

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche scientifique



Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologies

Département des Sciences et Technologie

N° d'ordre :
N° de série :

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielles

Par : Sofiane MORSLI.

Thème :

**ETUDE D'UN SYSTEME DE RECUPERATION
D'ENERGIE PAR DES AILES BATTANTE**

Soutenu publiquement le : 12 /09/2018.

Devant le jury :

Mr. AKRMI Faouzi	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	Président
Dr. LALMI Djemoui	Maître de recherche B	URAE. Ghardaïa	Examineur
Dr.Mohammed Taher BOUZAHER	Maître de recherche B	URAE. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire : 2017/2018

Dédicaces

Je dédie ce travail, comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance à :

Ma chère mère, pour son affectation, sa patience, et ses prières,

A ma très chère famille,

A toutes les personnes chères à mon cœur, pour leur aide, leur temps, leur encouragement, leur assistance et soutien,

A la promotion Master Maintenance industrielle 2017-2018,

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci infiniment.

Sofiane MORSLI

Remerciement

Premièrement nous remercions le dieu notre créateur.

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à mon encadreur **Mr Dr.Mohammed Taher BOUZAFER** D'avoir accepté de diriger ce travail d'avoir mis ma disposition tous les moyens qui m'ont permis de mener à Complément cette étude et aussi pour ses précieux conseils et ses encouragements.*

Table de matières:

<i>INTRODUCTION GENERALE</i> :	1
Chapitre I: Etude bibliographique	
I.1. Introduction :	4
I.2. Principaux paramètres cinématiques d'une aile battante :	4
I.3. Extraction d'énergie par une aile battante :	5
I.4. Quelques Systèmes de type commercial :	7
I.5. Le phénomène du bulbe de décollement laminaire sur une aile battante :	8
I.6. Phénomène de décollement turbulent :	9
I.7. Notions générales sur le contrôle des écoulements :	11
I.8. Les enjeux du contrôle des écoulements :	12
I.9. Les relations entre les différents objectifs du contrôle :	12
I.10. Problématique du contrôle-actif :	14
I.10.1. Contrôle par paroi-mobile :	14
I.10.2. Contrôle par soufflage et aspiration :	15
I.10.3. Contrôle thermique :	15
I.10.4. Contrôle électromagnétique :	16
I.10.5. Autres types de contrôle :	16
I.11. Problématique du contrôle-passif :	16
I.11.1. Différents types d'actionneurs-passifs :	16
I.11.2. Générateurs de tourbillons-passifs :	17
I.11.3. Ajout d'éléments solides :	17
I.12 Conclusion :	18

Chapitre II: Modélisation Numérique

II.1. Introduction :	19
II.2. Cinématiques et extraction d'énergie :	21
II.3. Coefficients aérodynamiques :	23
II.4. Description du modèle proposé :	25
II.5. Domaine de calcul et conditions aux limites :	26
II.6. Présentation des logiciels de calcul :	27
II.7. Les étapes de création de la géométrie par le GAMBIT :	28
II.8. Techniques de maillage dynamique :	30
II.9. Étude de la sensibilité de la solution par rapport au maillage :	32
II.10. Les étapes à suivre sur le solveur FLUENT :	33
II.11. Estimation du pas de temps :	38
II.12. Conclusion :	39

Chapitre III: Résultats et discussion

III.1. Introduction.....	40
III.2. Simulation d'écoulement autour une turbine à pales simple :	41
III.2.1. Validation du modèle :	44
III.2.2. Mécanisme d'amélioration de la performance de la turbine :	45
III.3. Étude paramétrique :	49
III.3.1. Effet de la longueur du volet :	49
III.3.2. Effet de la position.....	52
III.3.3. Effet de fréquence réduit :	56
III.4. Conclusion :	58
CONCLUSION GENERALE :	59

Liste des figures :

Chapitre I : Etude bibliographique

Figure.I.1 : Paramètres cinématiques d'une aile battante.....	4
Figure.I.2 : Mouvement caractéristique d'une aile battante Kinsey & Dumas	5
Figure.I.3 : Trajectoire d'une aile en mode d'extraction d'énergie ($\chi > 1$),tiré de Kinsey & Dumas..	6
Figure I.4 : Éolienne "Wingmill" tiré de.....	7
Figure. I.5 : Structure du bulbe de décollement laminaire.....	9
Figure. I.6 : Décollement turbulent de la couche limite.....	10
Figure. I.7 : Les deux types de décollement.....	11
Figure. I.8 : Relations entre les différents objectifs du contrôle Gad-El-Hak 2003Tirée de.....	13
Figure. I.9 : différents arrangements pour contrôler la couche limite(a)aile avec slot (b) succion (c) décharge du fluide	13
Figure. I.10 : Contrôle par paroi mobile.....	14

Chapitre II : Modélisation Numérique

Figure.II.1 : Présentation des forces de traîner et de portance (CD, CL).....	24
Figure II.2 : Extracteur d'énergie classique.....	25
Figure II.3 : Extracteur d'énergie avec un volet oscillant.....	25
Figure.II.4 : Mouvement du volet-aile pour $\phi_{flap} = 0^\circ \theta_1 = 8^\circ$	26
Figure II.5 : Domaine de calcule et conditions aux limites.....	27
Figure.II.6 : Schémas des étapes à suivre pour la simulation.....	28
Figure.II.7 : Détails de maillage dynamique.....	29
Figure. II.8 : Zones créées par une intersection d'interface non périodique.....	30
Figure II.9 : Interface 2D.....	31
Figure.II.10 : Illustration de layering technique.....	31
Figure.II.11 : Discrétisation (a) sur le profil (b) sur le cercle.....	32

Chapitre III : Résultats et discussion

Figure. III.1 : Lignes de courant pour différentes positions.....	42
Figure. III.2 : (a) Indépendance du réseau et (b) test du pas du temps relatif à Kinsey et Dumas pour un profil NACA0015.....	45
Figure .III.3 : Comparaison des coefficients de puissance instantanés. C_p et $C_{p\theta}$ pour la présente simulation et Kinsey et Dumas [3] pour un profil aérodynamique NACA0015.....	45
Figure.III.4 : Évolution instationnaire.....	46
Figure.III.5 : Structure vorticitaire.....	47
Figure.III.6 : Contours de pression pour une période de battement a $f^* = 0.14$ et $\theta_0 = 76.33^\circ$...	48
Figure.III.7 : Évolution de (a) coefficient de portance (C_l), (b) coefficient de traînée(C_D) (c) coefficient de couple (C_m).....	50
Figure.III.8 : Évolution des coefficients d'extraction d'énergie (a) (C_{Ph}); (b) $C_{P\theta}$ (c) C_P	51
Figure .III.9 : Structure vorticitaire et la pression correspond à $t/T=0.25f^*= 0.14$ and $\theta_0 = 76.33^\circ$	52
Figure.III.10 : Différentes configurations proposées.....	52
Figure.III.11 : Évolution instationnaire de (a) (C_l), (b) (C_D); (c) (C_m).....	53
Figure.III.12 : Évolution des coefficients d'extraction d'énergie (a) (C_{Ph}); (b) $C_{P\theta}$ (c) C_P	54
Figure.III.13 : Structure vorticitaire pour différent configuration a $f^* = 0.14$ and $\theta_0 = 76.33^\circ$	55
Figure .III.14 : Évolution des coefficients d'extraction d'énergie moyenne (a) (C_{Ph}); (b) $C_{P\theta}$ (c) C_P	56

Liste des tableaux :

Chapitre I : Etude bibliographique

Tableau I.1 : Quelques types commerciaux des ailes batantes.....7

Chapitre II : Modélisation Numérique

Tableau II.1 : Première discrétisation des segments du domaine de calcul.....32

Tableau II.2 : deuxième discrétisation des segments du domaine de calcul.....33

Tableau II.3 : troisième discrétisation des segments du domaine de calcul.....33

Nomenclatures :

1- Symboles :

h_0 : amplitude adimensionnelle maximale (L'amplitude de pilonnement).

h : L'amplitude adimensionnelle.

f : fréquence.

θ : L'angle de tangage.

θ_0 : L'amplitude de tangage.

Φ : L'avance de phase du mouvement de tangage.

$\alpha(t)$: Angle d'attaque instantané que fait la corde du profil par rapport à la direction de l'écoulement relatif.

Xp : Position du point de rotation par rapport au bord d'attaque.

St : Nombre de Strouhal.

k : fréquence réduite.

Re : Nombre de Reynolds.

$\omega(t)$: Vitesse angulaire.

$V_y(t)$: la vitesse en pilonnement.

χ : Paramètre de mise en incidence.

U, V, W : vecteurs de vitesse.

f^* : fréquence non dimensionnelle.

P_θ : La puissance extraite par le mouvement de tangage.

P_h : la puissance extraite par le mouvement de pilonnement.

C_m : Coefficient de moment.

d : représente la surface totale par courbe de la pale.

C_L : Coefficient de portance.

C_D : Coefficient de traînée.

F_L : Force de portance.

F_D : Force de traînée.

c : La longueur d'aile.

2- Abréviations :

CFL : Condition Frédérique Luis.

CFD : Control Fluid Dynamic.

DNS : Direct Numerical Simulation.

RANS : Reynolds Averaged Navier Stokes.

LES : Large Eddy Simulation.

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Dans les dernières années, la demande d'énergie dans le monde augmente d'une façon dramatique, ce qui épuise les sources d'énergie fossiles disponibles. Ce déséquilibre a encouragé de nombreux pays à chercher des sources d'énergie alternatives. Dans ce cadre, les énergies renouvelables sont les sources les plus investiguées pour couvrir continuellement les demandes croissantes en ressources naturelles. Ils ont également considéré comme des sources respectueuses de l'environnement par rapport aux sources d'énergie fossiles.

De nombreux pays visent à faire les énergies renouvelables la source de la plus grande partie de leurs besoins énergétiques. Plusieurs incitations sont imposées pour forcer le monde vers les énergies renouvelables propres.

La loi sur le climat et l'énergie du Parlement européen est en vigueur depuis juin 2009. Cette loi implique, d'une part, d'ici l'année 2020, au moins 20% de la consommation d'énergie de l'Union européenne devrait être fournie par des ressources renouvelables. De l'autre part, le ratio des émissions des gaz à effet de serre devrait être réduit d'au moins 20% par rapport aux niveaux de 1990 [1].

Les dirigeants de l'Union européenne proposent un tableau pour réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre, qui consistent à obliger les pays consommateurs à respecter un ratio de réduction proportionnel à leur ratio d'émissions de gaz. Afin de respecter ces normes environnementales, la recherche sur les techniques d'énergie renouvelable doit être suivie. En règle générale, la réserve de ressources diminue proportionnellement à la demande d'énergie, beaucoup de recherches ont été consacrées pour trouver des alternatives énergétiques pratiques. L'énergie éolienne est apparue comme la source d'énergie la plus utilisée, tandis qu'autres sources sont moins étudiées.

Actuellement, le contrôle des écoulements est l'un des principaux défis de l'aérodynamique. En effet, que ce soit pour les applications automobiles ou aérospatiales, l'objectif est de développer des applications techniques qui répondent à nombreuses contraintes économiques et technologiques.

Dans ce contexte, la question est l'aptitude à manipuler un écoulement pour éliminer ou minimiser les effets négatifs tels que la traînée et le bruit et d'améliorer les effets positifs tels que la portance. Pendant plus d'un siècle, le phénomène de décrochage dynamique a été intensément

étudié ; en fait, il est responsable des vibrations structurelles et du bruit acoustique qui sont des facteurs infects pour de nombreuses applications industrielles. Ce décrochage provoqué par un gradient de pression défavorable, ou par une rupture géométrique de la surface, accompagnée d'une détérioration énorme de la performance aérodynamique. Pour améliorer la performance d'un tel système et approcher de la condition optimale de fonctionnement, il est important de prédire correctement les mécanismes qui accompagnent ce décrochage, tel que la transition du flux et l'agitation turbulente, pour choisir la stratégie de contrôle appropriait.

Différentes méthodes sont disponibles pour contrôler la séparation d'écoulement, et elles peuvent être classées en deux catégories, à savoir : des méthodes passives consistant à effectuer une légère modification dans la géométrie du système pour manipuler le champ d'écoulement sans utiliser une énergie externe et des méthodes actives qui consistent à introduire une quantité d'énergie de l'environnement extérieur (généralement sous forme de moment). Parmi les techniques de control actif qui mimique la manœuvrabilité des animaux sont les techniques bio inspirées.

Il n'existe aucune règle pour déterminer leur performance sur un système autre qu'une étude paramétrique étendue, En effet, l'efficacité de ces techniques dépend de nombreux paramètres : géométrie, fréquence, localisation...etc. Leur utilisation nécessite systématiquement une grande étude paramétrique qui ne garantit cependant pas que le fonctionnement optimal soit atteint.

Au cours les dernières décennies, la croissance des capacités de calcul a permis le développement d'une nouvelle branche de l'aérodynamique appelée la dynamique des fluides computationnels (CFD). Ces outils sont utilisés pour développer et tester de nouvelles technologies tout en évitant les contraintes de temps et de financement qui sont nécessaires dans les tests expérimentaux.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Le mémoire est débuté par une revue bibliographique sur l'extraction d'énergie par des ailes battantes. Il analyse également en détail la conception de l'éolienne à ailes battantes avec son principe de fonctionnement et les paramètres associés. Ensuite, il a noté les diverses techniques de contrôle de séparation d'écoulement.

Le deuxième chapitre est consacré à exposer les notions de modélisation de la turbulence et les approches numériques pour résoudre les équations de Navier-Stokes. Une description

générale des méthodes CFD a été fournie. Ensuite, une discussion sur le mouvement des ailes battantes et ses paramètres de contrôle a été effectuée.

Le troisième chapitre traite tout d'abord l'écoulement autour une turbine à ailes battantes pour comprendre les phénomènes qui se produisent pendant le mouvement. Ce cas est utilisé comme référence de comparaison pour les différents résultats obtenus dans cette étude. Il offre les résultats obtenus, accompagnés d'un traitement et les commentaires nécessaires à leurs interprétations.

Ce mémoire est terminé avec une conclusion générale et des perspectives recommandées comme une extension pour le présent travail.

CHAPITRE I :
ÉTUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction :

Ce chapitre propose dans une première section une vision globale de la technique d'extraction d'énergie par des ailes battantes. Il analyse également en détail la conception de turbine à ailes battantes avec son principe de fonctionnement et les paramètres associés. Nous allons présenter une revue bibliographique sur les différents phénomènes physiques qui se produisent pendant le décrochage de la turbine. La deuxième section fournit un résumé sur les techniques de contrôle d'écoulement et ses classifications.

I.2. Principaux paramètres cinématiques d'une aile battante :

Considérons une aile battante (**Figure I.1**) de corde c , soumise à un mouvement de pilonnement $h(t)$, d'amplitude adimensionnelle maximale $h = h_0$ et de fréquence $f(s^{-1})$ à un mouvement de tangage, $\theta(t)$, d'amplitude $\theta_0(rad)$. Le mouvement de tangage est en avance de phase d'un angle $\varphi(rad)$ par rapport au mouvement de pilonnement. Comme le montre la **Figure I.1**, outre la forme du profil d'aile, les performances des ailes battantes sont affectées par plusieurs paramètres [2] .

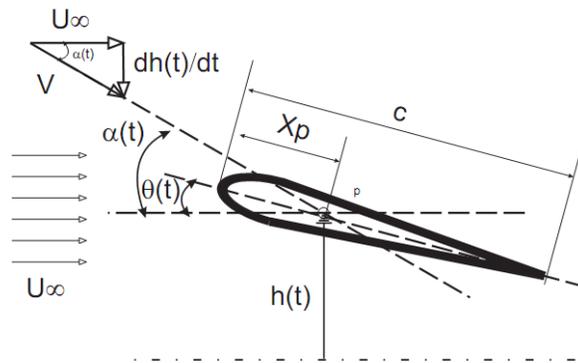


Figure.I.1 Paramètres cinématiques d'une aile battante.

- Amplitude adimensionnelle de pilonnement h_0 .
- Amplitude maximale de tangage θ_0 .
- Angle de déphasage φ entre les deux mouvements de pilonnement et de tangage.
- Angle d'attaque instantané $\alpha(t)$ que fait la corde du profil par rapport à la direction de l'écoulement relatif.
- Position du point de rotation Xp par rapport au bord d'attaque.

- Nombre de Strouhal : est un nombre sans dimension décrivant les mécanismes de circulation oscillante, physiquement, il représente le rapport du temps d'advection et du temps caractéristique de l'instationarité [22].
 $St = fA/U$, tel que A représente la largeur caractéristique du sillage.
- Fréquence réduite $k = 2\pi fc/U$ qui compare la vitesse transversale de l'aile par rapport à la vitesse de l'écoulement libre.
- Nombre de Reynolds $Re = Uc/\nu$, rapport des forces inertielles aux forces visqueuses.

I.3. Extraction d'énergie par une aile battante :

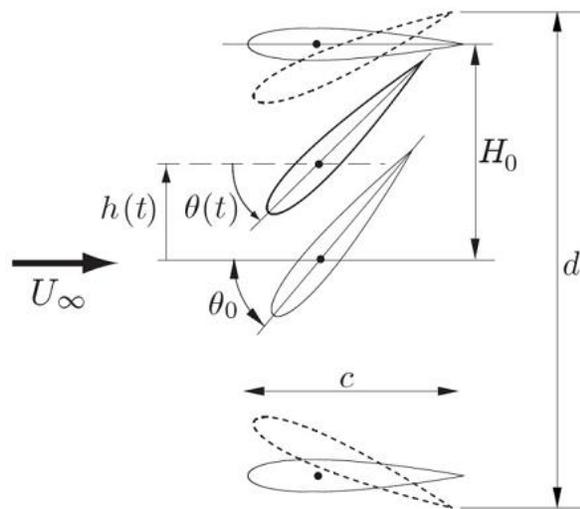


Figure.I.2.Mouvement caractéristique d'une aile battante Kinsey & Dumas [3]

Une aile battante (**Figure I.2**), est une aile soumise à un mouvement de pilonnement $h(t)$, d'amplitude adimensionnelle maximale $h = h_0$ et de fréquence $f(s^{-1})$ à un mouvement de tangage, $\theta(t)$, d'amplitude $\theta_0(rad)$. Le mouvement de tangage est en avance de phase d'un angle $\phi(rad)$ par rapport au mouvement de pilonnement. Les équations cinématiques s'expriment comme :

$$h(t) = h_0 \sin(2\pi ft) \quad (I.1)$$

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(2\pi ft + \phi) \quad (I.2)$$

où θ_0 et h_0 représentent respectivement les amplitudes de tangage et de pilonnement, $\omega(t) = 2\pi ft$ la vitesse angulaire en tangage et $V_y(t)$ la vitesse en pilonnement, un paramètre important, appelé paramètre de mise en incidence χ , est utilisé afin de définir le mode d'opération de l'aile battante. Si ($\chi > 1$), le mode est un mode d'extraction d'énergie. L'aile est en mode de propulsion l'orsque ($\chi < 1$) et le mode de glisse correspond a $\chi = 1$. Ce paramètre sert à étudier l'orientation angulaire du profil par rapport à l'angle de l'écoulement effectif:

$$\chi = \frac{\theta_0}{\tan^{-1}\left(\frac{h_0 \cdot 2\pi f}{U_\infty}\right)} \quad (I.3)$$

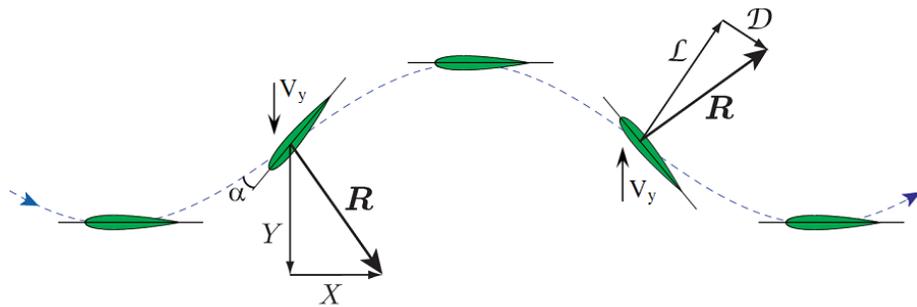


Figure.I.3. Trajectoire d'une aile en mode d'extraction d'énergie ($\chi > 1$), tiré de Kinsey & Dumas [3].

Le prototype de turbine à aile oscillante le plus âgé classé dans la littérature, surnommé « wingmill », a été développé dans un contexte expérimental à l'Université de Toronto par :

McKinney et DeLaurier en 1981 [4]. Ce système possède une degré de liberté. Le tangage est assuré via un câble bidirectionnel connecté a un levier fixé rigidement à l'aile. Pour le pilonnement, un mécanisme permettant de transmettre le mouvement vertical de l'aile en rotation à l'arbre de sortie a été utilisé .

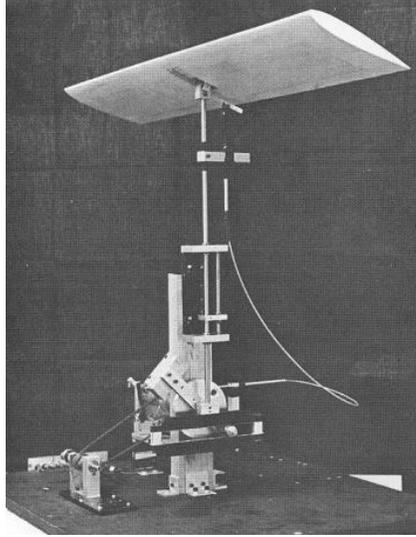


Figure I.4 Éolienne "Wingmill" tiré de [4].

I.4. Quelque Systèmes de type commercial :

	<ul style="list-style-type: none">• la compagnie Engineering Business Ltd a construire l' hydrolienne Stingray en 2002 [5]• Une seule aile et visait à soutirer 150 kW de l'écoulement d'eau.• L'aile utilisée possédait des dimensions imposantes, soit une corde de 3m, une envergure totale de 15,4 m, et pouvait effectuer un mouvement de pilonnement sur une hauteur totale de 12 m.
--	--

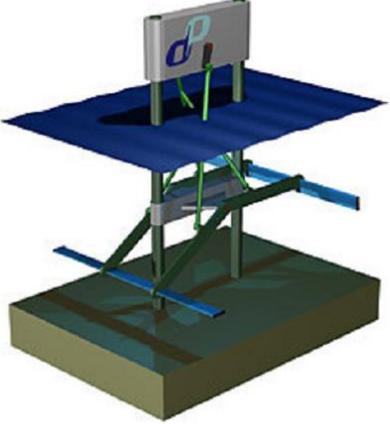
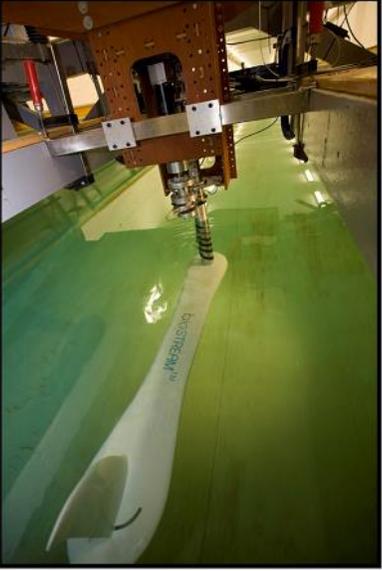
	<ul style="list-style-type: none"> • La compagnie Pulse Generation a développé une turbine de 100 kW à ailes oscillantes composée de deux ailes en tandem déphasées de 90 degrés. en 2007[6] • on note l'emploi de mécanismes à 4 barres pour le contrôle du pilonnement. • Aucun détail n'est cependant donné sur le contrôle du tangage. L
	<ul style="list-style-type: none"> • La compagnie australienne BioPower Systems a développé une turbine à aile oscillante en 2008[7] • Un projet pilote de 250 kW est en cours de développement (2009) à l'île Flinders en Tasmanie. • Le pilonnement est assuré par une membrure profilée en composite. D'un autre côté, le tangage est réalisé par un actuateur situé entre la bielle de pilonnement et l'aile.

Tableau I.1 : Quelques types commerciaux des ailes battantes

I.5. Le phénomène du bulbe de décollement laminaire sur une aile battante :

Le phénomène du bulbe de décollement laminaire peut se produire sur la surface d'une aile battante sous les effets d'un décollement laminaire de la couche limite, provoqué par la présence d'un gradient de pression inverse, ou par la transition de la couche limite décollée avec un rattachement turbulent en aval du point de transition.

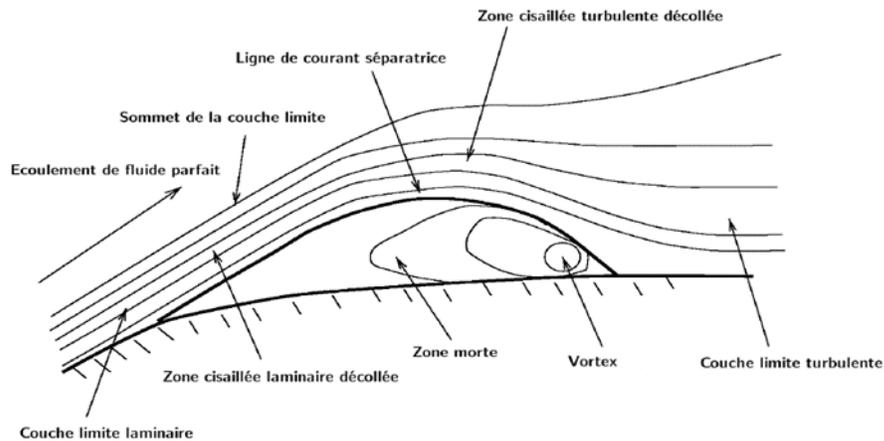


Figure. I.5: Structure du bulbe de décollement laminaire [8].

I.6. Phénomène de décollement turbulent :

Au niveau de la couche limite, les particules fluides sont freinées par le frottement visqueux sur la paroi, ou par la présence d'un gradient de pression défavorable (gradient positif), tendant à freiner les particules. D'un point de vue énergétique, l'énergie cinétique dans la région de gradient de pression favorable est dissipée par les frottements visqueux internes de la couche limite, il se peut qu'elle devienne insuffisante pour surmonter une trop forte surpression [8]. Le mouvement des particules de proche paroi est alors ralenti, voire éventuellement arrêté. Dans cette zone de fluide mort, les particules ont tendance à se décoller, car elles sont aspirées par la dépression située au-dessus de l'extrados et n'ont plus d'énergie cinétique suffisante pour rester au voisinage de la paroi.

Il est, alors, clair que les propriétés de mélanges de la turbulence ont tendance à ré-homogénéiser les différences énergétiques de la couche limite entre le fluide mort de proche paroi et le fluide énergétique plus loin de la paroi.

La vitesse de fluide est nulle, au point de décollement et au-delà, les particules se déplacent dans la direction opposée à l'écoulement, phénomène appelé écoulement de retour. Cette zone de recirculation au-dessus du profil, matérialisée par une inversion du profil de vitesse. En aval de la région décollée, la couche limite peut recoller à la paroi, ou rester décollée, et ainsi étendre la zone de décollement sur la totalité du profil.

Généralement, les décollements de la couche limite se produisent sur des fortes courbures de la paroi ou en présence d'un obstacle venant perturber le champ de pression environnant. Dans le contexte aéronautique, le décollement se produit lors des phases de vols où les incidences sont

plus fortes (décollage et atterrissage). Le contrôle du phénomène, lors de ces deux phases de vol, se révèle capital car elles constituent l'essentiel de la dépense d'énergie lors du vol d'un avion.

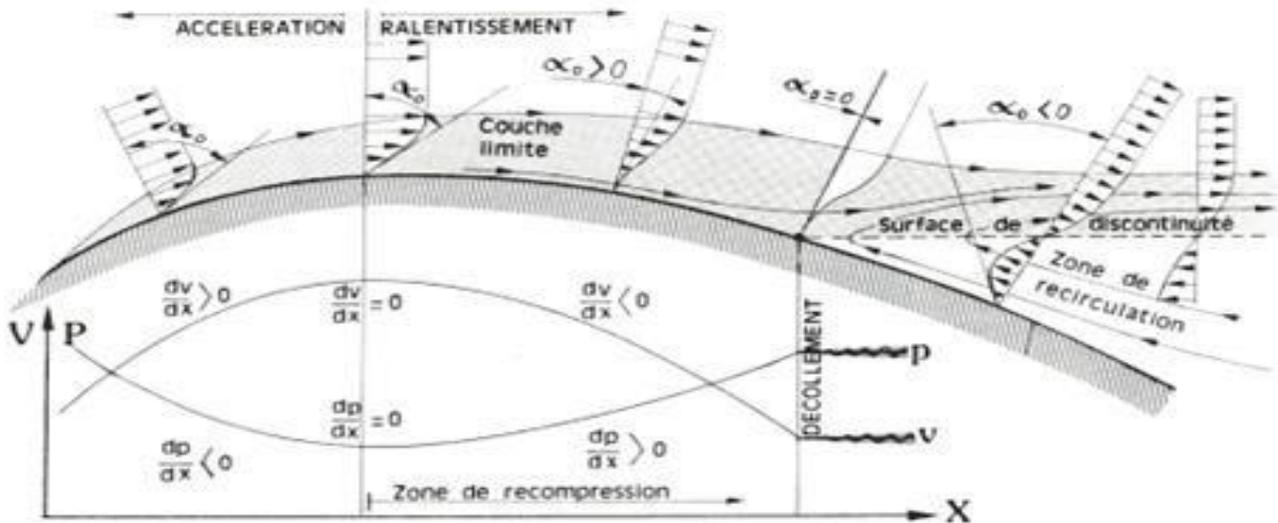
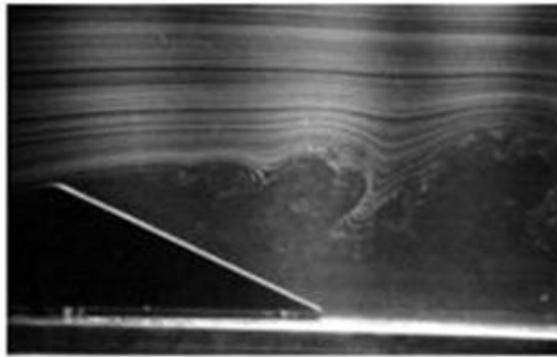


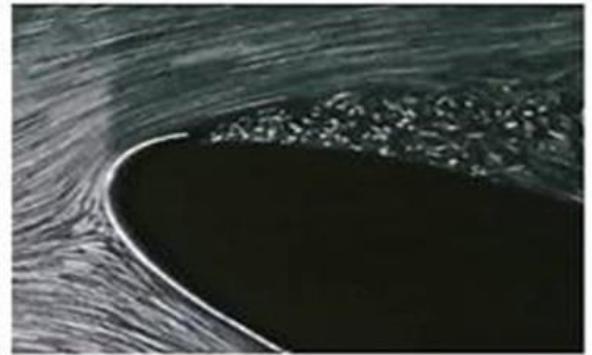
Figure. I.6: Décollement turbulent de la couche limite [9].

Deux types de décollement peuvent être distingués (Figure I.7) :

- Un décollement provoqué par gradient de pression (le cas d'un profil placé en incidence).
- Un décollement provoqué par une singularité géométrique (décollement inertiel).



a) Un décollement provoqué par une singularité géométrique



b) Un décollement provoqué par un gradient de pression

Figure. I.7: Les deux types de décollement [10].

Les phénomènes physiques pénalisants dus au décollement sont :

1. Grandes perturbations dans les distributions de pression.
2. Augmentation de la traînée de forme.
3. Apparition de décrochage et augmentation des efforts de traînée sur le profil.
4. Chute notable de la portance.
5. Augmentation des nuisances sonores.

I.7. Notions générales sur le contrôle des écoulements :

Le contrôle d'un écoulement désigne l'ensemble des opérations qui consistent à modifier les propriétés de l'écoulement pour l'amener à un état recherché cette action, en général appliquée au voisinage de la paroi, peut-être une adjonction de masse fluide, d'énergie ou de quantité de mouvement. Actuellement, il représente le thème de recherche le plus en vogue en mécanique des fluides. L'intérêt de réaliser des systèmes évoluant dans des écoulements contrôlés est multiple. La stratégie du contrôle est déterminée selon l'objectif visé. Le contrôle peut trouver son utilité pour réduire le frottement pariétal, retarder le ou la transition, accroître le mélange, les transferts de chaleur ou de masse, diminuer les nuisances sonores ou les vibrations.

I.8. Les enjeux du contrôle des écoulements :

Les enjeux du contrôle des écoulements en aéronautique concernent aussi bien le secteur civil que militaire. Dans le secteur civil, les enjeux sont essentiellement économiques. Une diminution de 10% de la traînée d'un avion civil entraîne une réduction de la consommation en carburant de 50 millions de litres durant le cycle de vie de l'appareil. McLean et al estiment qu'une simplification des becs mobiles et des volets couplés à l'utilisation de jets synthétiques permettrait une réduction du poids d'un Boeing 737-700 de 2.87% et une réduction des coûts de fonctionnement de 0.74% [11]. Gomes, Crowther et Wood ont estimé la puissance électrique nécessaire au contrôle sur un Airbus A321. Dans le cas d'un contrôle qui remplacerait les fentes du bord d'attaque par des jets synthétiques, la puissance électrique consommée au décollage serait de 200kW pour 1653 actionneurs par aile, ce qui représente 70% de la puissance électrique que peut fournir le générateur de puissance auxiliaire [11]. Dans le cas d'actionneurs placés sur les volets de bord de fuite afin d'améliorer leurs performances, la puissance électrique consommée serait de 70kW pour 213 actionneurs par aile, ce qui représente 30% de la puissance du générateur.

Ces chiffres montrent que pour l'état actuel des choses, la puissance électrique nécessaire à un contrôle par jets synthétiques est d'ores et déjà compatible avec une utilisation sur un avion de ligne. Les enjeux sont également environnementaux, les directives émises par la Commission Européenne concernant la pollution et les nuisances sonores autour des aéroports étant de plus en plus sévères. Une réduction de la traînée va de pair avec une réduction de la consommation et une diminution des émissions polluantes. Dans le domaine militaire, les enjeux sont davantage technologiques et axés sur les performances : on peut par exemple citer la réduction des distances d'atterrissage et de décollage mais la furtivité et la rapidité d'exécution en sont les principaux objectifs.

I.9. Les relations entre les différents objectifs du contrôle :

La **Figure I.8** schématise une représentation partielle de l'idée des interrelations et de leurs imbrications entre les différents objectifs de contrôle. L'écoulement autour d'une aile d'avion illustre de façon précise, cette idée d'interrelations des objectifs. En effet, quand la couche limite devient turbulente, elle résiste au décollement et donc la portance augmente de façon significative.

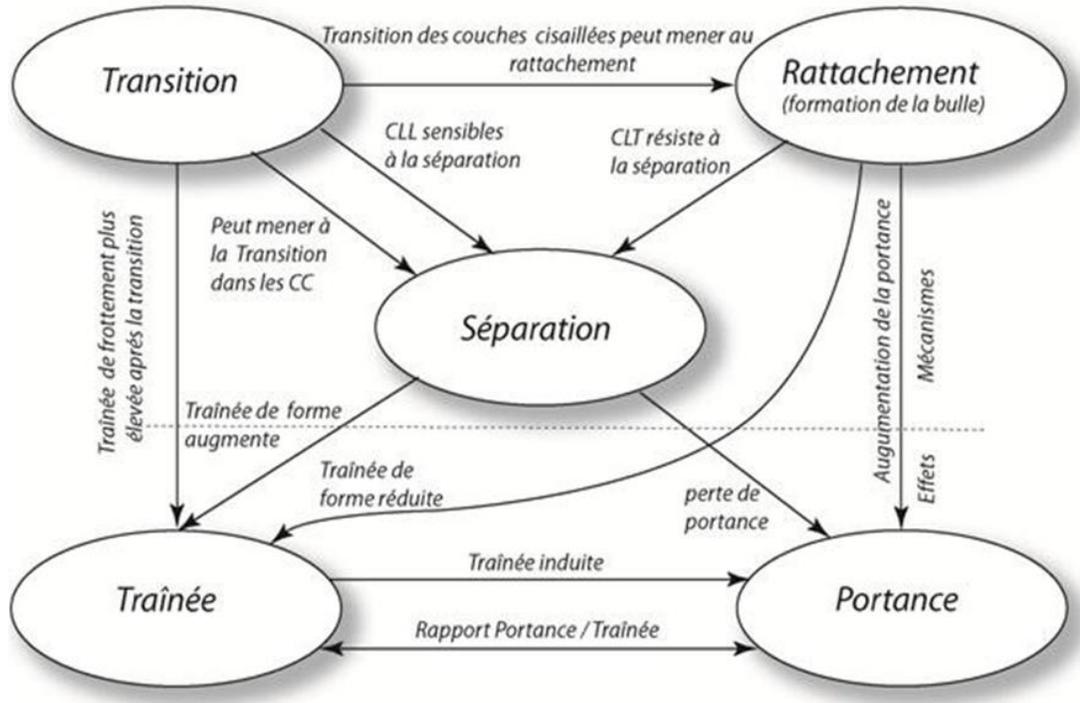


Figure. I.8: Relations entre les différents objectifs du contrôle Gad-El-Hak (2003)

Tirée de [12].

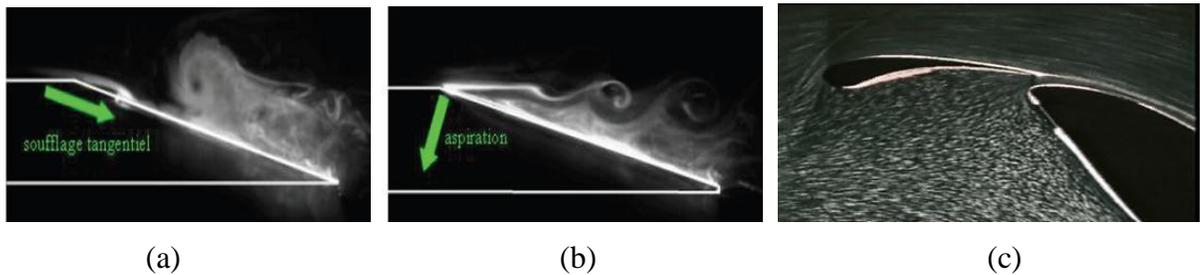


Figure. I.9: différents arrangements pour contrôler la couche limite(a)aile avec slot (b) succion (c) décharge du fluide [11].

I.10. Problématique du contrôle-actif :

Les techniques de contrôle actif consistent à introduire, à partir du milieu extérieur, une quantité d'énergie (sous la forme d'une quantité de mouvement) au sein de l'écoulement afin de modifier son évolution naturelle vers une évolution souhaitable. Cet effet permet en particulier de retarder le décollement de la couche limite. L'énergie à fournir du milieu extérieur vers l'écoulement peut avoir plusieurs sources, à savoir, électrique, mécanique, thermique...etc.

I.10.1. Contrôle par paroi-mobile :

Cette technique consiste à apporter, du milieu extérieur, une quantité de mouvement nécessaire à l'écoulement tout en assurant le mouvement de la paroi. Le fonctionnement de ce mécanisme de contrôle dépend essentiellement de la nature, de l'amplitude et de la localisation du contrôle du mouvement de la paroi. Une petite vibration permet de manipuler les instabilités développées au sein d'une couche limite et, ainsi, modifier la structure globale de celle-ci.

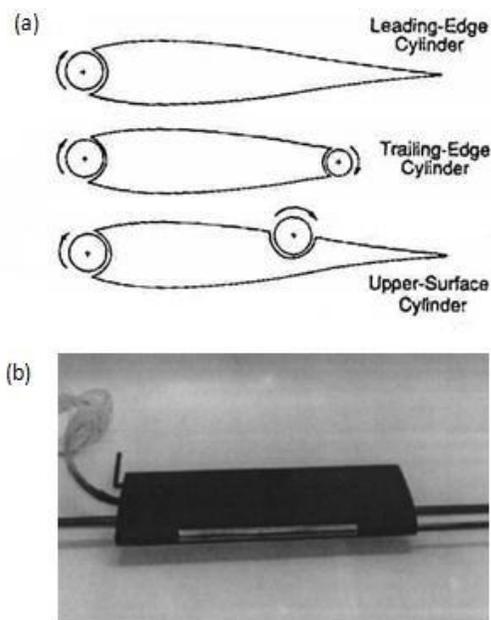


Figure. I.10: Contrôle par paroi mobile

- Cylindres tournants montés sur un profil d'aile [12].
- Cylindres montés sur une aile de profil NACA 0024 [13].

De nombreuses études se sont intéressées aux cylindres à parois mobiles suivant la génératrice du cylindre. Le décollement de la couche limite est retardé et a même pu être supprimé dans la région latérale du cylindre où le mouvement de la paroi se fait dans le même sens que l'écoulement incident. Sur l'autre côté du cylindre, la couche limite est décollée mais de façon moins importante que dans le cas non contrôlé. Modi et al [14] ont montré l'efficacité de cette technique pour réduire la traînée d'un profil d'aile et retarder le décollement autour d'un profil de camion. Les travaux d'Ericsson [15] ont mis en relief une augmentation de 200% de la portance et un recul de l'angle de décrochage en plaçant au niveau du bord de fuite et du bord d'attaque d'un profil, des cylindres rotatifs (**Figure I.10**). La mise en mouvement de la paroi produit un autre effet qui est la production d'une couche de glissement pariétal qui permet de rendre la couche limite plus résistante au gradient de pression défavorable et ainsi retarder le décollement.

I.10.2. Contrôle par soufflage et aspiration :

Souffler ou aspirer une couche limite peut provoquer une modification de l'écoulement. Le principe de soufflage est d'ajouter directement de la quantité de mouvement dans la couche limite pour retarder la séparation. Cela peut être aussi réalisé par un système de soufflage auxiliaire, comme par exemple un compresseur ou par pratiquer une fente au niveau de bord d'attaque.

L'aspiration de la couche limite permet d'éliminer la couche dans laquelle l'écoulement est déjà ralenti avant qu'il commence à se séparer de la surface. Cette action provoque une forte dérivation de la quantité de mouvement vers la paroi et permet de régénérer une nouvelle couche limite qui résiste mieux au gradient de pression adverse. Par conséquent, la séparation se trouve retardée [12].

I.10.3. Contrôle thermique :

Le décollement de la couche limite peut être manipulé par des actionneurs thermiques. Ces derniers excitent la zone proche de la paroi par une quantité de chaleur suffisante pour modifier la densité (cas d'un gaz) ou la viscosité (cas d'un liquide) du fluide, permettant ainsi la création d'une force appliquée sur le champ d'écoulement externe. Cet effet compense la couche limite en proche paroi par une quantité de mouvement suffisante pour la rendre plus résistante au décollement. Les travaux de Cassel [16] ont montré que ce type de contrôle a des effets souhaitables de point de vue performance aérodynamique. Néanmoins, son application n'est pas évidente vue l'importante

quantité d'énergie à fournir.

I.10.4. Contrôle électromagnétique :

Cette technique consiste à modifier la structure de la couche limite en y générant des forces volumiques ou surfaciques provenant des forces de Lorentz électromagnétiques dans le but d'augmenter le transfert d'énergie entre les différentes zones de l'écoulement. En effet, un fluide conducteur parcouru par un courant électrique est mis en mouvement par un champ magnétique et la dynamique d'un tel système est régie par les lois de la magnétohydrodynamique. Cette méthode de contrôle est appliquée généralement au phénomène de propulsion et pour production de l'électricité en exploitant le fait qu'un fluide conducteur en mouvement dans un champ magnétique génère un courant électrique [12].

I.10.5. Autres types de contrôle :

Plusieurs autres techniques et méthodes ont été testées de façon extensive pour un contrôle expérimental. On peut citer le contrôle acoustique qui nécessite l'utilisation des ondes sonores qui vont interagir avec la couche limite. Le contrôle par chauffage de films pariétaux, de façon à modifier localement la viscosité du fluide. Le contrôle par techniques de cavitation, sublimation, et de réaction chimique. Il est aussi possible d'injecter au niveau de la paroi un autre fluide qui a des propriétés visqueuses différentes et ainsi créer un gradient de viscosité local [12].

I.11. Problématique du contrôle-passif :

Les méthodes passives consistent à effectuer une légère modification de la géométrie du système afin de manipuler l'évolution du champ d'écoulement sans dépense d'énergie externe.

I.11.1. Différents types d'actionneurs-passifs :

En régime turbulent, la couche limite est plus résistante au décollement qu'en régime laminaire. En fait, les mécanismes utilisés pour un contrôle passif sont conçus pour forcer la transition au niveau de la couche limite. Ainsi, des modifications géométriques qui prennent la forme de rugosités dentelées, striées ou arrondies, sont placées en amont de la zone de décollement afin de générer des perturbations non linéaires provoquant la transition recherchée.

I.11.2. Générateurs de tourbillons-passifs :

Le rôle des générateurs de tourbillons (Vortex-Generators), placés dans la direction transversale de l'écoulement [17] est de favoriser l'interaction entre les grosses structures tourbillonnaires afin d'augmenter le mélange et donc le transfert entre la zone riche en énergie cinétique et la zone de fluide mort en proche paroi. Ce type de contrôle est très utilisé actuellement en aéronautique ainsi qu'en aérodynamique automobile.

I.11.3. Ajout d'éléments solides :

Ce type d'actionneur consiste à monter des systèmes mécaniques, tels que les ailerons placés au bord d'attaque ou au bord de fuite d'une aile, permettant de diriger l'écoulement vers la zone de fluide mort de la couche limite [18] pour ajouter une quantité de mouvement nécessaire pour rendre le fluide plus énergétique.

I.12 Conclusion :

Dans un premier chapitre l'étude bibliographique a permis de définir la notion d'extraction d'énergie par des ailes battantes, la notion de la couche limite, le décollement et le bulbe de décollement laminaire.

En seconde partie, des notions générales sur le contrôle des écoulements sont présentées. Il ressort que les stratégies de contrôle dépendent de la nature des instabilités, la nature des parois et le domaine lié au nombre de Reynolds. Le contrôle actif nécessite un apport extérieur de l'énergie afin de pouvoir manipuler le champ d'écoulement, le contrôle passif, en revanche, ne demande aucun apport d'énergie du milieu externe.

Chapitre II

Modélisation Numérique

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, une description générale des méthodes CFD et les nouveaux modèles des turbines proposées comprenant leurs dimensions a été proposée. Ensuite, on va entamée les paramètres de mouvement des ailes battantes.

La simulation numérique de tous les types d'écoulement peut être considérée comme une expérience numérique si elle fait avec soin. L'avantage de ces méthodes est que toutes les grandeurs physiques liées à l'écoulement tel que le champ de vitesses, le champ de pression, les contraintes, etc., sont immédiatement disponibles à tout moment dans l'écoulement.

Avant de commence une simulation numérique, il faut savoir certains concepts théoriques de base. Ces concepts concernent la définition des équations principales régissant l'écoulement et la modélisation de la turbulence. Les équations qui gouvernent l'écoulement sont les équations de Navier-Stokes et de continuité qui sont écrites pour un fluide newtonien incompressible [19] comme :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial (u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad \text{II.1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{II.2}$$

Avec $u = (U, V, W)$ est le vecteur de vitesse, t est le temps, p est la pression, ρ est la masse volumique et ν est la viscosité cinématique du fluide.

Plusieurs méthodes telles que les méthodes des éléments finis et des volumes finis sont recommandées pour résoudre les équations de Navier-Stokes et les équations de continuité.

La méthode des volumes finis est actuellement la base de plusieurs codes commerciaux dans le domaine de la mécanique des fluides et de transfert de chaleur, telles que CFX, FLUENT et STAR-CD.

- ***DNS (Direct Numerical Simulation) :***

Les équations gouvernant l'écoulement sont une représentation mathématique des principes physiques fondamentaux. L'approche la plus exacte pour la simulation de la turbulence est de résoudre les équations sans modélisation de la turbulence. La simulation numérique directe (Direct Numerical Simulation) est une méthode qui consiste à résoudre les équations de Navier-Stokes sans faire la moindre hypothèse sur les propriétés de la turbulence. Elle donne accès à toutes les informations physiques de l'écoulement. La grande limitation de cette méthode réside dans l'obligation de générer un maillage, au moins, aussi fin que le plus petit tourbillon présent dans l'écoulement. Elle nécessite, donc, une mémoire de stockage importante [19].

- ***Approches statistiques(RANS) :***

C'est une approche basée sur la décomposition des variables décrivant le mouvement en leur moyenne statistique et la fluctuation autour de cette moyenne. Dans une première approche, le mouvement moyen est considéré stationnaire et la totalité du mouvement fluctuant est considéré aléatoire. La moyenne effectuée pour les équations de Navier-Stokes régissant l'écoulement associé à cette décomposition conduit à un système d'équations pour le mouvement moyen. La présence des structures organisées dans les écoulements turbulents conduit à ne plus considérer l'ensemble du mouvement fluctuant comme aléatoire, et ainsi, à adopter des approches instationnaires. La première approche URANS "Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes" est la plus largement utilisée, et consiste à ne plus considérer le mouvement moyen stationnaire et à appliquer les mêmes schémas de fermeture qu'en modélisation RANS pour la modélisation des contraintes turbulentes. Les équations du mouvement moyen sont les mêmes que les équations RANS, au terme temporel près. Cette approche conduit souvent, dans le cas des écoulements décollés, à des faibles prédictions du fait du manque d'adaptation des échelles de vitesse et de longueur du mouvement turbulent utilisées pour ces modèles [19].

- **Simulation des grandes échelles (Large Eddy Simulation LES) :**

L'approche LES (Large Eddy Simulation) est une alternative aux deux autres méthodes précédentes. Avec cette méthode, seules les grosses structures tourbillonnaires sont calculées à partir des équations de Navier-Stokes filtrées et les petites échelles sont modélisées par un modèle de sous-maille (SGS Model, Sub-Grid Scale Model). On accède ainsi à une physique plus fine car les grosses structures de la turbulence sont les plus énergétiques. En pratique, le modèle de sous maille est construit de manière à reproduire la partie du spectre de la turbulence incalculable sur le maillage considéré. Cette méthode requière moins de ressources que l'approche DNS mais beaucoup plus que la méthode RANS. Mais contrairement à l'approche RANS qui fournit uniquement des résultats moyens, la méthode LES permet d'accéder aux informations sur le comportement instationnaire de l'écoulement. Les intérêts de cette méthode sont tout d'abord liés à une grande réduction des besoins informatiques par comparaison à l'approche DNS et également aux informations supplémentaires apportées par rapport à l'approche RANS [19].

II.2. Cinématiques et extraction d'énergie :

Les paramètres du mouvement de battement tels que la fréquence de battement, l'angle de tangage maximum et l'axe de tangage sont fixés pour être similaires à ceux utilisés par Kinsey et Dumas[3]. Dans leur travail, l'efficacité d'extraction d'énergie est jugée optimale à: une fréquence non dimensionnelle $f^* = 0.14$, un angle de pas maximum de et un angle de phase entre le pas et la pilonnement égal à $\phi = 90^\circ$. Toutes les simulations sont effectuées à un nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho U_\infty c}{\mu} = 1100 \quad \text{II.3}$$

En plus de ces paramètres, l'angle de phase entre le tangage du profil et le tangage des volets est réglé à $\phi_{\text{flap}} = 0^\circ$. Le mouvement de battement est construit essentiellement à partir de deux mouvements simultanés qui sont un mouvement de pilonnement. $h(t)$ donné par

$$h(t) = h_0 \sin(2\pi f t) \quad \text{II.4}$$

où h_0 est l'amplitude de pilonnement non dimensionnelle, c désigne la longueur de la corde du profil aérodynamique et f est la fréquence.

Et un mouvement de tangage $\theta(t)$ donné par l'équation [3]:

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(2\pi ft + \phi) \quad \text{II.5}$$

où θ_0 est l'amplitude du tangage et ϕ est l'angle de phase entre les mouvements de tangage et de pilonnement. Le volet a la même équation de pilonnement que le profil principal, mais son mouvement de tangage est régi par :

$$\theta_{flap}(t) = (\theta_0 - \theta_1) \sin(2\pi ft + \phi_{flap}) \quad \text{II.6}$$

où θ_1 est l'amplitude de tangage des volets par rapport à la pointe du bord de fuite et ϕ_{flap} est l'angle de phase entre le tangage des volets et les mouvements de pilonnement. Les mouvements de pilonnement et de tangage ont leur contribution particulière dans la puissance totale extraite.

La puissance extraite par le mouvement de tangage est donnée sous la forme:

$$P_\theta(t) = M(t) \frac{d\theta(t)}{dt} \quad \text{II.7}$$

et la puissance extraite par le mouvement de pilonnement est spécifiée comme suit

$$P_h(t) = L(t) \frac{dh(t)}{dt} \quad \text{II.8}$$

où $L(t)$ est la force de levage ou la composante de force dans la direction y et $M(t)$ est le couple autour du centre de tangage.

Pour le présent concept, la puissance extraite au cours d'un cycle de battement est exprimée d'une manière non dimensionnelle comme:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{Ptotal} &= \bar{C}_{P\text{airfoil}} + \bar{C}_{Pflap} = \bar{C}_{Ph} + \bar{C}_{P\theta} + \bar{C}_{Pflap} = \\ &= \int_0^1 \left\{ C_y(t) \frac{V_y(t)}{U_\infty} + C_M(t) \frac{\dot{\theta}(t)c}{U_\infty} + \bar{C}_{Pflap}(t) \right\} d\left(\frac{t}{T}\right), \end{aligned} \quad \text{II.9}$$

$$\text{Ou } V_y(t) = \frac{dh(t)}{dt}, \dot{\theta}(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}.$$

Par rapport au centre de tangage du profil, la puissance consommée par le volet oscillant est donnée comme suit [3]:

$$\bar{C}_{Pflap} = \int_0^1 C_{Mflap}(t) \frac{\dot{\theta}_{flap}(t)c}{U_\infty} d\left(\frac{t}{T}\right) \quad \text{II.10}$$

Cette puissance peut avoir une valeur positives si le gradient de pression aide à l'oscillation des volets et une valeur négative lorsque la pression obstrue l'oscillation des volets. L'efficacité d'extraction d'énergie totale est donnée entant que :

$$\eta_{total} = \frac{\bar{P}}{P_a} = \frac{\bar{P}_y + \bar{P}_\theta + \bar{P}_{flap}}{1/2\rho U_\infty^3 d} = \bar{C}_{Ptotal} * C/d \quad \text{II.11}$$

d représente la surface totale par courue de la pale, y compris le bord de fuite qui donné comme suit

$$d = 2. \max[h(t) + (1 - x_{pivo})c \sin(\theta(t))] \quad \text{II.12}$$

II.3. Coefficients aérodynamiques :

- **Coefficient de moment C_m :**

Le Coefficient de moment C_m est défini comme

$$C_m = \frac{M}{1/2\rho A R U^2} \quad \text{II.13}$$

Où M représente le couple du rotor et A la zone balayée par l'aile battante [20].

- **Coefficients de traînée et de portance (CD, CL) :**

En général, la force de traînée est définie comme la force aérodynamique nette agissant en sens inverse du sens d'écoulement et la force de portance comme la force perpendiculaire à la direction d'écoulement en sens inverse (**Figure.II.1**).

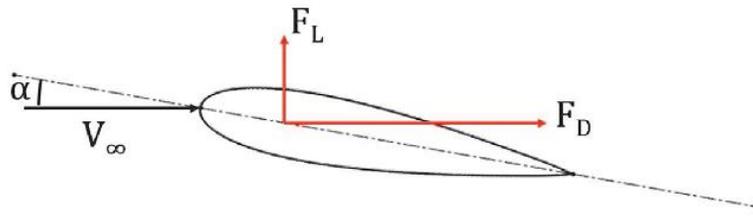


Figure.II.1. Présentation des forces de traîner et de portance (CD, CL).

Pour une éolienne à ailes battantes, les coefficients de portance et de traînée sont calculés respectivement selon :

$$C_D = \frac{F_D}{1/2\rho cU^2} \quad \text{II.14}$$

Et

$$C_L = \frac{L}{1/2\rho cU^2} \quad \text{II.15}$$

Où F_D et F_L sont les forces agissant le long de la direction x et y respectivement [20].

• Le nombre de Reynolds :

Re caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime (transition, laminaire, turbulent, développement d'instantanarités). Il présente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses [20].

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad \text{II.16}$$

L : La longueur.

U : La vitesse.

ν : Viscosité cinématique.

II.4. Description du modèle proposé :

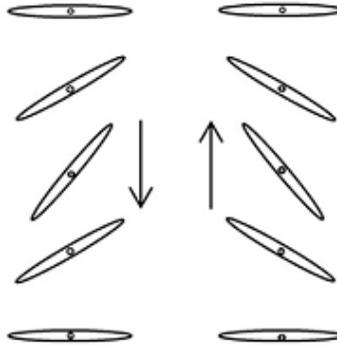


Figure II.2. Extracteur d'énergie classique

L'extracteur étudié est une plaque plate comportant une corde c avec un volet oscillant. Le volet a la forme d'un arc oscillant avec un angle de θ_1 (voir **Figure II.3**). L'angle de phase entre le tangage du profil aérodynamique et le tangage du volet est réglé sur $\phi_{flap} = 0^\circ$ comme illustré sur la **Figure II.3**.

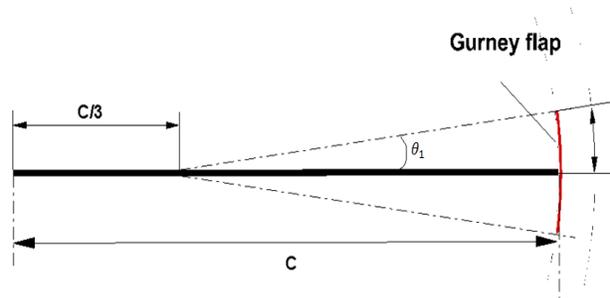


Figure II.3. Extracteur d'énergie avec un volet oscillant.

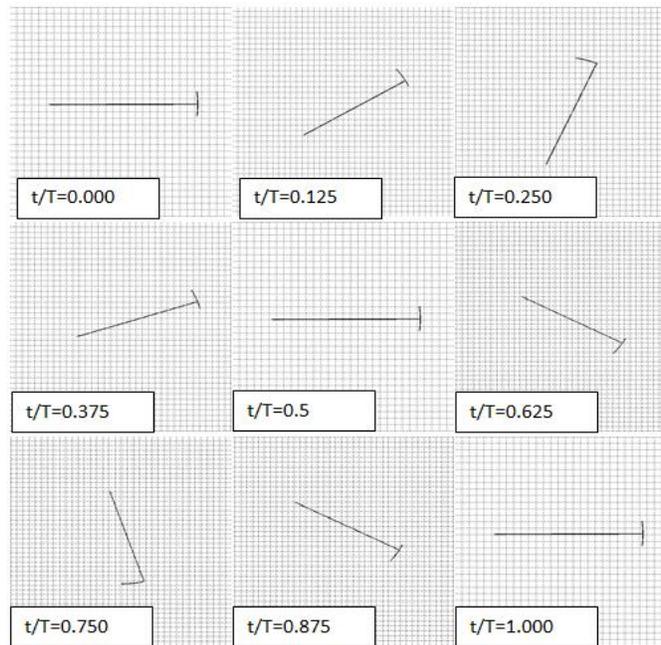


Figure.II.4. Mouvement du volet-aile pour $\phi_{flap} = 0^\circ$ et $\theta_1 = 8^\circ$.

II.5. Domaine de calcul et conditions aux limites :

La qualité du maillage utilisé et l'étendue du domaine de calcul jouent un rôle important dans la précision des calculs CFD. Le problème est encore plus critique quand la technique de maillage dynamique est utilisée, cela est dû au fait que l'évaluation des forces aérodynamiques générées par une aile oscillante est obtenue en intégrant la pression sur des parois mobiles.

Afin de capter correctement le sillage, le domaine de calcul (**Figure.II.5**), est prolongé de 37 diamètres en amont et 60 diamètres de rotor en aval.

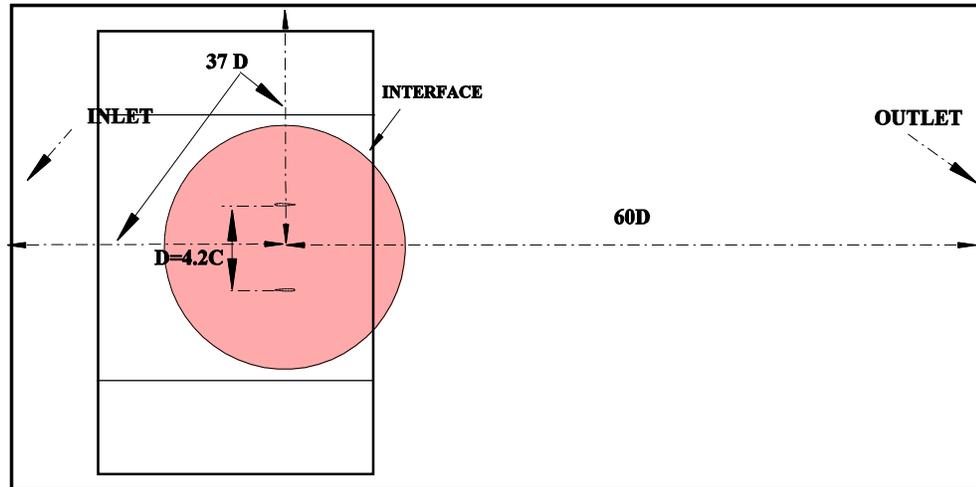


Figure II.5. Domaine de calcul et conditions aux limites.

Les conditions aux limites du type paroi sont sélectionnées pour toutes les zones solides. Pour assurer la continuité entre les domaines fluides, la condition d'interface a été adoptée. Pour les deux extrémités du domaine, les correspondantes conditions sont les suivantes :

- Condition de *Out flow* pour la sortie, qu'est une condition Newman, utilisé pour modéliser les écoulements où les détails sur la vitesse et de pression ne sont pas connus.
- Condition de *velocity_inlet* pour les trois bords, amont, supérieures et inférieures : est une condition de Dirichlet, il consiste à spécifier la vitesse par l'un des moyens disponibles dans Ansys-Fluent 15,0.
- La simulation numérique est réalisée en utilisant Ansys-Fluent 15,0. L'algorithme SIMPLE est utilisé pour le couplage pression-vitesse. Le schéma MUSCL est utilisé pour la discrétisation de toutes les équations de transport. Dans une itération temporelle un code C++ est adopté pour contrôler le maillage dynamique et calculer toutes les forces instantanées.

II.6. Présentation des logiciels de calcul :

Gambit et Fluent sont des logiciels, commerciaux, permettant de réaliser des Simulations 2D ou 3D en mécanique des fluides. La construction du maillage est effectuée à l'aide de Gambit et la résolution des équations de Navier Stokes avec Fluent. Ces logiciels permettent de réaliser des simulations sur tous types de géométries complexes (fixes ou

mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs et avec des modèles physiques variés (diphasique, turbulent, etc....).

- **Le Gambit :**

C'est un préprocesseur utilisé pour construire une géométrie et générer son maillage, il peut réaliser des maillages triangulaires ou quadratiques complexes en deux ou trois dimensions.

Il existe plusieurs techniques de génération de maillage sur Gambit. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon Gambit génère automatiquement un maillage non structuré adapté au type de géométrie construite. Les défauts sont détectés à l'aide de son interface comportant plusieurs fenêtres d'outils de création, génération, vérification du maillage.

II.7. Les étapes de création de la géométrie par le GAMBIT :

La façon de l'organigramme de création de la géométrie d'une pale d'aile battante dans notre travail, par le pré processeur Gambit, est présentée sur la (Figure II.6) :

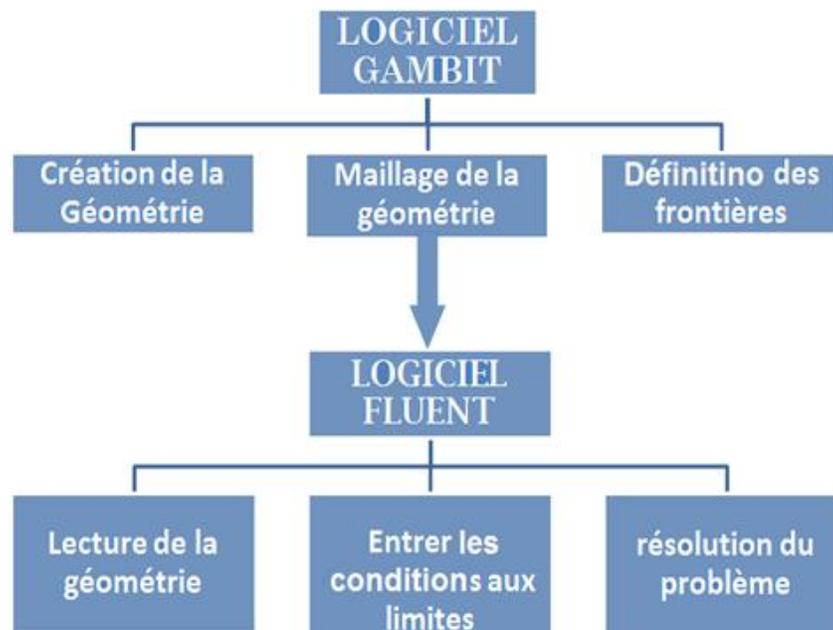


Figure.II.6. Schémas des étapes à suivre pour la simulation.

On dessine l'aile battante dans un cercle de rayon R noté zone 1 dans la **figure II.7**. La corde de la pale est de 150 mm, puis on utilise un maillage triangulaire pour mailler la surface. Après, on dessine deux zones avec un maillage rectangulaire pour effectuer un mouvement vertical. Le mouvement est effectué à l'aide de la technique de maillage dynamique '*layring*'

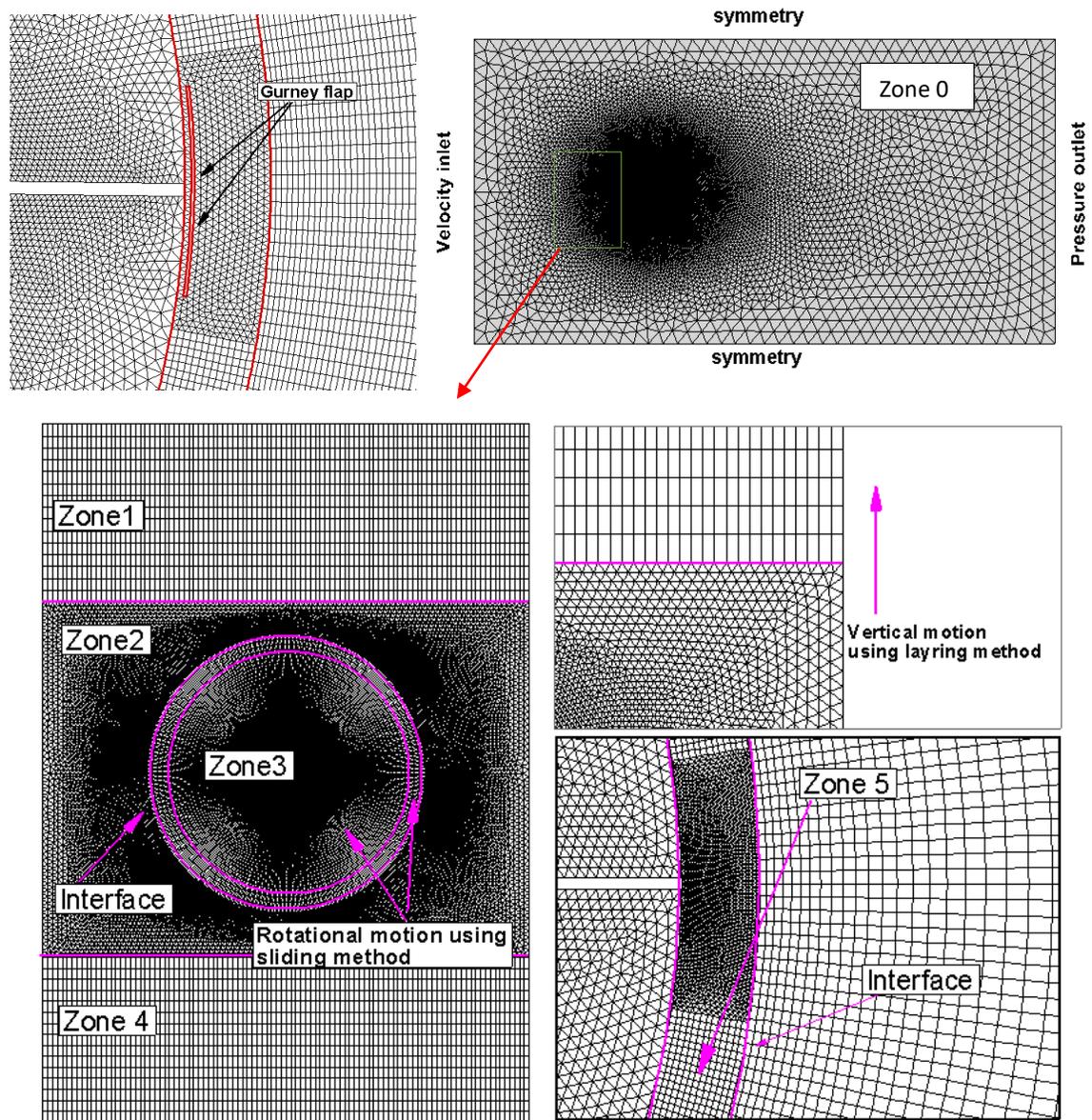


Figure.II.7. Détails de maillage dynamique.

II.8. Techniques de maillage dynamique :

- **Sliding mesh technique:**

La technique du maillage coulissant permet aux grilles adjacentes de glisser l'une par rapport à l'autre. Ainsi, les faces de la grille n'ont pas besoin d'être associées à l'interface de la grille. Cet état nécessite une technique de calcul du flux entre les deux zones d'interface non conformes de chaque interface de grille. Pour calculer le flux, l'intersection entre les zones d'interface est déterminée à chaque nouvelle étape temporelle. [19] L'intersection résultante produit une zone intérieure (une zone avec des cellules de fluide des deux côtés) et une ou plusieurs zones périodiques. Si le problème n'est pas périodique, l'intersection produit une zone intérieure et une paire de zones murales (qui seront vides si les deux zones d'interface se croisent entièrement), comme le montre la **figure II.8**. Le nombre de faces dans ces zones d'intersection varie à mesure que les zones d'interface se déplacent les unes par rapport aux autres. Principalement, les flux à travers l'interface de grille sont calculés en utilisant les faces résultant de l'intersection des deux zones d'interface, plutôt qu'à partir de la zone d'interface qui se fait face.

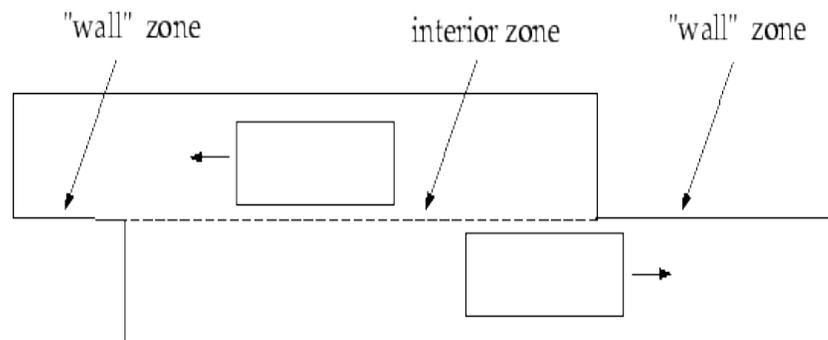


Figure. II.8. Zones créées par une intersection d'interface non périodique [21].

Dans l'exemple de la **figure II.9**, les zones d'interface sont composées de faces A-B et B-C et de faces D-E et E-F. Les faces a-d, d-b, b-e, etc. sont générées par l'intersection de ces zones. Les faces produites dans la région où les deux zones cellulaires se chevauchent (d-b, b-e et e-c) sont groupées pour former une zone intérieure, tandis que les faces restantes (a-d et c-f) sont appariées pour former une zone périodique. Pour calculer le flux à travers l'interface dans la cellule

IV, par exemple, la face D-E est ignorée et les faces d-b et b-e sont utilisées à la place, transportant des informations dans la cellule IV des cellules I et III, respectivement

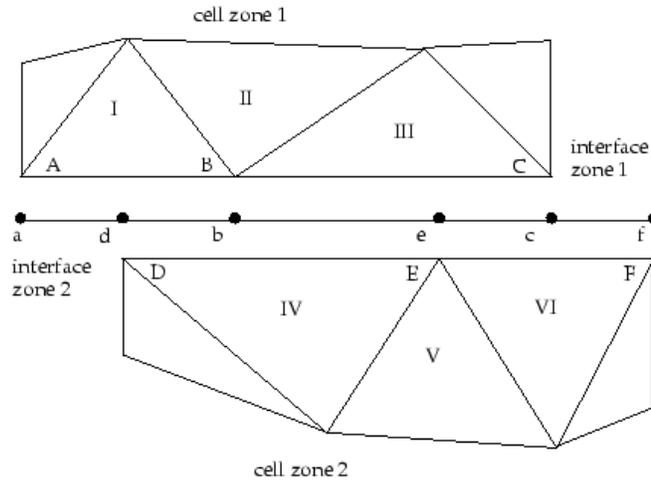


Figure II.9. Interface 2D [19]

- **Layering method:**

La stratégie de maillage dynamique utilisée dans la présente étude est la méthode de ‘*Layering*’ disponible dans ANSYS FLUENT 15.0. La méthode consiste à ajouter ou supprimer des couches de cellules adjacentes à la paroi mobile, en fonction de sa hauteur [19].

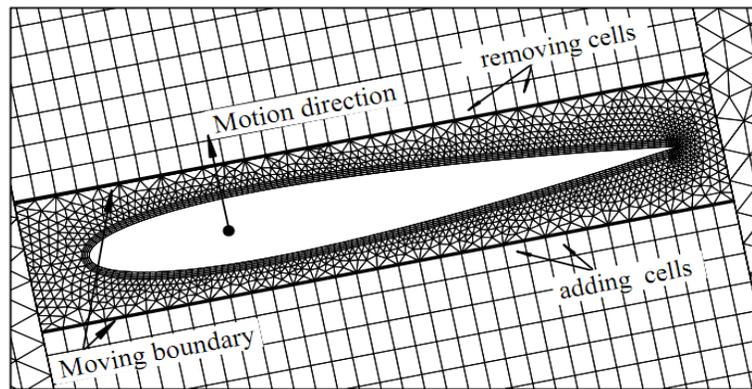


Figure.II.10. Illustration de layering technique.

II.9. Étude de la sensibilité de la solution par rapport au maillage :

Avant débiter la simulation on va faire optimiser le maillage pour obtenir des résultats plus précis.

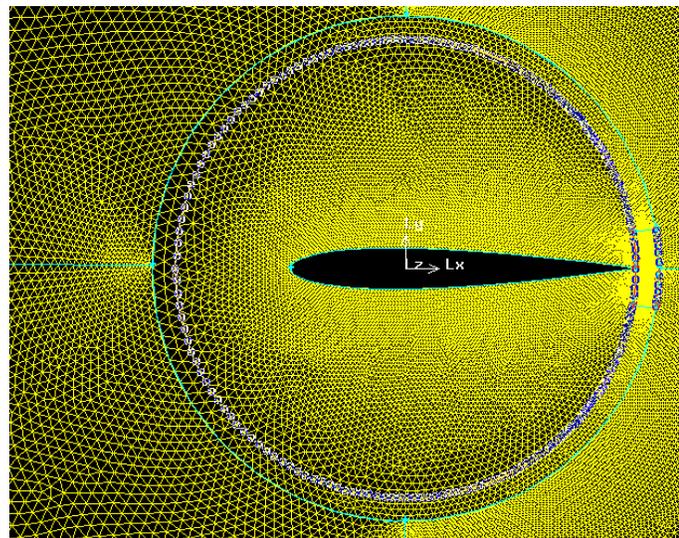
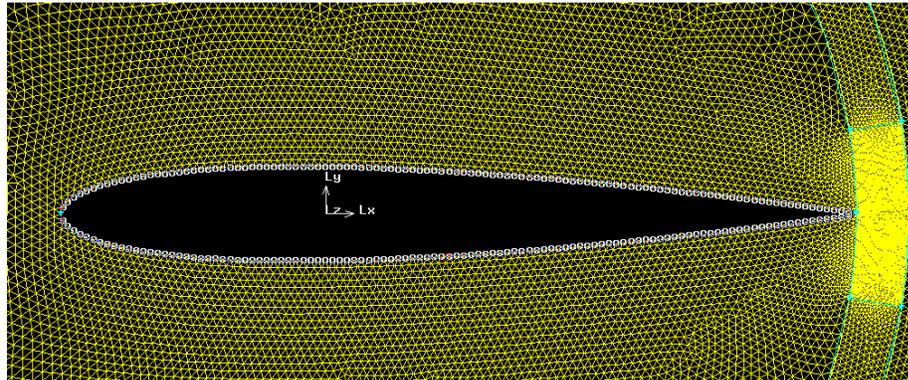


Figure.II.11 : Discrétisation (a) sur le profil (b) sur le cercle.

Maillage1 :

Tableau (II.1) : Première discrétisation des segments du domaine de calcul.

	Ratio	espacement	Type d'espacement
Sur le profile	1	100	Interval count
Sur le cercle	1	200	Interval count

Maillage2:

Tableau (II.2) : deuxième des segments du domaine de calcul.

	Ratio	espacement	Type d'espacement
Sur le profile	1	120	Interval count
Sur le cercle	1	220	Interval count

Maillage3:

Tableau (II.3) : troisième des segments du domaine de calcul.

	Ratio	espacement	Type d'espacement
Sur le profile	1	150	Interval count
Sur le cercle	1	250	Interval count

Lorsque le maillage est complété et les conditions aux limites sont correctement imposées, il ne reste qu'exporter ce maillage dans un format lisible par le solveur Fluent en l'occurrence. Ceci se fait par la commande (File/Export/Mesh) qui permet d'écrire un fichier de maillage avec l'extension (msh). On coche l'option « Export 2-D Mesh ».

II.10. Les étapes à suivre sur le solveur FLUENT :

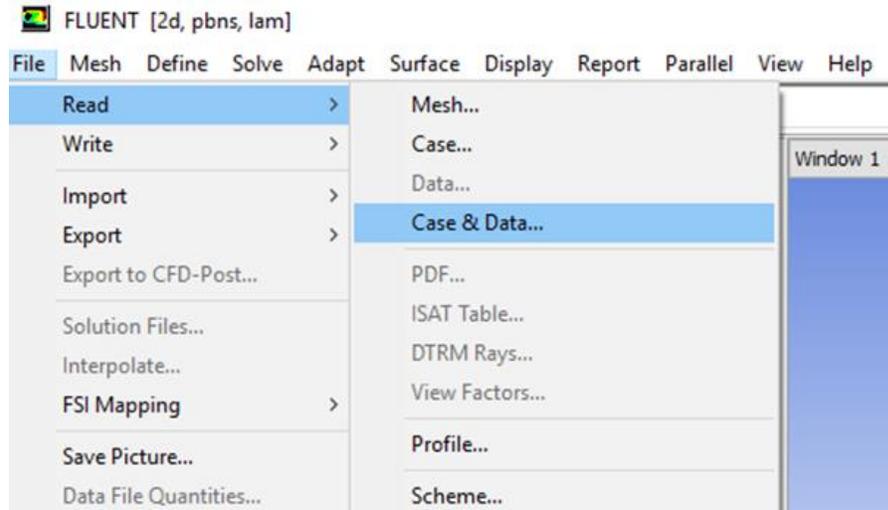
• **1^{ème} étape :**

On lance le solveur FLUENT, on sélectionne (2ddp), aussi bien pour une double précision de

calcul.

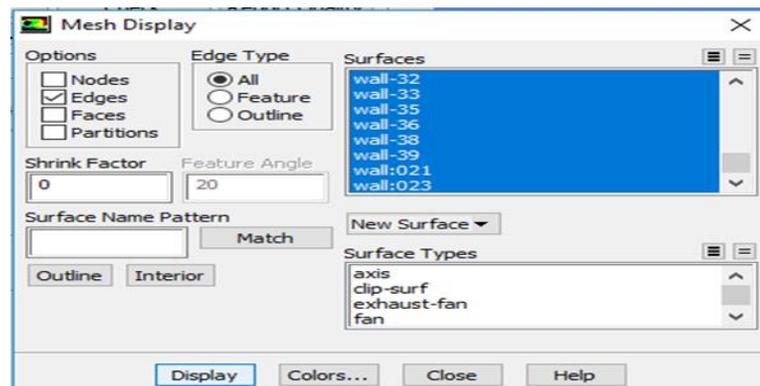
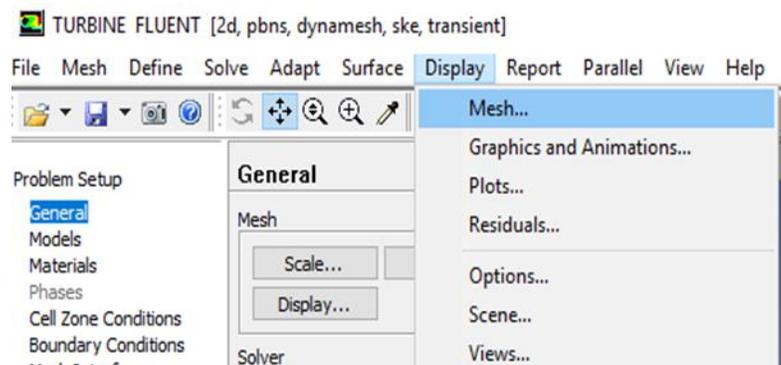
- 2^{ème} étape (La lecture de la grille) :

On sélectionne le menu File → Read → Case...



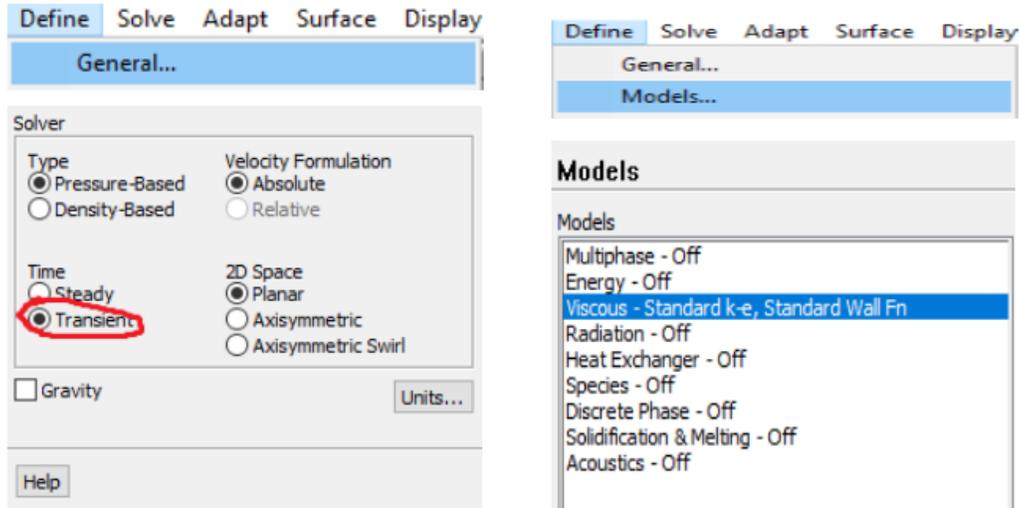
- 3^{ème} étape :

Pour montrer la grille, on utilise : Display → Mesh.



• 4^{ème} étape :

Pour choisir une des formules de solution, nous employons le panneau de solveur : Define → General → Solver

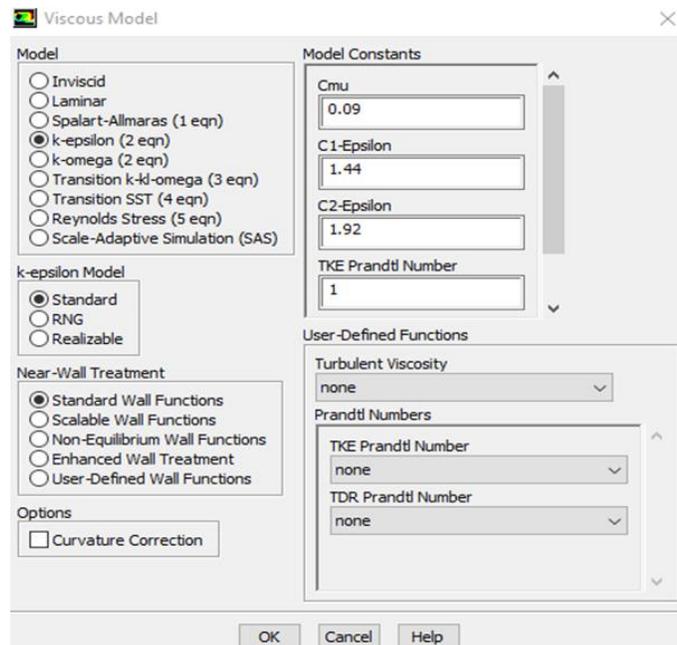


L'option « Transient » est activée car la simulation est instationnaire.

• 5^{ème} étape :

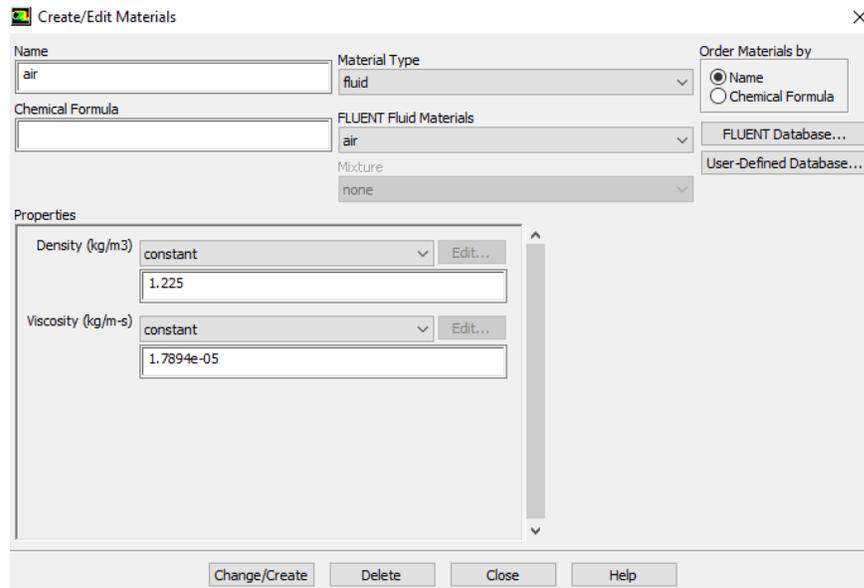
Si l'écoulement est turbulent, sélectionné un modèle de turbulence :

Define • →Models → k-epsilon.



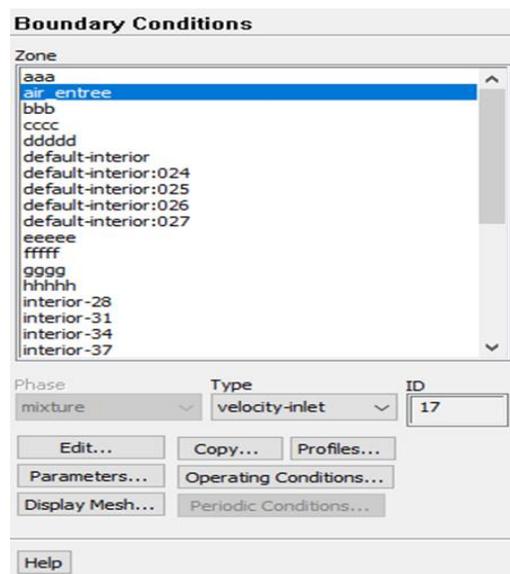
• 6^{eme} étape (Indication des Propriétés du fluide) :

Pour fixer les propriétés de fluide on utilise : Define • → Materials.



• 7^{eme} étape (Indication des conditions aux limites) :

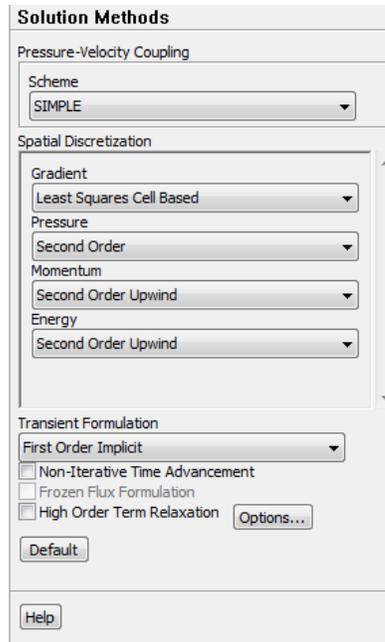
Pour entrer les conditions aux limites, on utilise le panneau des conditions aux limites : Define → Boundary conditions.



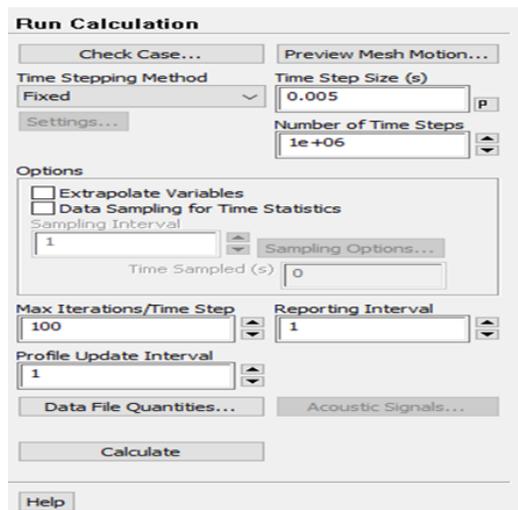
• 8^{eme} étape La méthode de solution sélectionnée sur ANSYS FLUENT :

Pour résoudre les équations de Navier-Stokes, on a utilisé le code commercial "ANSYS FLUENT" basé sur la méthode des volumes finis. Il suggère deux modes de calcul, simple ou

double précision. Dans le but d'avoir une bonne précision sur la solution calculée, le mode double précision est sélectionné. On a considéré l'écoulement comme étant incompressible, donc le solveur est basé sur la pression. Une discrétisation temporelle implicite de premier ordre est sélectionnée pour étudier tous les cas considérés dans notre étude. L'interpolation de la pression par un schéma de "Second ordre" est sélectionnée. Le schéma est assez stable, précis et améliore la précision des écoulements incompressibles. Le couplage vitesse-pression est assuré par un schéma de type SIMPLE.



Maintenant on peut lancer le calcul. On clique sur : Solve → Run Calculation



II.11. Estimation du pas de temps :

La condition CFL assure que la particule fluide dans son mouvement ne doit pas dépasser une cellule du domaine de calcul pendant un pas de temps [21].

$$CFL = \frac{U\Delta t}{\Delta x} < 1$$

Avec :

U : Vitesse de l'écoulement libre.

Δt : Pas de temps.

Δx : Pas d'espace.

Dans les conditions de la présente simulation le pas de temps est égale 0.005 s.

II.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous examinons les modèles proposés pour contrôler l'écoulement autour des éoliennes à aile battante. Nous présentons à la fois les mouvements des ailes battantes. En ce qui concerne la modélisation, l'ensemble des méthodes abordées dans ce chapitre montrent que la modélisation des écoulements turbulents instationnaires est complexe.

Pour l'écoulement dans le régime turbulent, plusieurs schémas sont disponibles pour modéliser les équations à savoir : la Simulation numérique direct (DNS), la simulation des grandes échelles (LES) et la simulation de moyenne statistique (RANS). La capacité des ordinateurs, la complexité de la géométrie et le degré de précision sont des facteurs qui nous guideront vers l'un ou l'autre de ces schémas.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET

DISCUSSION

III.1. Introduction :

Pour produire une énergie propre et renouvelable, le vent et parmi les sources les plus utilisées. Jusqu'à présent, ce domaine est dominé par les machines rotatives. Grâce à sa conception simple et ses installations faciles, la turbine à ailes battantes est l'un des dispositifs les plus prometteurs. Cependant, son efficacité est encore relativement faible par rapport aux turbines à axe horizontal (TAH).

Ordinairement, la turbine à ailes battantes classique est constituée d'une pale rigide, cette conception simple résultant d'une faible efficacité d'extraction d'énergie, à cause de décrochage qui se produit pour les écoulements à large angle d'incidence. Ce fait a stimulé et a encouragé les chercheurs à apporter des améliorations et de développer des nouvelles méthodes de contrôle pour rapprocher les efficacités de ce type de turbine à celle des turbines à axe horizontal (TAH).

Le décrochage dynamique est responsable, non seulement de la chute de l'efficacité, mais aussi responsable à des vibrations structurelles et des bruits acoustiques. Pour remplir cette lacune, plusieurs techniques de contrôle d'écoulement ont été développées dans lesquels elles peuvent être classées en ; techniques de contrôle passif ou techniques de contrôle actif.

Ce chapitre est commencé par une simulation d'écoulement autour d'une turbine à ailes battantes avec une pale simple (cas nominal).

Ensuite, l'écoulement autour d'une turbine à une pale avec un volet oscillant, activement déformable est étudié. Différentes formes des pales flexibles sont étudiées.

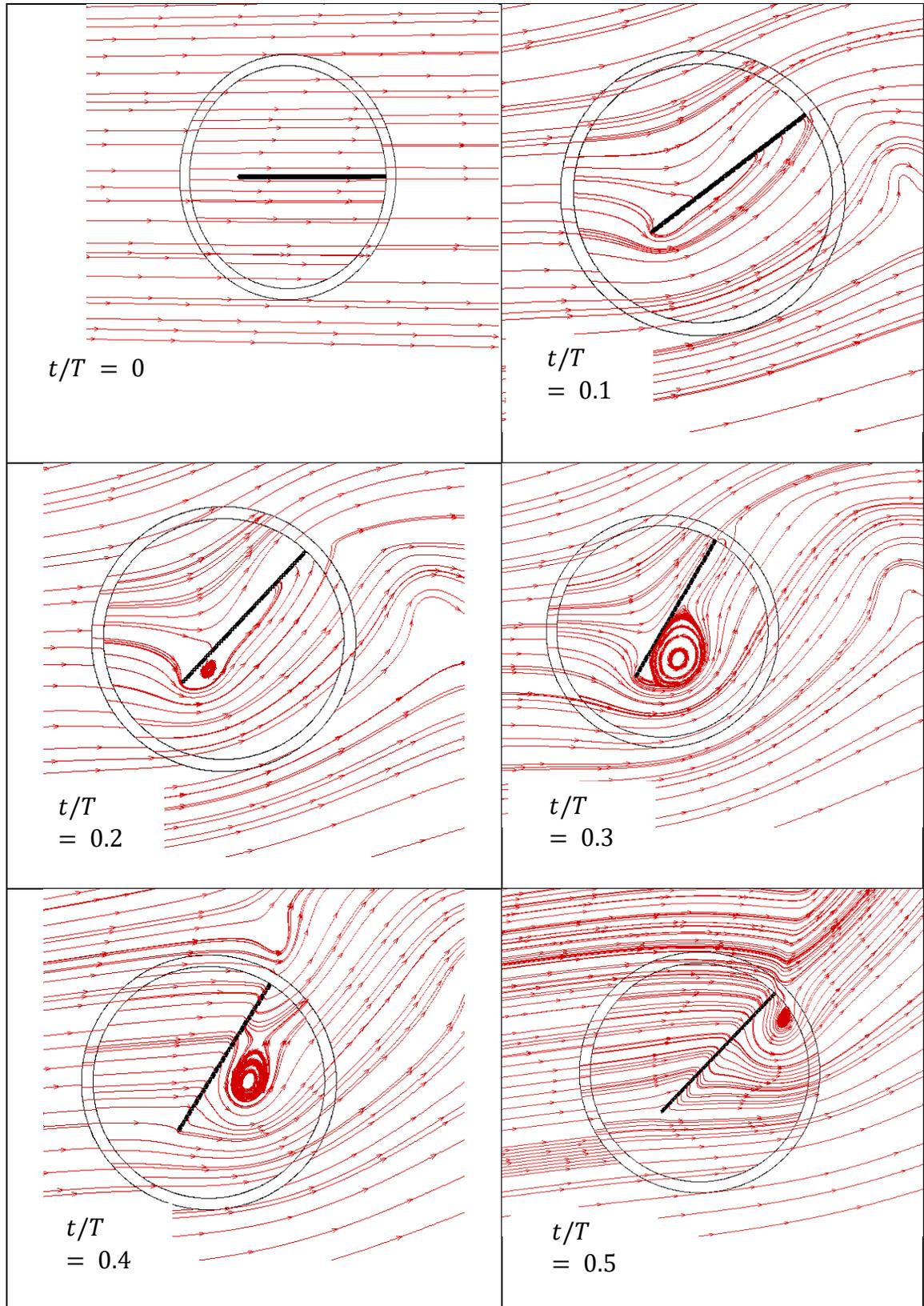
III.2. Simulation d'écoulement autour d'une turbine à pales simple :

Afin d'entamer et de comprendre le concept de décrochage dynamique et de séparation de la couche limite, on va tout d'abord, présenter le cas sans contrôle, pour mettre en évidence les phénomènes naturels qui apparaîtront lorsque le mouvement de la turbine. Ce décrochage dynamique est généralement étudié dans le cas bidimensionnel, plusieurs auteurs ont été montrés qu'une simulation bidimensionnel (2D) est capable de découvrir correctement les performances de la machine, si en assurant certains critères de simulation (maillage fine, modèle de turbulence approprié).

Une description générale des structures vorticitaires est représentée selon la position de la pale.

Pour comprendre le mécanisme par lequel, l'énergie est extraite par la turbine et comment les interactions entre les pales affectent la performance de la turbine, des descriptions générales des interactions des structures fluides et des trajectoires des tourbillons principaux à l'intérieur de la turbine sont représentées en fonction de la position de la pale.

En général, de grands tourbillons de la taille de la pale ont été détectés lors de la rotation de la turbine. D'après la Fig.III.1, on peut voir un écoulement attaché en position $t/T = 0$ Lorsque l'angle d'incidence effectif augmente avec l'angle de rotation, l'écoulement commence typiquement à se séparer au bord d'attaque pour une angle $\theta = 20^\circ$. Ensuite, le point de séparation se déplace vers le bord d'attaque formant une zone de recirculation à la Surface inférieure, donc, la pale est dans un décrochage faible. Une fois passé à un angle azimutal de 30 degrés, le vortex croît rapidement avec l'augmentation de l'angle azimutal, et le coefficient de portance augmente proportionnellement à l'angle d'attaque pendant ce développement. $A_T^t = 0.5$, le vortex détaché continue de croître et interagit avec un nouveau tourbillon au bord de fuite, conduisant à une importante dissipation d'énergie, affectant le coefficient de portance qui se développe d'une façon non linéaire. Lorsque la pale se déplace vers $\frac{t}{T} > 0.5$, le tourbillon augmente et commence à quitter la surface de la pale, donc la pale entre dans un décrochage profond, ce qui chute soudainement le coefficient de portance.



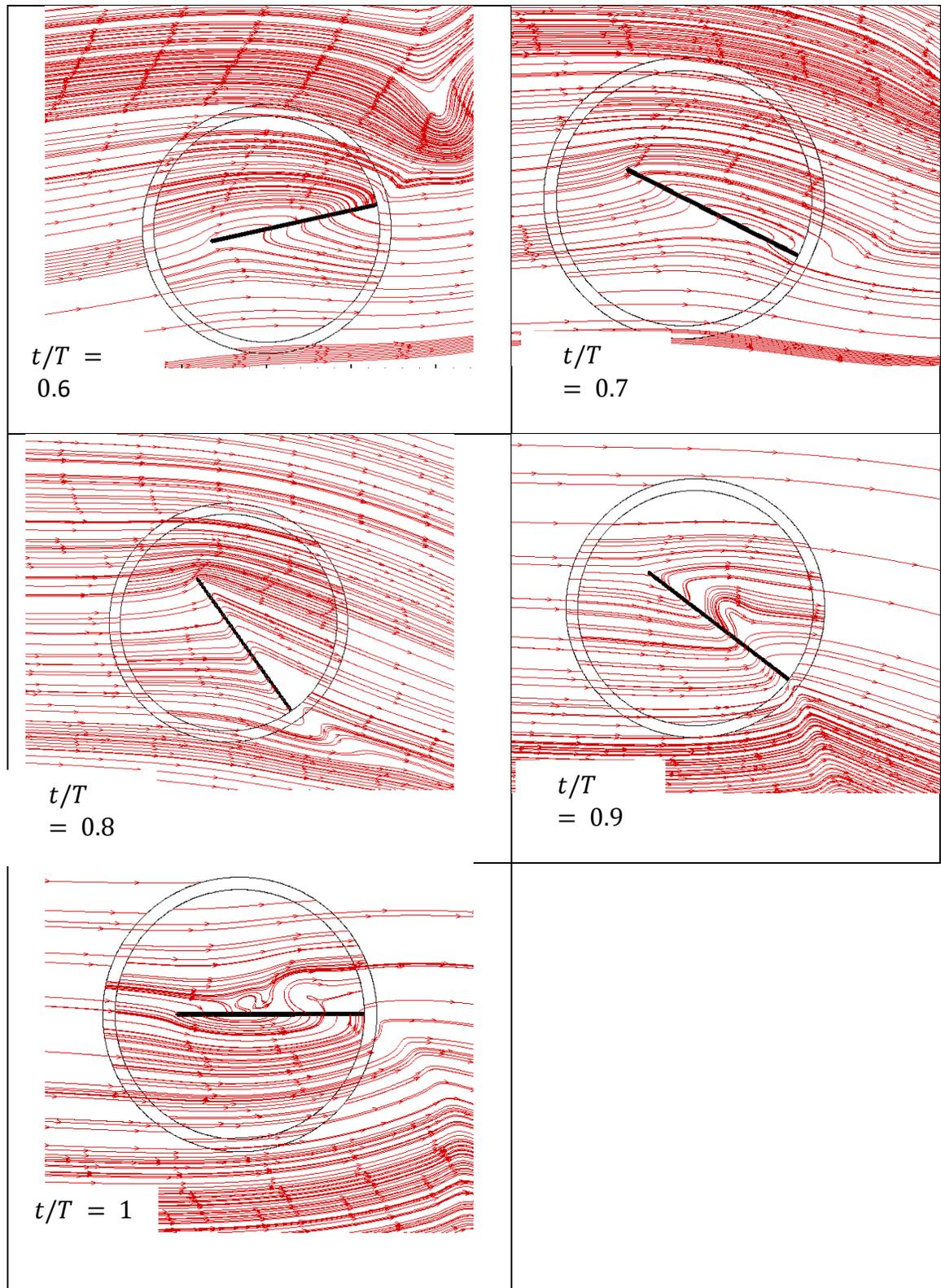


Figure.III.1 Lignes de courant pour différentes positions.

D'après la **Figure.III.1**, on peut déterminer que la pale a pratiqué quatre étapes : l'écoulement attaché, le décrochage mineur, le décrochage profond et l'écoulement rattaché. La séparation de l'écoulement du bord de fuite crée un décrochage léger ou mineur et le détachement total du vortex du bord d'attaque pénètre la pale dans un décrochage profond.

Dans la deuxième moitié de la turbine, la dépression est transportée du côté de surpression de la pale au côté d'aspiration et l'angle d'attaque a commencé à augmenter. Par conséquent, un écoulement inversé se produit au niveau du bord de fuite, ce qui augmente de manière significative la force de traînée. Le pic du coefficient de traînée dans la deuxième moitié est d'environ 50% de celui de la première moitié. Ce comportement est attribué au fait que la performance de la turbine est exposée à une interaction aérodynamique commune due aux sillages produits par les pales.

III.2.1. Validation du modèle :

Typiquement, le solveur utilisé, y compris le maillage et la méthode numérique, doit être validé par rapport à la littérature existante. Le présent solveur est comparé à l'étude réalisée par Kinsey et Dumas [3]. Dans leur travail, pour un nombre de Reynolds égal à 1100, une fréquence non dimensionnelle $f^* = 0.14$, un angle maximal de $\theta_0 = 76.33^\circ$ et un angle de phase entre le tangage et le pilonnement égal à $\varphi = 90^\circ$, l'efficacité d'extraction d'énergie est optimale. Ces paramètres sont fixés dans le présent travail pour valider le solveur et aussi pour examiner la contribution du nouveau concept de volets oscillants. Pour fournir un test de dépendance au maillage et au pas de temps, trois grilles de différentes densités sont utilisées. Le maillage fin contient environ 290.431 cellules où le maillage grossier a environ 140.131 cellules. Les **FigureIII.2** et **FigureIII.3** montrent que les résultats produits par une grille moyenne avec un pas de temps égal à 1000 / cycle correspondent exactement aux résultats de Kinsey et Dumas [3].

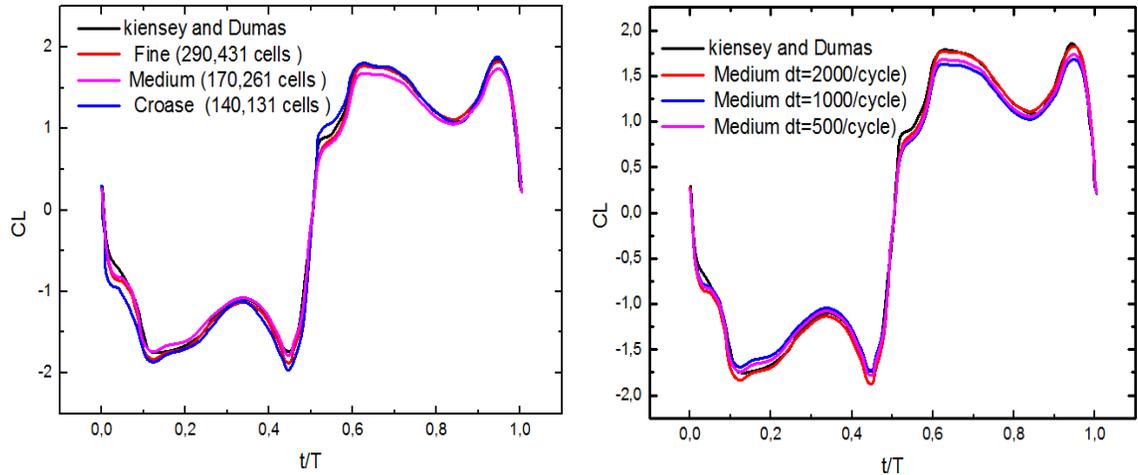


Figure.III.2. (a) Indépendance du maillage et(b) test du pas du temps relatif à Kinsey et Dumas pour un profilNACA0015.

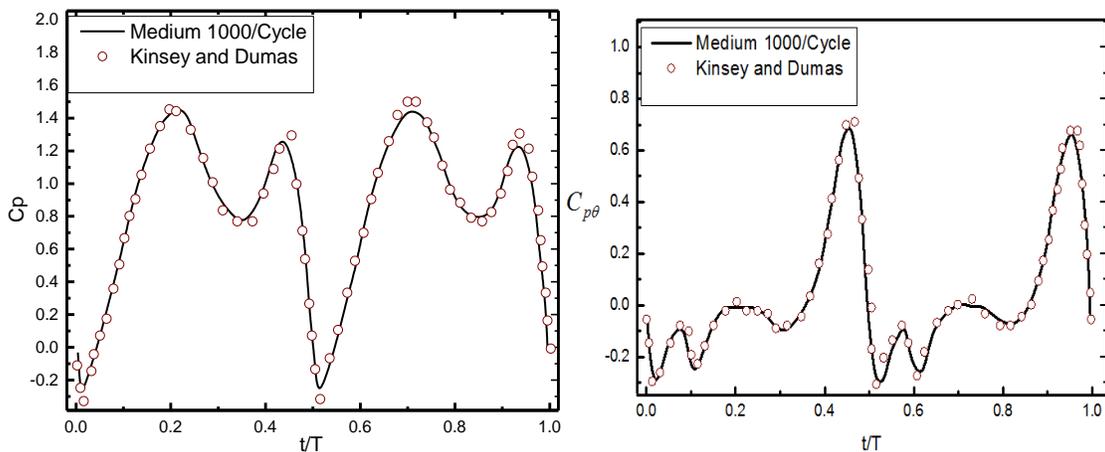


Figure.III.3. Comparaison des coefficients de puissance instantanés. C_p et $C_{p\theta}$ pour la présente simulation et Kinsey et Dumas [3] pour un profil aérodynamique NACA0015.

III.2.2. Mécanisme d'amélioration de la performance de la turbine :

Pour examiner comment l'extracteur d'énergie se comporte en présence d'un volet oscillant, des examens plus approfondis du comportement de couple et de la synchronisation entre les forces de portance et la vitesse de pilonnement sont nécessaires. A cette fin, une

comparaison entre le cas d'origine (plaque plate simple) et un cas contrôlé (avec volet $L=c/6, \theta = 7^\circ$) est réalisée. La **figure III.4** montre l'évolution de $C_l, \frac{dh}{dt}/U_\infty, C_m, \frac{d\theta}{dt}, C_{P\theta}, C_{Ph}$ et C_p sur une période de battement. Comme le montrent la **figure III.4** (a) et (b), avec la présence du volet, les quantités C_l, C_m présentent des pics supplémentaires et sont toujours bien synchronisés respectivement avec $\frac{dh}{dt}$ and $\frac{d\theta}{dt}$. Comparé à un extracteur ordinaire, un extracteur équipé d'un volet oscillant peut produire un plus grand pic de C_l , et C_m , ce qui signifie typiquement que $\bar{C}_{P\theta}$ and \bar{C}_{Ph} vont augmenter. À partir de la définition de base de C_p total, l'augmentation de $\bar{C}_{P\theta}$ dans le cas contrôlé semble avoir une contribution négative dans la puissance globale extraite.

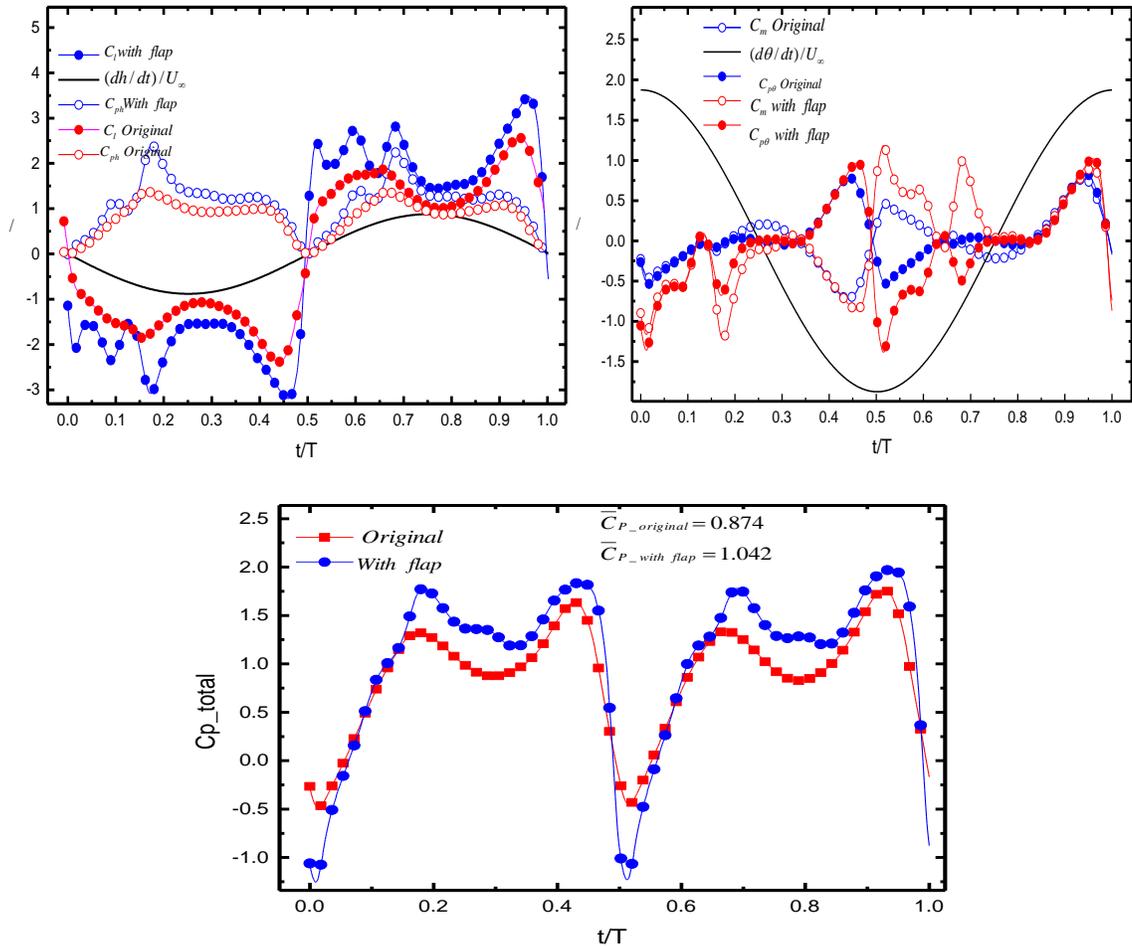


Figure.III.4. Évolution instationnaire.

Figure.III.4. Évolution instationnaire de : (a) coefficient de portance (C_l), vitesse de pilonnement $\frac{(dh/dt)}{U_\infty}$ et coefficient d'extraction d'énergie (C_{Ph}); (b) coefficient de couple (C_m),

vitesse de tangage ($d\theta = dt / U1$) et coefficient de consommation d'énergie ($C_{P\theta}$); et (c) coefficient d'extraction d'énergie nette incluant le coefficient de puissance de volet C_p à $f^* = 0.14:15$ et $\theta_0 = 76.33^\circ$.

L'amélioration de la force de portance est essentiellement due à la correction de la distribution de la pression. Pour confirmer ce fait, un examen attentif du champ d'écoulement à proximité du volet est fourni.

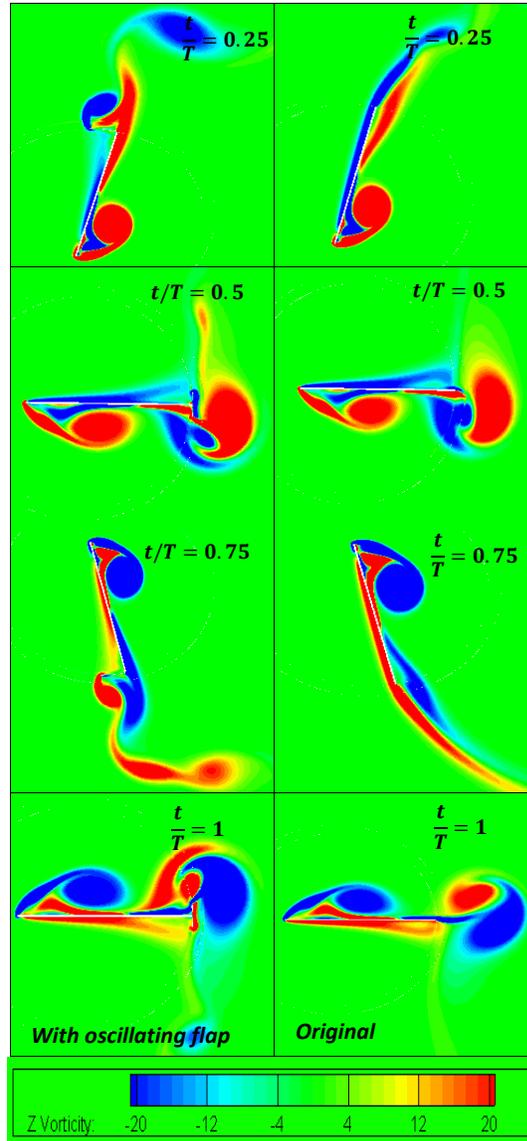


Figure.III.5. Structure vorticienne.

Figure.III.5. Structure vorticienne pour une période de battement a $f^* = 0.14$ et $\theta_0 = 76.33^\circ$.

Les **figure III.5** et **figure III.6** fournissent une comparaison entre le tourbillon instantané et le coefficient de pression correspondant pour deux cas avec et sans volet à différentes positions. Comme on peut le voir, à $t / T = 0$, le profil aérodynamique atteint sa vitesse maximale de course descendante et le développement du tourbillon de bord d'attaque entraîne une élévation négative. L'extraction de puissance instantanée est corrélée positivement à ce développement pour atteindre sa valeur maximale. À $t / T = 0,25$, le vortex de bord d'attaque est complètement développé et il est prêt à se détacher du bord d'attaque.

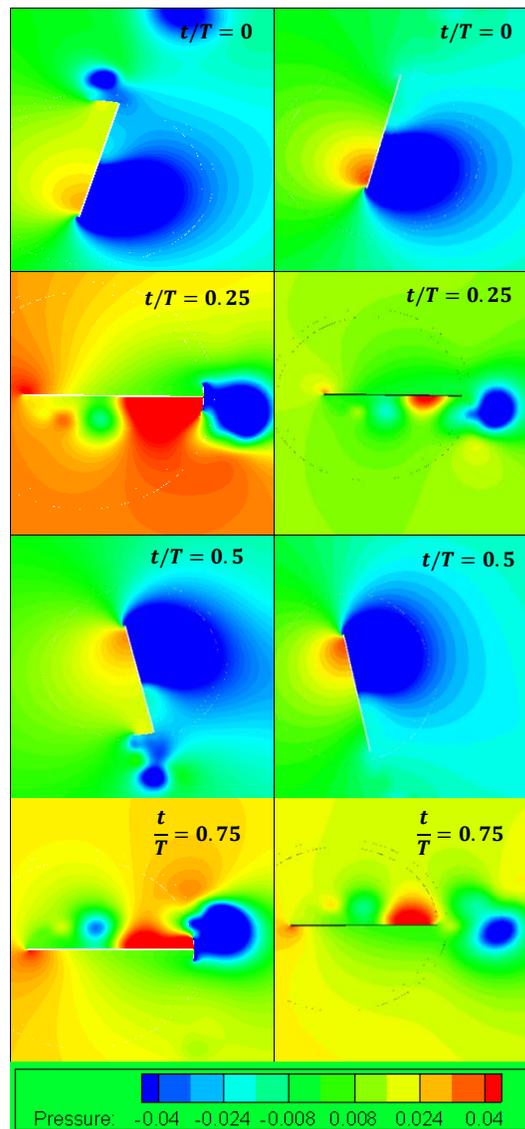


Figure.III.6. Contours de pression pour une période de battement a

$$f^* = 0.14 \text{ et } \theta_0 = 76.33^\circ.$$

L'interaction des tourbillons au bord de fuite révèle que l'ajout d'un volet oscillant semble n'avoir aucun impact significatif sur le développement du tourbillon du bord d'attaque. Cependant, il affecte de manière significative le développement de vortex de bord de fuite. Pendant la phase de descente, le volet oscillant génère un tourbillon dans le sens des aiguilles d'une montre qui favorise les surfaces d'aspiration et diminue la pression négative à proximité du bord de fuite. Du point de vue de la circulation, un volet oscillant a le potentiel d'augmenter la vitesse dans les surfaces d'aspiration et de la diminuer sur la surface de pression, ce qui améliore la circulation totale, ce qui augmente les forces de portance et améliore l'efficacité de l'extracteur. Cependant, l'augmentation plus importante de \bar{C}_{py} peut clairement couvrir cette perte, de sorte que la puissance totale extraite reste améliorée. Ceci suggère qu'un dispositif de contrôle d'écoulement approprié devrait augmenter \bar{C}_{py} en augmentant le coefficient de la portance avec une augmentation acceptable de $\bar{C}_{p\theta}$.

III.3. Étude paramétrique :

L'étude de l'effet de la longueur et la position de volet sur l'efficacité de l'extraction d'énergie est présentée dans cette section.

III.3.1. Effet de la longueur du volet :

Dans cette section, l'effet de la longueur des volets sur le comportement des forces aérodynamiques est considéré. Un examen détaillé des forces instantanées de portance, de traînée et de couple est présenté. De plus, les coefficients de puissance instantanés sont suivis au cours d'un cycle de battement afin de mettre en évidence la contribution de chaque coefficient dans l'efficacité globale du système. La **figure III.7** montre la variation des forces aérodynamiques en présence d'un volet. Conformément à la **figure III.7 (a)**, pour le cas d'origine (plaque plate simple), le coefficient de portance a deux pics négatifs en phase descendante. Le premier pic est d'environ -2 correspondant à l'amplitude de tangage maximale $t / T = 0$ où le vortex de bord d'attaque est en train de se former. Le deuxième pic apparaît à environ $t / T = 0,45$ où le vortex de bord d'attaque est complètement développé. On peut voir en outre que le cas contrôlé produit des pics plus importants de Cl , le premier pic négatif augmente de -2 à -2,5 et le second pic de -2,3 à -3, et ceci est attribué à la correction de la distribution de la pression. Le même comportement est enregistré dans la seconde moitié du cycle de battement. Cependant, avec des pics positifs.

Il est évident que pour les configurations de volet, l'angle d'attaque est toujours le même que dans le cas d'origine, ce qui signifie que le coefficient de portance ne peut être augmenté que par le contrôle du vortex du bord de fuite. Sur la **figure III.7 (c)**, le pic de traînée augmente de 4 à 7 en raison du grand sillage en aval du volet. Le grand sillage est en outre interprété comme des pics négatifs apparaissant clairement dans les deux grandeurs Cm et $C_{p\theta}$. Rappelons que $C_{p\theta}$ a une contribution négative dans la puissance extraite globale. Cela a révélé qu'une augmentation supplémentaire de la longueur des volets n'entraînerait aucune amélioration de l'extraction d'énergie supplémentaire.

Pour la configuration $c / 4$, le volet influe négativement l'amélioration de la performance, ceci est attribué au fait que ce volet produit des forces de traînée relativement faibles et relativement élevées. Aucune modification claire n'est observée par rapport au cas de base. Pour le cas $c / 6$, la performance est encore améliorée par rapport au cas d'origine en raison de la contribution positive du volet de bord de fuite qui couvre cette perte. La conclusion qui peut être tirée des **figure III.7** et **figure III.8** est que le contrôle devrait corriger la distribution de pression sans augmenter la force de traînée pendant le cycle d'oscillation. Typiquement, l'amélioration de la portance entraîne une augmentation notable de C_{ph} si elle est bien synchronisée avec la vitesse de pilonnement.

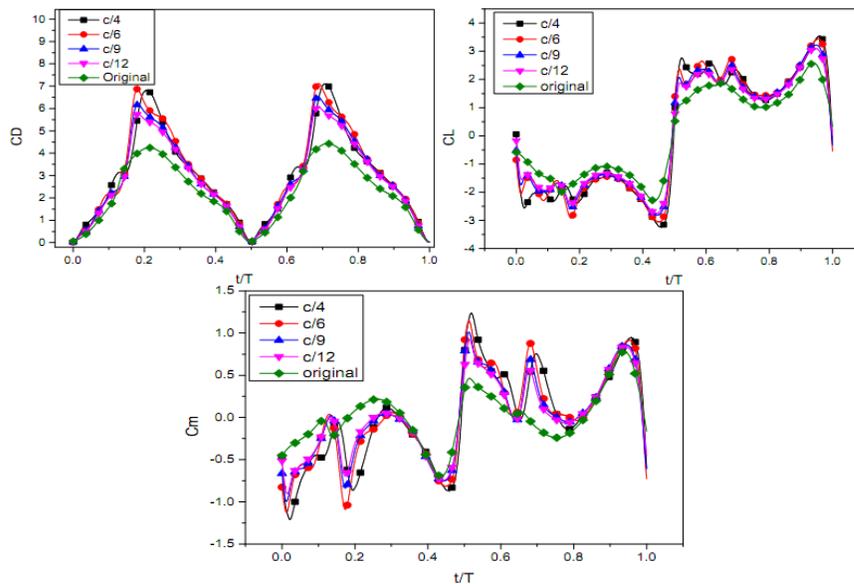


Figure.III.7. Évolution de (a) coefficient de portance (Cl), (b) coefficient de trainée (CD) (c) coefficient de couple (Cm)

La **figure III.8** (a) indique que le second pic de C_{Ph} augmente de 1,3 à 2,25 pour le cas $c / 6$. On voit que pour tous les cas contrôlés C_{Ph} est supérieur au cas d'origine pendant toutes les parties du cycle de battement, cependant la courbe de $C_{P\theta}$ indique une contribution négative pendant certaines parties du cycle de battement en particulier à $t / T = 0.5$ lorsque le battement change de direction.

Les deux quantités $C_{P\theta}$ et C_{Ph} sont combinées pour donner le coefficient de puissance total, ainsi le pic négatif apparaîtra également dans le coefficient de puissance total C_p (**Figure III.8**. (c)), ce qui ne signifie pas une réduction du rendement global. Les diagrammes d'extraction d'énergie sont directement corrélés à la distribution de la pression autour du système **Figure III.9** démontre que le grand tourbillon du bord d'attaque qui apparaît à $t / T = 0,25$ représente la source qui alimente la portance pendant chaque période.

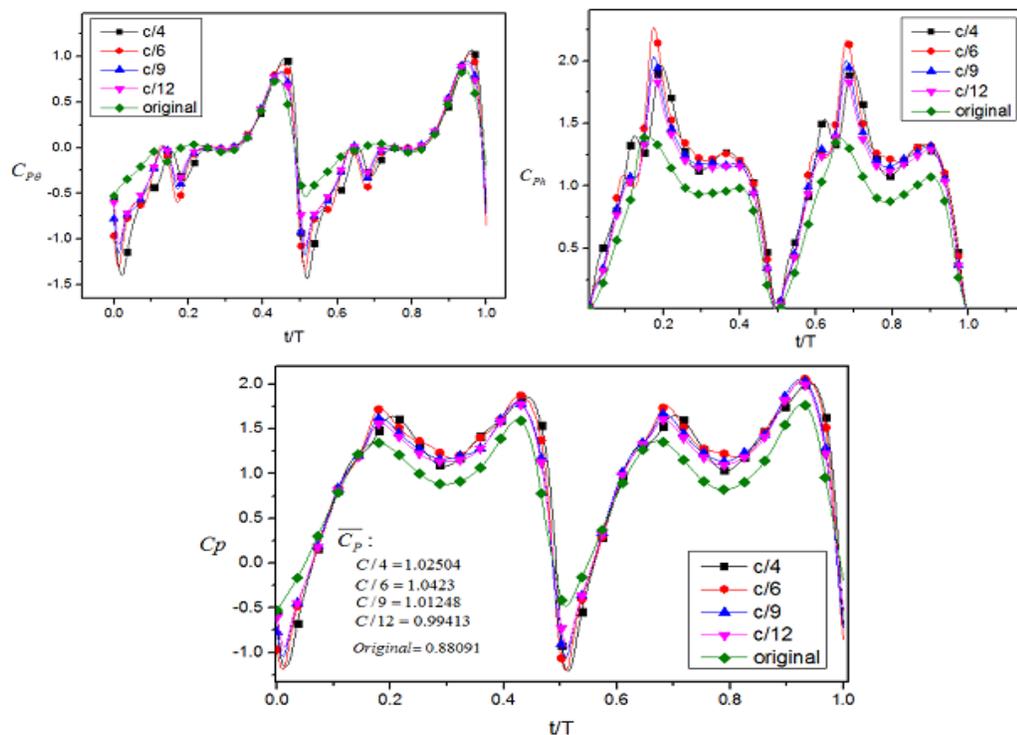


Figure.III.8.Évolution des coefficients d'extraction d'énergie (a) (C_{Ph} ; (b) $C_{P\theta}$ (c) C_p

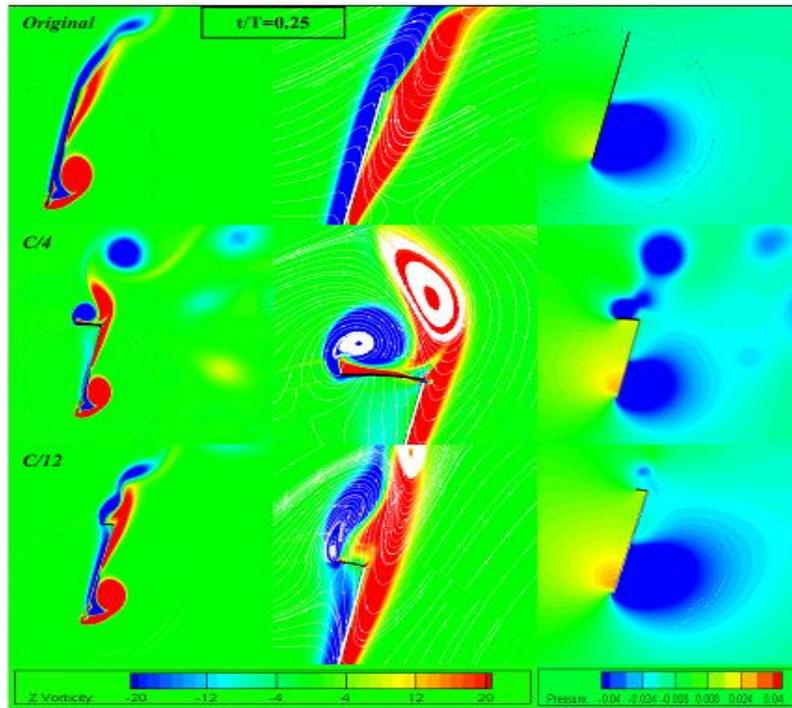


Figure.III.9. Structure vorticitaire et la pression correspond a $t/T=0.25 f^* = 0.14$ and $\theta_0 = 76.33^\circ$.

III.3.2. Effet de la position

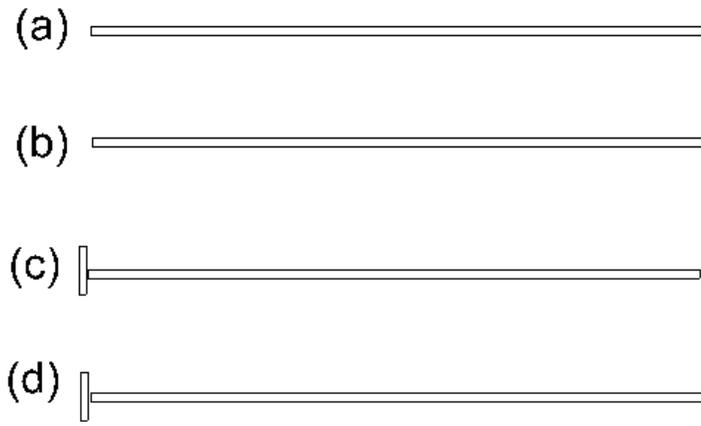


Figure.III.10. Différentes configurations proposées.

Dans cette section, l'effet de différentes configurations d'extracteur d'énergie sur le comportement des forces aérodynamiques est considéré. Un examen détaillé des forces

instantanées de portance, de traînée et de couple est présenté. De plus, les coefficients de puissance instantanés sont suivis au cours d'un cycle de battement afin de mettre en évidence la contribution de chaque coefficient dans l'efficacité globale du système.

Il est évident que pour la configuration TE, l'angle d'attaque est toujours le même que dans le cas original, ce qui signifie que le coefficient de portance ne peut être augmenté que par

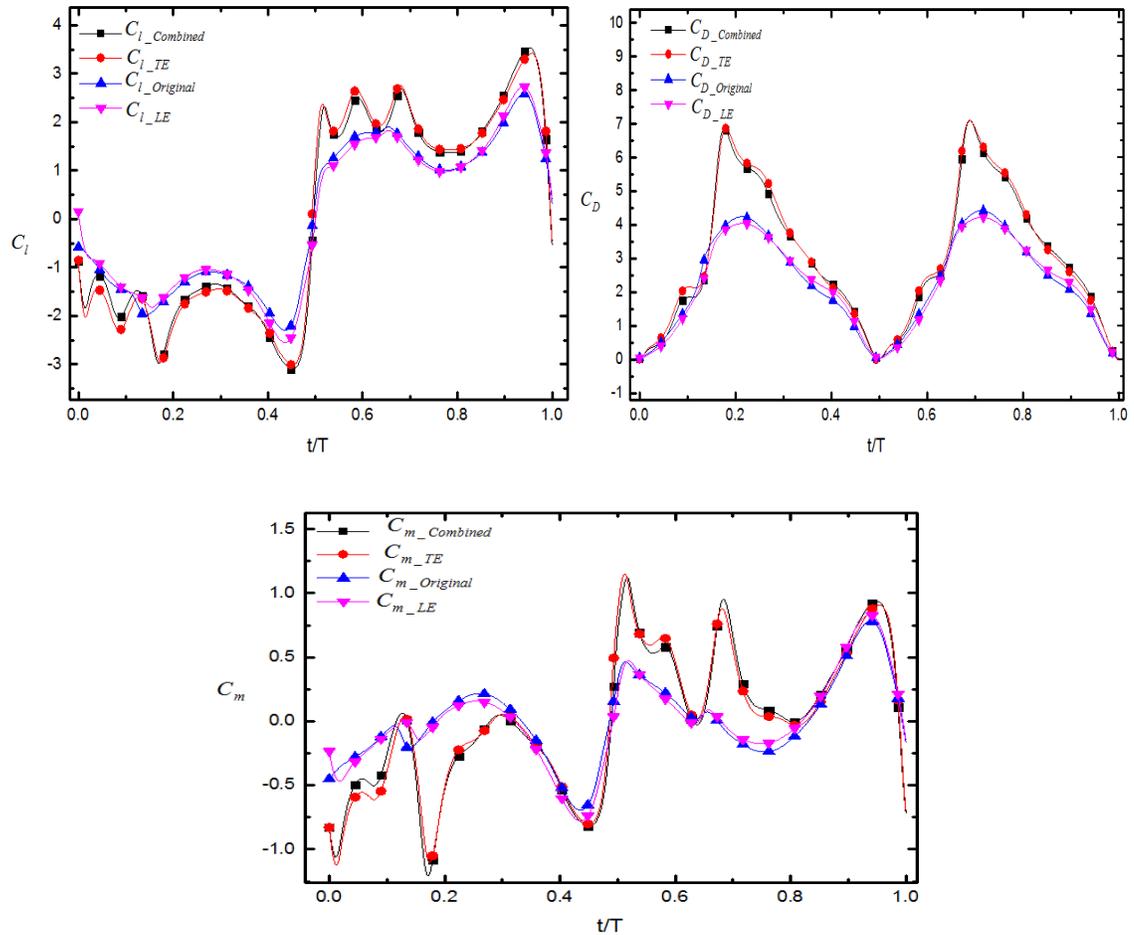


Figure.III.11. Évolution instationnaire de (a) (C_l), (b) (C_D); (c) (C_m).

Le contrôle de la TEV. Sur la **figure III.11** (c), en utilisant un volet TE, le pic de traînée augmente de 4 à 7 en raison du grand sillage en aval du volet. Le grand sillage est en outre interprété comme des pics négatifs apparaissant clairement dans les deux grandeurs C_m et $C_{P\theta}$. Rappelons que $C_{P\theta}$ a une contribution négative dans la puissance globale extraite. Ceci a révélé qu'une augmentation supplémentaire de la longueur des volets n'entraîne aucune amélioration de l'extraction d'énergie supplémentaire.

Pour la configuration du bord d'attaque, le volet du bord d'attaque semble avoir un impact négatif sur l'amélioration des performances, ce qui est dû au fait que ce volet modifie relativement l'angle d'attaque, il entre la pale dans un décrochage rapide. Ce qui produit une faible portance et des forces de traînée relativement élevées. Aucune modification claire n'est enregistrée par rapport au cas de base. Pour le cas combiné, la performance s'est encore améliorée par rapport au cas d'origine en raison de la contribution positive du volet de bord de fuite qui couvre cette perte. La conclusion à tirer de la **figure III.11** est que le contrôle du bord d'attaque devrait corriger l'angle d'attaque d'écoulement de tel sort la force de portance reste améliorée pendant le cycle de battement.

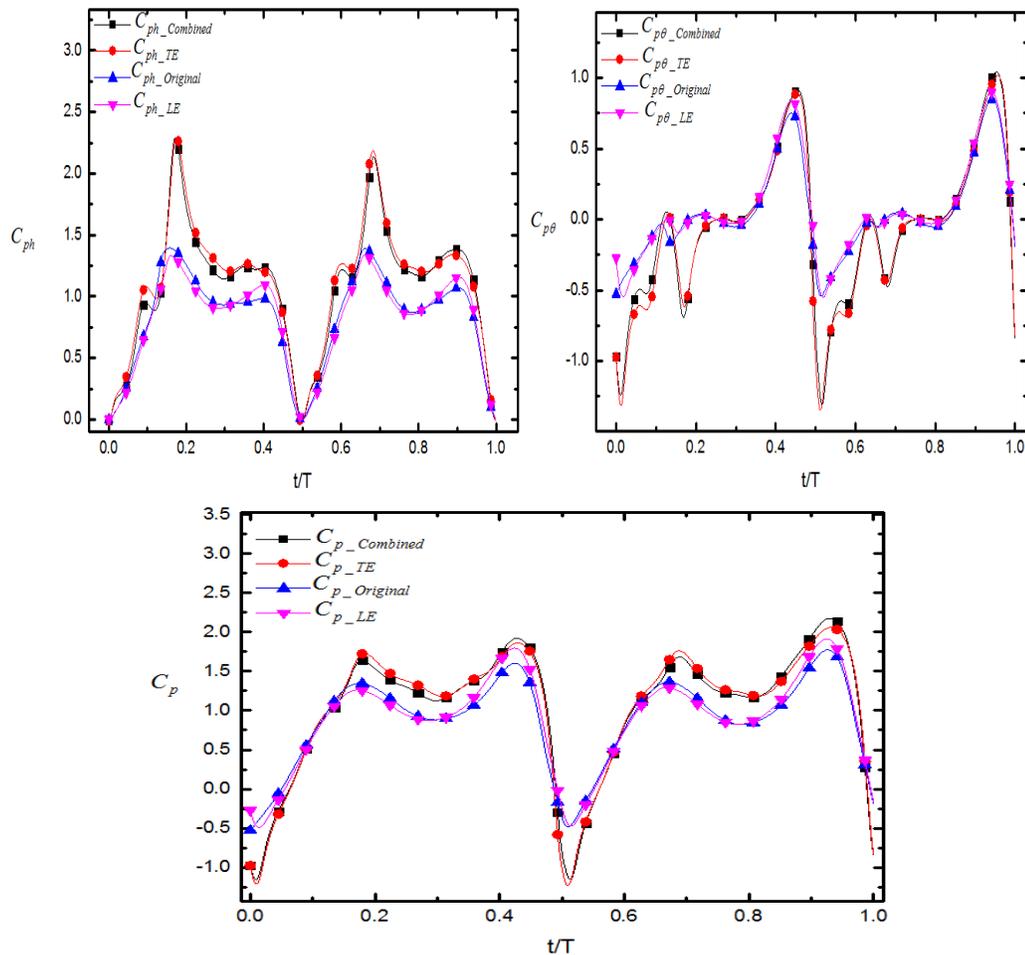
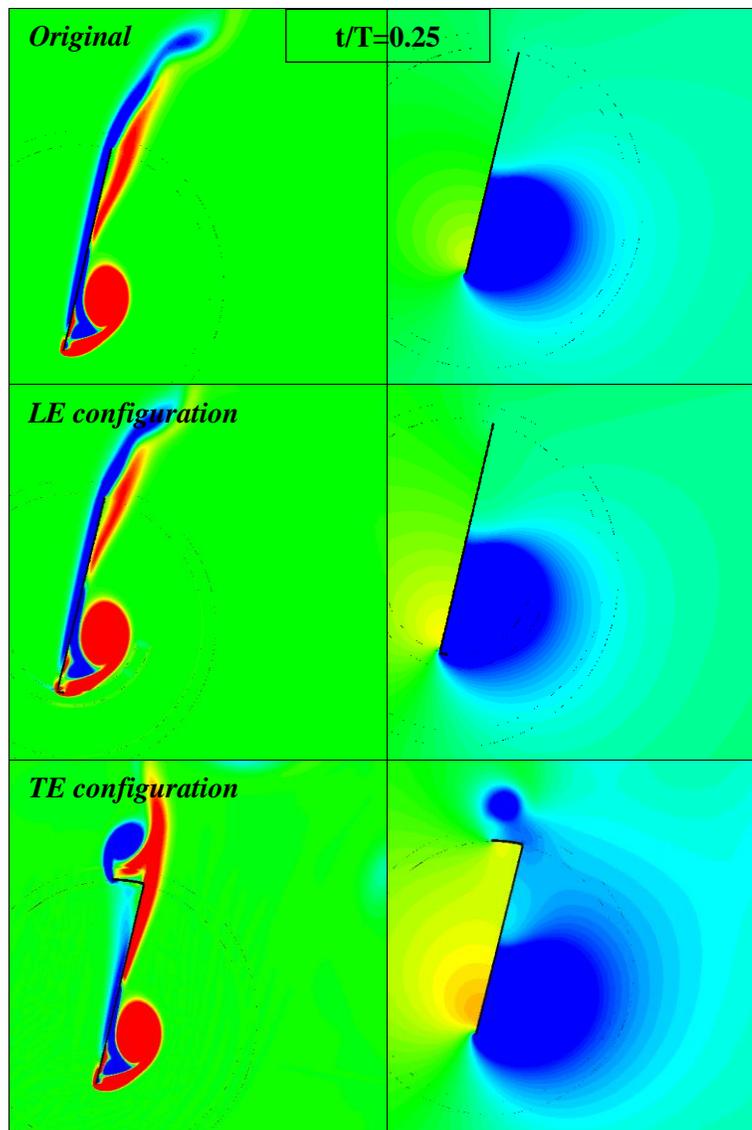


Figure.III.12 : Évolution des coefficients d'extraction d'énergie (a) (C_{ph} ; (b)

$C_{p\theta}$ (c) C_p

Typiquement, l'amélioration de la portance entraîne une augmentation notable de C_{Ph} si elle est bien synchronisée avec la vitesse de pilonnement. La **figureIII.12** (a) indique que C_{Ph} augmente de 1,3 à 2,1. On voit que pour le volet de bord de fuite et les cas de configuration combinés, C_{Ph-TE} et $C_{Ph-Combiné}$ sont supérieurs au cas d'origine pendant toutes les parties du cycle de battement, cependant la courbe de $C_{P\theta}$ indique une contribution négative pendant certaines parties du cycle de battement, en particulier à $t / T = 0,5$ lorsque l'aile battante change de direction. Les deux grandeurs $C_{P\theta}$ et C_{Ph} sont combinées pour former le coefficient de puissance total, donc le pic négatif apparaîtra également dans le coefficient de puissance total C_P (**FigureIII.12**. (c)).



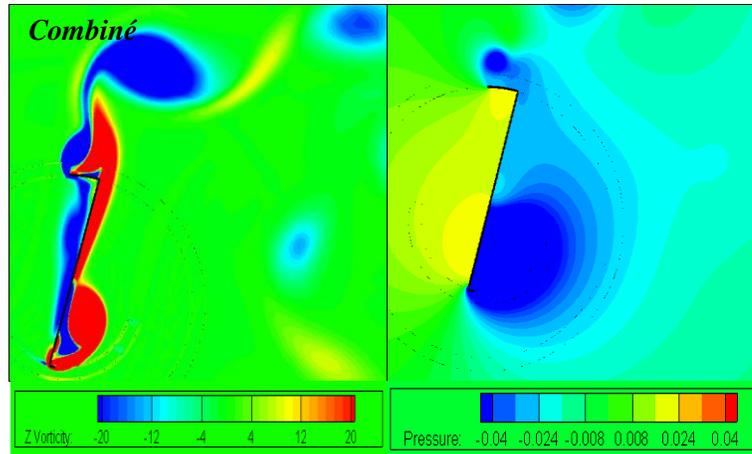


Figure.III.13. Structure vorticity pour différent configuration $af^* = 0.14$ and $\theta_0 = 76.33^\circ$.

III.3.3. Effet de fréquence réduit :

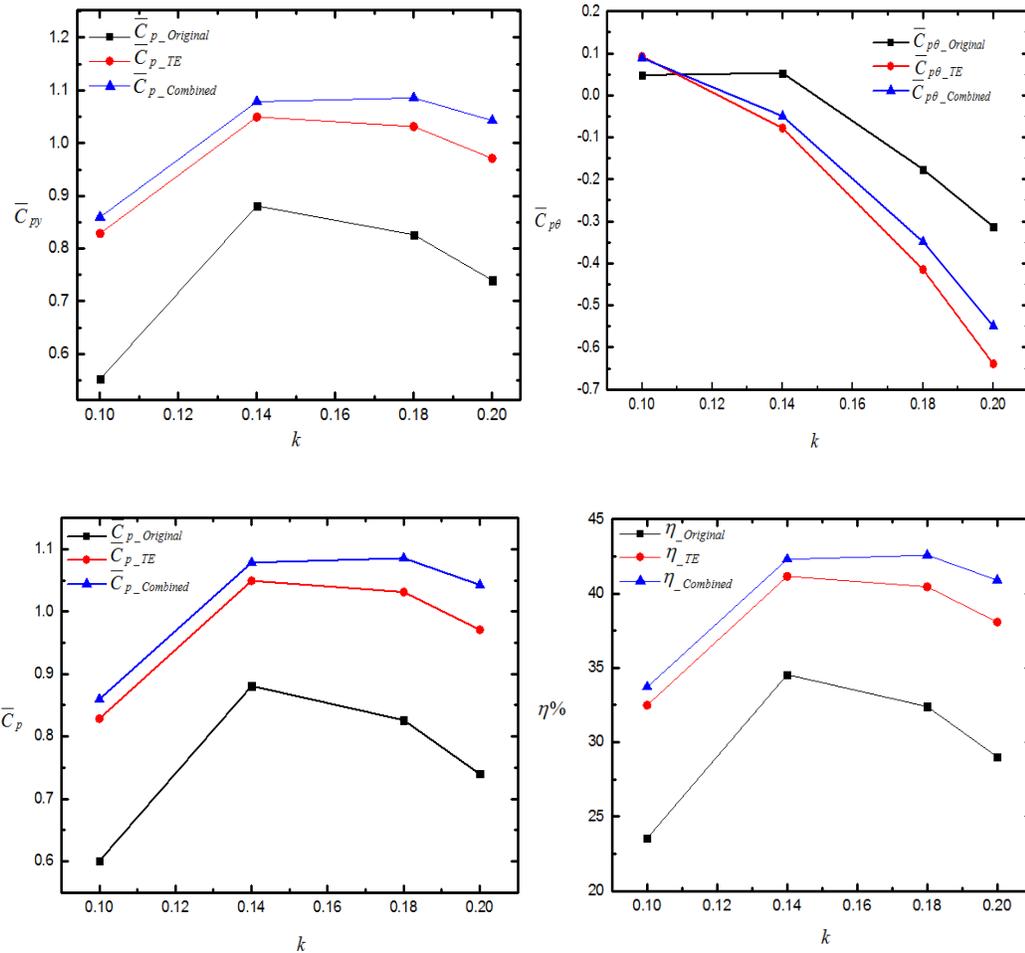


Figure.III.14: Évolution des coefficients d'extraction d'énergie moyenne (a) $(C_{P_h}$; (b) C_{P_θ} (c) C_P .

La **figure III.13** (a) à (d) montre l'effet de la fréquence réduite sur les coefficients de puissance et l'efficacité d'extraction d'énergie pour les différentes configurations proposées. Comme on peut le voir, la fréquence $k = 0,14$ est la fréquence optimale pour l'extraction d'énergie. Les contributions du mouvement de pilonnement et du mouvement de tangage sont affichées individuellement à la **Figure III.14**. Comme présenté, la valeur de C_p est beaucoup plus grande que $C_{p\theta}$, ce qui indique que le mouvement de pilonnement représente la source principale de l'énergie extraite par l'aile battante. Il est évident que la présence d'un volet oscillant peut améliorer les performances de l'extracteur. Pour la configuration combinée, le coefficient d'extraction d'énergie maximale est augmenté de 22% par rapport au cas d'origine. L'efficacité de l'extraction d'énergie indique des tendances similaires à celles de C_p .

III.4. Conclusion :

Ce chapitre montre le comportement d'un extracteur d'énergie à aile battante en présence d'un volet oscillant. On voit que la cambrure virtuelle qui est générée lorsque la position des volets est modifiée a un effet important sur l'efficacité globale du système.

On voit également que l'efficacité de l'extraction est directement corrélée au détachement tourbillonnaire et à la distribution de pression le long de la pale.

Le grand tourbillon du bord d'attaque qui apparaît à $t / T = 0,25$ représente la source qui alimente la portance pendant chaque demi cycle de battement. En outre, la synchronisation entre la force de portance et la vitesse de pilonnement est le mécanisme clé qui régit l'extraction d'énergie pendant toute la partie du cycle de battement.

Il est montré qu'un volet oscillant peut modifier le comportement de l'extracteur en corrigeant la distribution de la pression qui améliore la force de portance pendant les deux phases de mouvement, la course ascendante et la course descendante. Le pic de traînée augmente en raison du grand sillage en aval du volet.

Le grand sillage est en outre interprété comme des pics négatifs apparaissant clairement dans la puissance extraite par le mouvement de tangage.

Pour une longueur du volet de $c / 6$, le coefficient d'extraction d'énergie maximum est augmenté de 22% par rapport au cas original.

Ces visions suggèrent que d'autres investigations pourraient être effectuées, car il est tout à fait possible d'examiner la configuration actuelle dans le régime de turbulence et le nombre de Reynolds plus élevé. L'examen du concept actuel au nombre de Reynolds le plus élevé sera une prochaine étape logique.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les courants de vent et de marée ont été considérés comme des ressources renouvelables prometteuses pour l'extraction d'énergie et la production d'électricité. Les deux sources partagent de nombreuses similitudes concernant l'extraction d'énergie. Au cours des dernières décennies, l'industrie éolienne est concentrée totalement dans l'éolienne à axe horizontal comme un meilleur outil pour la production d'électricité. En base sur son efficacité et son évolutivité, cette technologie a été profondément développée. L'utilisation de la turbine à axe (TAV) vertical reste moins importante en raison de ce fait.

Récemment, l'intérêt est converti à la technologie des TAV en raison de ses avantages potentiels dans plusieurs applications aérodynamiques et hydrodynamiques. La TAV peut être une alternative efficace à la TAH en raison de sa simplicité d'installation, de son coût et de son insensibilité au sens des courants.

Dans ce mémoire, de nouvelles stratégies de contrôle d'écoulement sont proposées pour améliorer l'efficacité d'un extracteur d'énergie à aile battante. Une meilleure compréhension du comportement d'écoulement complexe à travers ce type de turbine a été achevée.

L'objectif ultime est de proposer un modèle robuste et efficace. Cet objectif a été atteint grâce à un outil de calcul qui peut fournir une description détaillée du comportement de l'écoulement et de l'ensemble des données connexes, à un temps relativement court et à un faible coût. Les équations de Navier Stokes avec un modèle de turbulence $k-\epsilon$ ont été appliquées en utilisant le logiciel de dynamique de fluide computationnel commercial ANSYS FLUENT v15.0.

Le mouvement de la turbine s'effectue à l'aide d'une stratégie de maillage dynamique, les équations régissant le mouvement de battement synchronisé sont intégrées dans une fonction définie par l'utilisateur (UDF).

On voit que l'efficacité de l'extraction est directement corrélée au détachement tourbillonnaire et à la distribution de pression le long de la pale.

Le grand tourbillon du bord d'attaque qui apparaît à $t / T = 0,25$ représente la source qui alimente la portance pendant chaque demi cycle de battement. En outre, la synchronisation entre

la force de portance et la vitesse de pilonnement est le mécanisme clé qui régit l'extraction d'énergie pendant toute la partie du cycle de battement.

Nous espérons que les modèles proposés et ses développements futurs pourront être utilisés à l'échelle commerciale pour aider à la mise en œuvre de la technologie de ce type de turbine en tant qu'un outil viable et respectueux de l'environnement pour la production d'électricité.

REFERENCES

- [1] REN21. "Renewables Global Status Report." 2014. www.ren21.net (accessed October 20, 2014).
- [2] Soueid, H., Guglielmini, L., Airiau, C., Bottaro, A., 2009. Optimization of the motion of a flapping airfoil using sensitivity functions. *Computers & Fluids* 38, 861-874.
- [3] Kinsey, T., Dumas, G., 2008. Parametric study of an oscillating airfoil in a power-extraction regime. *AIAA Journal* 46 (6), 1318–1330.
- [4] McKinney W., DeLaurier J., "The Wingmill: An Oscillating-Wing Windmill", AIAA/SERI Wind Energy Conference, Boulder, Colorado, April 9-11, États-Unis, 1981.
- [5] The Engineering Business Limited, "Research and Development of a 150 kW Tidal Stream Generator", Crown Copyright, 2002.
- [6] Site web de la compagnie PulseGeneration, <http://www.pulsegeneration.co.uk>, consulté le 20 novembre 2009.
- [7] Site web de la compagnie BioPowerSystems, <http://www.biopowersystems.com/>, consulté le 20 novembre 2009
- [8] Pascazio. M. (1995) Contribution expérimentale et numérique à l'étude (la couche limite se développant sur un profil d'aile en oscillation : phénomènes de transition et de décollement en écoulement instationnaire « Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée ».
- [9] Milton Van Dyke (1988) *An Album of Fluid Motion*. THE PARABOLIC PRESS.V2
- [10] Sébastien Bourgois (2006) étude expérimentale du décollement sur profils d'aile : analyse et contrôle « Thèse de Doctorat, Université de Poitiers ».
- [11] Dandois J. (2006) Contrôle des décollements par jet synthétique. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- [12] Gad-El-Hak M (2003) *Flow Control; passive, active, and reactive flow management*. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS ISBN 0-521-77006-8 (hb)

REFERENCES

- [13] Ahmed Z. Al-Garni (2000) Flow Control for an Airfoil with Leading-Edge Rotation: An Experimental Study. JOURNAL OF AIRCRAFT Vol. 37, No. 4, July–August.
- [14] Modi V.J. Ying, B. Yokomizo T. (1989). “Boundary Layer Control of Bluff Bodies Through Momentum Injection” SAE paper, 902225.
- [15] Ericsson L. E. (1993). “Unsteady flow separation on slender bodies at high angles of attack “Journal of Spacecraft and Rockets 30 (6), 689-695.”.
- [16] Cassel, K. W. (2001). “The effect of convective heat transfers on steady boundary-layer separation. Journal of Fluid Mechanics, 428,107-13.
- [17] Rao, D. Kariya, T. (1988). “Boundary-layer submerged vortex generators for separation control an exploratory study”. AIAA paper 88-3546.
- [18] Smith, A.M.O. (1975). “High-Lift Aerodynamics,” J. Aircraft 12, pp. 501–530.
- [19] ANSYS, Inc (2010): ANSYS Customer Training Material “ Introduction to ANSYS FLUENT”, Release 13.0, December 2010, Canonsburg, PA - USA (south of Pittsburgh).
- [20] Maître T, Amet E, Pellone C: Modeling of the low in a Darrieus water turbine: wall grid refinement analysis and comparison with experiments. Renew Energy 51(2013) 497–512.
- [21] Help ANSYS FLUENT.
- [22] Wikipédia.

Résumé :

Dans le cadre de ce mémoire, une stratégie de contrôle d'écoulement a été proposée pour l'amélioration des performances des turbines à aile battante. La stratégie a été basée sur l'utilisation d'un volet oscillant pour modifier la nature d'écoulement. Une meilleure compréhension du comportement d'écoulement complexe à travers les turbines a été achevée. L'objectif ultime est de proposer un modèle robuste et efficace de ce type des turbines. L'efficacité d'extraction d'énergie a été améliorée.

ملخص :

في هذه الأطروحة، تم اقتراح استراتيجية جديدة لمراقبة تدفق الرياح لتحسين فعالية التوربينات ذات الاجنحة الخافقة. اعتمدت الاستراتيجية على استخدام جناح إضافي متحرك لتغيير تدفق الرياح، تم التوصل إلى فهم أفضل للسلوك المعقد للجريان. كان الهدف المرجو لهذه الأطروحة هو اقتراح نموذج قوي وفعال للتوربينات ذات الاجنحة الخافقة وقد تحسنت كفاءة استخراج الطاقة بشكل ملحوظ.

Abstract:

In this thesis, a new flow control strategy is proposed to improve the power extraction efficiency of a flapping airfoil system. The strategy was based on the use of an additional oscillating flap to modify the nature of the flow. A better understanding of the complex flow behavior across the turbines has been achieved. The ultimate objective was to propose a robust and efficient model for this type of turbines. The turbines energy extraction efficiency has been effectively improved.