté par des trajectoires elliptiques obéissant à l'équation suivante :

$$f(t) = \frac{S \cos(\omega t)}{\sqrt{S^2 \cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t)}} \quad (3)$$

où le paramètre S est appelé coefficient d'aplatissement. Comme le montre la Figure 2, quand $S=1$, la trajectoire est sinusoïdale et lorsque S tend vers l'infini la trajectoire devient carrée. Les mouvements de pilonnement et de tangage basés sur une trajectoire elliptique sont alors définis comme suit :

$$h(t) = c \frac{h_0 S_h \cos(\omega t)}{\sqrt{S_h^2 \cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t)}} \quad (4)$$

$$\theta(t) = \frac{\theta_0 S_\theta \cos(\omega t + \phi)}{\sqrt{S_\theta^2 \cos^2(\omega t + \phi) + \sin^2(\omega t + \phi)}} \quad (5)$$

Où : h_0 et θ_0 sont, respectivement, les amplitudes maximales de pilonnement et de tangage. S_h et S_θ sont les coefficients d'aplatissement de la trajectoire de pilonnement et de tangage. c est la corde du profil. $\omega = 2\pi f$ est la pulsation et ϕ est l'angle de phase entre le pilonnement et le tangage.

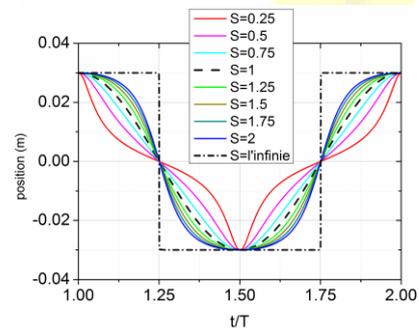


FIG. 2 : Trajectoires de battement selon différentes valeurs du coefficient d'aplatissement S .

Pour une éolienne conventionnelle, la vitesse effective perçue par un tronçon de pale est toujours la même. Dans le cas d'une aile battante, le degré de liberté supplémentaire apporté par le tangage fait en sorte que la vitesse effective varie sur un cycle. Suivant le mouvement de l'aile et la vitesse du vent U_∞ , l'angle d'attaque effectif et la vitesse effective de l'aile sont donnés par :

$$\alpha_{eff}(t) = -\arctan\left(\frac{dh(t)/dt}{U_\infty}\right) + \theta(t) \quad (6)$$



$$V_{eff}(t) = \sqrt{U_{\infty}^2 + \left(\frac{dh(t)}{dt}\right)^2} \quad (7)$$

A. Principe de l'extraction d'énergie

Pour définir le mode fonctionnement de l'aile battante, un paramètre de mise en incidence, χ est introduit. Ce paramètre sert à comparer l'orientation angulaire du profil par rapport à l'angle de l'écoulement effectif :

$$\chi = \frac{\theta_0}{\tan^{-1}(h_0\omega/U_{\infty})} \quad (8)$$

L'aile est en mode d'extraction d'énergie quand $\chi > 1$; elle est en mode propulsion lorsque $\chi < 1$ et en mode de glissement (*feathering*) à $\chi = 1$.

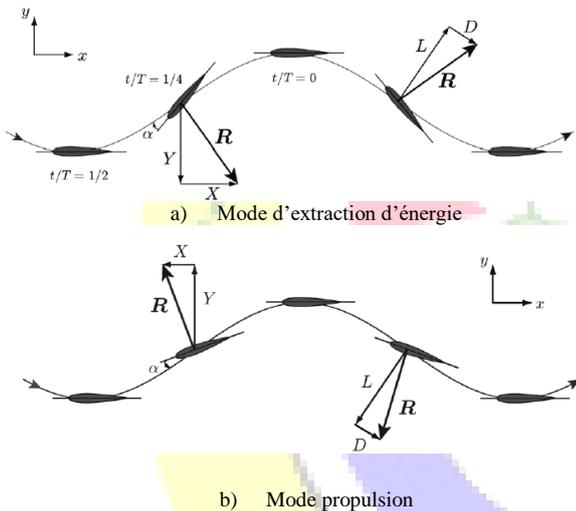


FIG. 3 : Modes d'opérations d'une aile oscillante [5].

En mode d'extraction d'énergie, la composante verticale Y de la résultante aérodynamique R doit être dans le même sens que le mouvement de pilonnement c'est-à-dire lorsque l'aile monte la composante Y se dirige vers le haut et lorsque l'aile descend Y se dirige vers le bas. Dans ce cas, Le travail de l'écoulement sur l'aile est positif Pour un fonctionnement en propulsion, le travail est négatif (Figure 3).

B. Puissance et Rendement d'extraction

La puissance maximale disponible est :

$$P_a = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 d \quad (9)$$

Où : d est le déplacement vertical maximal de l'aile.

La puissance totale instantanée extraite par l'aile battante est une combinaison de la puissance totale instantanée due au pilonnement $P_y(t)$ et de la puissance totale instantanée due au tangage $P_{\theta}(t)$:

$$P_y(t) = F_y(t) \frac{dh(t)}{dt} \quad (10)$$

$$P_{\theta}(t) = M_z(t) \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (11)$$

$F_y(t)$ est la composante verticale de la force

aérodynamique $F_y(t) = \frac{1}{2} S \rho U_{\infty}^2 C_l(t)$. M_z est le couple résultant

par rapport au point de tangage $M_z = \frac{1}{2} \rho S^2 U_{\infty}^2 C_M(t)$

Le coefficient de puissance instantané est le rapport de la somme des puissances de pilonnement et de tangage sur la puissance d'entrée :

$$C_{op}(t) = \frac{P_y(t) + P_{\theta}(t)}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 c} = \frac{P(t)}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 c} \quad (12)$$

Il est plus judicieux de calculer la puissance moyenne extraite sur un cycle de battement :

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \left(\int_0^T F_y(t) \frac{dh(t)}{dt} dt + \int_0^T M_z(t) \frac{d\theta(t)}{dt} dt \right) \quad (13)$$

Où : $T = \frac{1}{f}$ est la période de battement.

L'efficacité d'extraction est alors le rapport entre cette puissance moyenne sur le cycle et la puissance dans la fenêtre d'écoulement :

$$\eta = \frac{\bar{P}}{P_a} = \frac{\bar{P}_y + \bar{P}_{\theta}}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 d} = \overline{C_{op}} \frac{c}{d} \quad (14)$$

III. APPROCHE NUMERIQUE

A. Géométrie et maillage

La position relative du profil d'aile NACA0012 dans le domaine fluide a été choisie en se basant sur le travail de T. Kinsey et al. [5]. Comme le montre Figure 4, l'entrée du domaine est localisée à $11.5c$ (c étant la corde du profil) en amont du bord d'attaque du profil et la sortie se trouve à $20c$ en aval du bord de fuite. Les frontières supérieure et inférieure se trouvent à $9c$ de part et d'autre du profil. Le maillage construit est du type structuré quadrilatéral. Celui-ci capture la couche limite et les gradients physiques qui s'y trouvent avec



plus de précision qu'un maillage triangulaire. Le domaine de calcul est divisé en quatre zones (Figure 4). La Zone 1 contient le profil, elle est maillée avec un maillage structuré dense. Ceci permet de garder le même maillage pendant toute la simulation dans la région proche du profil. Cette zone est mobile, elle assure le mouvement de tangage et de pilonnement du profil. La zone 3, possède un maillage quadrilatéral structuré et est divisée en deux parties se trouvant de part et d'autre de la zone 2. Loin du profil d'aile (la zone 4) le maillage est moins dense. La connexion entre les différentes zones est assurée par des interfaces non-conformes.

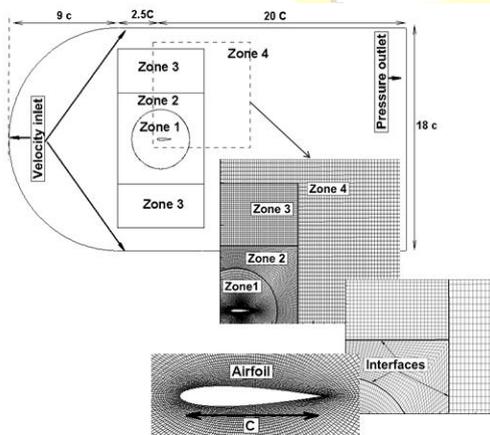


FIG. 4 : Domaine de calcul et maillage adopté.

B. Modèles, algorithmes et schémas

Toutes les simulations sont effectuées pour un profil placé dans un écoulement sous un nombre de Reynolds $Re=10^4$. Le nombre de Reynolds étant faible, l'écoulement est considéré comme étant laminaire. L'algorithme SIMPLEC est retenu pour résoudre les équations couplées Pression-Vitesse. Pour la discrétisation spatiale on a utilisé le schéma convectif MUSCL de 3^{ème} ordre et pour la discrétisation temporelle, un schéma de premier ordre est appliqué. Les équations sont résolues avec maillage mobile à l'aide de la méthode dynamic layering. Cette technique nécessite l'introduction d'une fonction définie par l'utilisateur (UDF, User Defined Function). Les coefficients aérodynamiques de l'aile en fonction des paramètres de contrôle choisis sont également calculés à l'aide d'une UDF.

C. Validation

Pour la validation de nos calculs, des simulations numériques ont été effectuées pour un cas similaire à celui de l'étude expérimentale réalisée par Anderson et al [7]. Les paramètres de contrôle suivants sont appliqués : $h_0 = 0.75$, $\alpha_0 = 20^\circ$, $\phi = 90^\circ$. La fréquence de battement est variable de sorte que

le nombre de Strouhal $St = 2cfh/U_\infty$ varie dans la plage [0.1, 0.5]. Les valeurs moyennes du coefficient de poussée \bar{C}_i , de puissance \bar{C}_p et du rendement propulsif η obtenues sont comparées aux résultats expérimentaux donnés par [7] et à ceux obtenus numériquement par [8]. La figure 5 montre que les résultats de nos simulations évoluent avec la même allure que ceux des 2 références : les coefficients de poussée \bar{C}_i et de puissance \bar{C}_p augmentent avec le nombre de Strouhal alors que le rendement propulsif η augmente jusqu'à $St = 0.2$ à 0.25 puis diminue. Cependant, les valeurs obtenues sont plus faibles que celles d'Anderson et al [7]. Par contre, une bonne concordance est constatée avec les résultats numériques de Xiao et al [8].

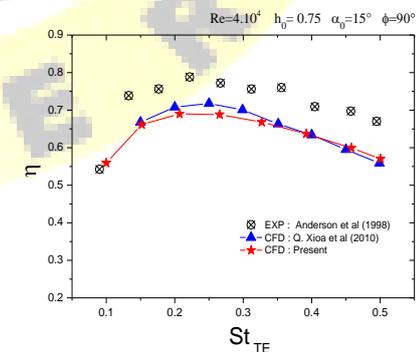
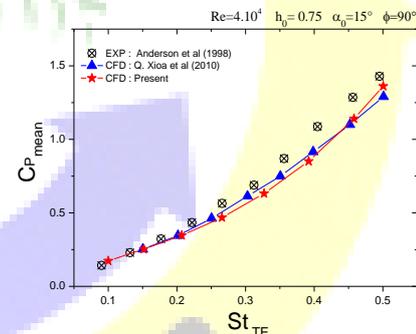
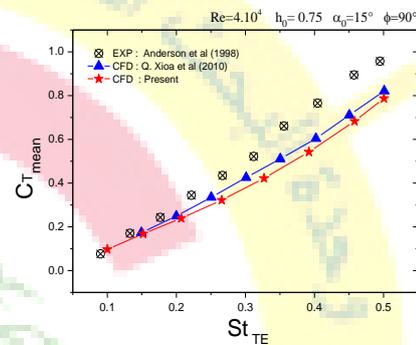
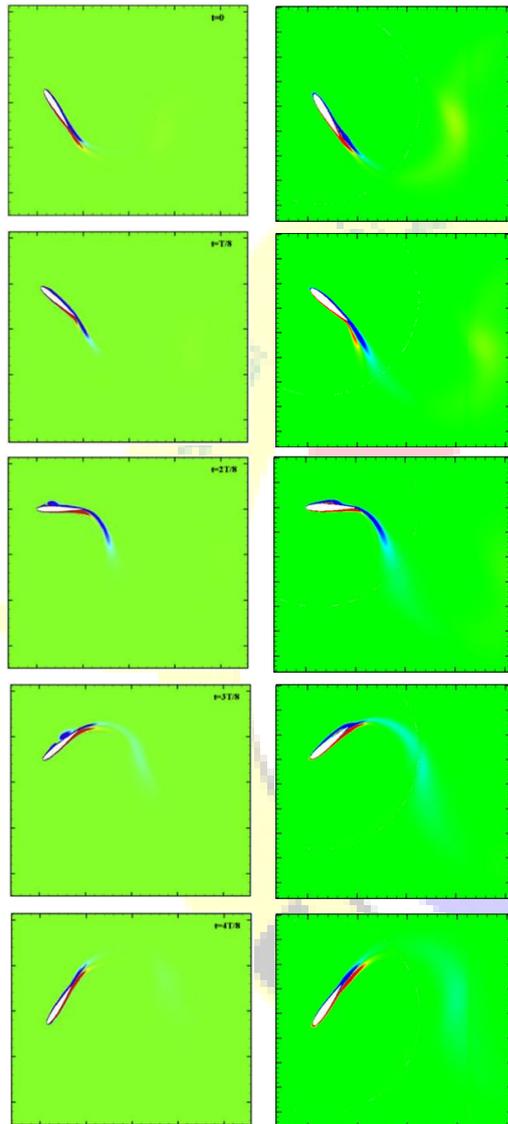


FIG. 5 : Comparaison des présents résultats avec ce issus de la littérature [7],[8].



Dans la figure 6, les champs de vorticité obtenus à $h_0 = 1$, $\alpha_{eff} = 10^\circ$, $\phi = 90^\circ$ et $St = 0.35$ sont comparés à ceux à ceux donnés par Xiao et al.[9]. La comparaison est effectuée à différents instants dans une période. De cette Figure 6, on constate la bonne concordance entre nos champs de vorticité et ceux de Xiao et al [9].



A

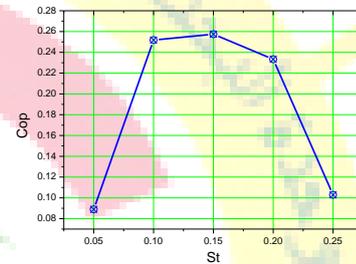
B

FIG. 6 : Comparaison des champs de vorticité. (A) Xiao *et al*[9], (B). la présente étude.

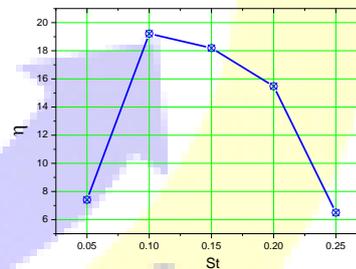
IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Effet du nombre de Strouhal

Les coefficients moyens de puissance extraite et les efficacités d'extraction sont présentés dans les figures 7-a et 7-b pour une trajectoire sinusoïdale avec $h_0/c = 0.5$, $\alpha_0 = 20^\circ$ et $\phi = 90^\circ$. La fréquence de battement f est variable et correspond à un nombre de Strouhal $St = 2fh_0/U_\infty$ variant dans la plage [0.05, 0.25]. En fonction de St , les deux paramètres \overline{COP} et η augmentent jusqu'à leur valeurs seuils ($\overline{COP}_{max} = 0.257$ et $\eta_{max} = 19\%$) puis ils diminuent. Cela montre que la fréquence de battement a une grande influence sur les performances d'extraction de l'énergie.



(a) Coefficient de puissance



(b) Efficacité d'extraction.

FIG. 7 : Performances d'extraction en fonction de St.

B. Effets de la nature du mouvement

Pour un nombre de Strouhal fixe ($St=0.15$) on a évalué l'effet de la trajectoire sur les performances d'extraction. Deux cas ont été étudiés :

Cas 1 : Pilonnement non-sinusoïdal combiné à un tangage sinusoïdal ;

Cas 2 : Tangage non-sinusoïdal combiné à un pilonnement sinusoïdal.



Les résultats obtenus (Figure 8 et 9) indiquent que la nature de la trajectoire de mouvement a un effet notable sur les performances d'extraction de l'énergie. Pour les deux cas considérés, le coefficient \overline{COP} est négatif, il augmente linéairement et il s'annule à $St=0.3$ pour le cas 1 et à $St=0.4$ pour le cas 2. Par la suite le coefficient \overline{COP} se stabilise au voisinage de 0.25 pour le cas 1 et aux alentours de 0.33 pour le cas 2.

Bien que la trajectoire non-sinusoidale du cas 2, (pilonnement sinusoidal combiné à un tangage non-sinusoidal) avec un $S_{\theta}=1.7$ (Figure 10), ne s'écarte que très légèrement d'une trajectoire sinusoidale, elle donne une amélioration des performances d'extraction de l'énergie de 25%.

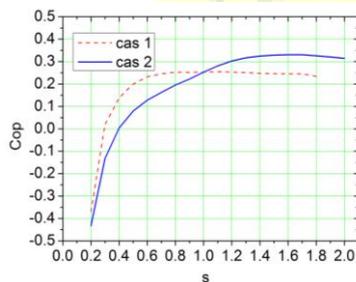


FIG. 8 : Effet de la trajectoire de battement sur le coefficient de puissance.

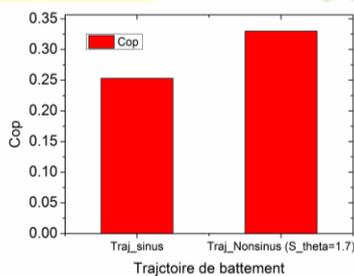


FIG.9 : Comparaison du Cop pour une trajectoire sinusoidale et non sinusoidale.

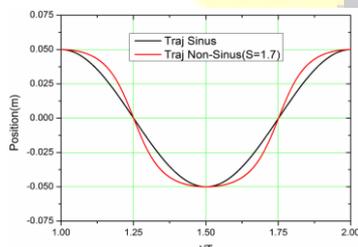
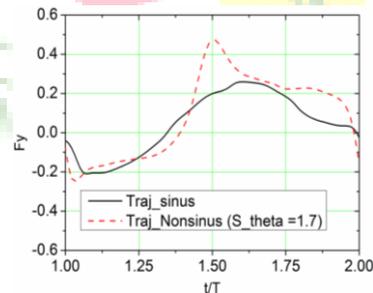


FIG.10 : Trajectoire de battement.

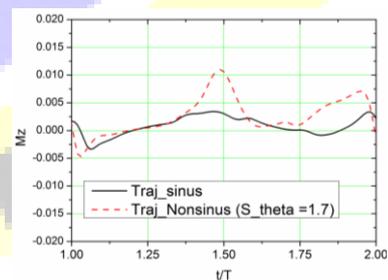
Pour mieux comprendre comment la trajectoire du mouvement affecte les performances d'extraction d'énergie, nous avons visualisé l'évolution de la structure de l'écoulement et du coefficient de pression kp sur une période d'oscillation (Figure 11).

Le suivi des structures tourbillonnaires développées autour du profil d'aile montre que le processus de formation de ces structures est le même pour les deux cas traités. Néanmoins, les tourbillons formés sur le bord d'attaque sont plus intenses dans le cas 2. Ceci est confirmé par la comparaison des coefficients de pression (Figure 11-c) qui montre que la différence de pression entre l'intrados et l'extrados est plus importante dans le cas 2.

La Figure 12 représente les variations temporelles de la force de portance et du moment de tangage (F_y) et (M_z) respectivement. On constate, aisément, que F_y et M_z sont plus importants dans le cas 2. Les courbes de variation temporelles des forces correspondant au cas 2 présentent des pics à $t = T/2$ et à $t = T$. A ces deux instants de la période, l'angle d'incidence cinématique est à sa valeur maximale.



(a)



(b)

FIG.12 : Comparaison des forces et moments aérodynamiques. (a) Forces de portance et (b) moment de tangage.

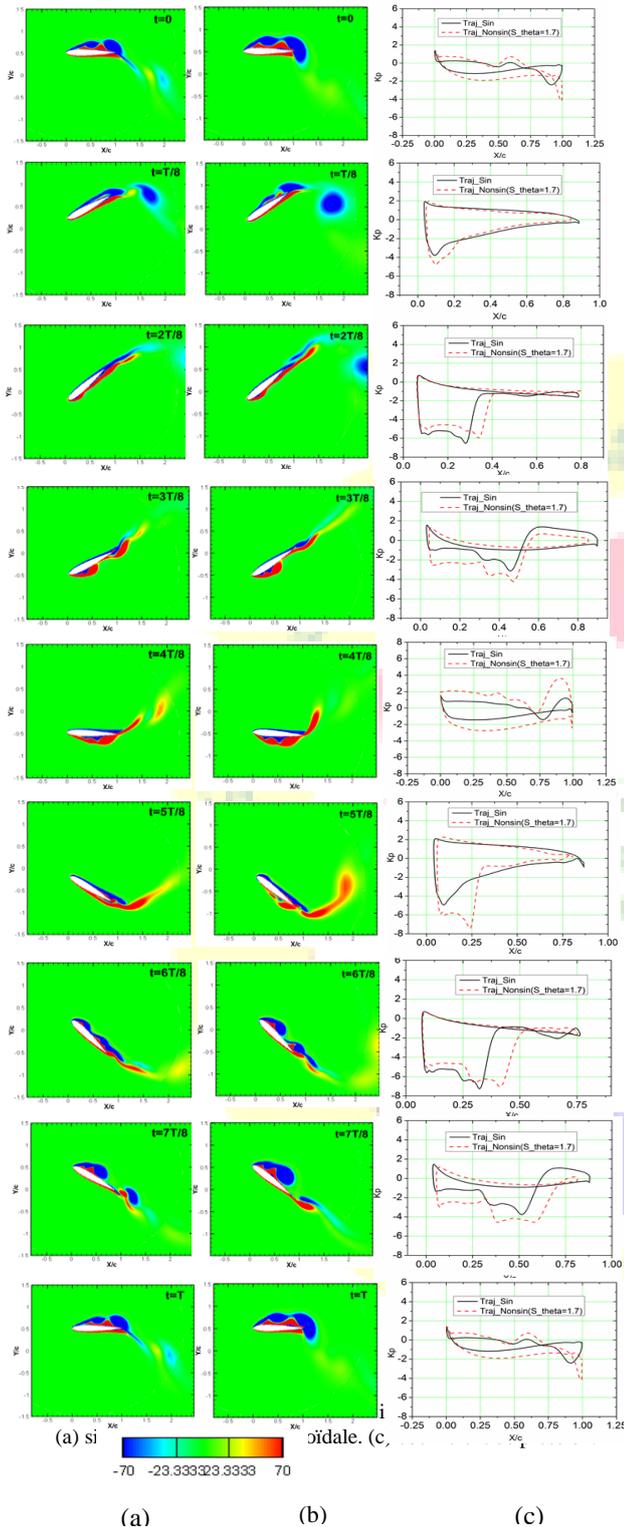


FIG.11 : Champs de vorticité pour différentes trajectoires :
(a) sinusoidale, (b) non-sinusoidale. (c) coefficient de pression.

V. CONCLUSION

Dans cette étude, des simulations numériques ont été effectuées pour évaluer l'effet de la trajectoire du mouvement sur les performances d'extraction de l'énergie par une aile oscillante. Les équations ont été résolues pour un profil NACA0012 placé dans un écoulement 2D incompressible, laminaire et instationnaire le nombre de Reynolds étant $Re=10^4$. Deux types de mouvement ont été considérés : un mouvement de pilonnement non-sinusoidal combiné à un tangage sinusoidal et un mouvement de tangage non-sinusoidal combiné à un pilonnement sinusoidal.

A la lumière des résultats obtenus, il s'avère que la trajectoire affecte le processus d'extraction d'énergie. Pour les mêmes paramètres cinématiques de l'aile oscillante, l'utilisation d'une trajectoire de mouvement non sinusoidale pour le tangage permet d'améliorer de 25% les performances d'extraction de l'énergie.

REFERENCES

- [1] W. McKinney and J. DeLaurier, "Wingmill: An Oscillating-Wing Windmill," *J. Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 109–115, 1981.
- [2] K. Jones, M. Platzer, K. Jones, and M. Platzer, "Numerical computation of flapping-wing propulsion and power extraction," in *35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [3] M. A. Ashraf, J. Young, J. C. S. Lai, and M. F. Platzer, "Numerical Analysis of an Oscillating-Wing Wind and Hydropower Generator," *AIAA J.*, vol. 49, no. 7, pp. 1374–1386, Jul. 2011.
- [4] I. H. Tuncer and M. F. Platzer, "Computational Study of Flapping Airfoil Aerodynamics," *J. Aircr.*, vol. 37, no. 3, pp. 514–520, 2000.
- [5] T. Kinsey and G. Dumas, "Parametric Study of an Oscillating Airfoil in a Power-Extraction Regime," *AIAA J.*, vol. 46, no. 6, pp. 1318–1330, Jun. 2008.
- [6] T. Kinsey, "Optimal Tandem Configuration for Oscillating-Foils Hydrokinetic Turbine," *J. Fluids Eng.*, vol. 134, no. 3, p. 31103, Mar. 2012.
- [7] J. M. Anderson, K. Streitlien, D. S. Barrett, and M. S. Triantafyllou, "Oscillating foils of high propulsive efficiency," *J. Fluid Mech.*, vol. 360, pp. 41–72, avril 1998.
- [8] Q. Xiao and W. Liao, "Numerical investigation of angle of attack profile on propulsion performance of an oscillating foil," *Comput. Fluids*, vol. 39, no. 8, pp. 1366–1380, Sep. 2010.
- [9] Q. Xiao, W. Liao, S. Yang, and Y. Peng, "How motion trajectory affects energy extraction performance of a biomimic energy generator with an oscillating foil?" *Renew. Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 61–75, Jan. 2012.