REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur
Et de la recherche scientifique

Université Yahia Fares de Médéa

Faculté de Technologie

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energies Renouvelables En Mécanique

Thème

Étude numérique de comportement d'un écoulement de l'eau autour d'une hydrolienne

Proposé et dirigé par :

- *Dr: Souad .TAHAR*
- *Pr : Mounir . ZIRARI*

Réalisé par:

Mr KHELIFA Abdelkader

Mr BOURENANE ILYES MED MEKKI

Promotion 2024/2025

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents.

À mes frères et mes sœurs. À toute la famille

KHELIFA. Et tous mes amis.

KHELIFA ABDELKADER

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents.

À mes frères et mes sœurs. À toute la famille

MEKKI. Et tous mes amis.

· *BOURENANE MEKKI*

Remerciements

Un grand merci au bon Dieu de nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et de savoir. Nous tenons à remercier vivement notre encadreur, ***Dr SOUAD TAHAR*** *pour son suivi, son assistance, sa confiance, ses encouragements, sa patience et son soutien favorable pour l'aboutissement de ce travail.*

On remercie vivement ***Pr Mounire ZIRARI*** *pour toute l'aide et l'assistance qu'il nous a données lors de l'élaboration de ce travail, ses conseils précieux le long de notre formation. Nous tenons aussi à lui exprimer nos profonds respects.*

Nos sincères remerciements vont également à tous les membres du jury, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

.

ملخص

لقد شهد تطبيق ديناميكيات السوائل الحسابية (CFD) على قضايا الطاقة نموًا كبيرًا في العقود الأخيرة، وخاصة في عمليات تحويل الطاقة المتجددة والتقليدية. وفي السنوات الأخيرة، ركز استخدامه لدراسة التوربينات الهيدروليكية والبحرية والمد والجزر والهيدروكينية على توصيف التدفقات المضطربة المعقدة وتحسين توقعات الأداء. تمثل محاكاة توربينات المحور الرأسي (VAT) للتطبيقات الحركية المائية تحديات حسابية كبيرة، تتعلق بشكل خاص بتفاعلات بنية السوائل والظواهر العابرة. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو التقييم المنهجي لتأثير سرعة الهجوم على الأداء الديناميكي الهوائي لتوربين بحري ثلاثي الشفرات. وللقيام بذلك، تم تنفيذ نموذج ثنائي الأبعاد باستخدام طريقة العناصر المحدودة لحل المعادلات الحاكمة وتحليل سلوك التدفق المائي حول الدوار. تم أخذ نظامين متميزين في الاعتبار، التدفق الموحد والتدفق الزاوي (الوقوع المتغير مع المكون المماسي، $\alpha = 10°$). تمت مقارنة النتائج العددية التي تم الحصول عليها، والتي تتعلق حصريًا بتكوينات الشفرة المفردة، مع بيانات التحقق التجريبية والعددية المتوفرة في الأدبيات في ظل نفس الظروف، وتتيح هذه المقارنة تقييم صحة النهج المنهجي الذي تم تطويره وقياس تأثير الانتقال من شفرة معزولة إلى تكوين ثلاثي. بفضل هذه الدراسة الأخيرة، وجد أن إدخال شفرتين إضافيتين في التكوين الثلاثي يغير بشكل كبير توزيع مجالات الضغط والسرعة حول الدوار.

الكلمات المفتاحية: CFD توربينات المد والجزر، تدفق المياه، الاضطراب

Résumé

L'application de la dynamique des fluides numérique (CFD) aux problématiques énergétiques a connu un essor significatif au cours des dernières décennies, particulièrement dans les processus de conversion des énergies renouvelables et conventionnelles. Ces dernières années, son déploiement pour l'étude des turbines hydrauliques, marines, marémotrices et hydrocinétiques s'est focalisé sur la caractérisation des écoulements turbulents complexes et l'amélioration des prédictions de performance. La simulation des turbines à axe vertical (VAT) destinées aux applications hydrocinétiques présente des défis computationnels substantiels, liés notamment aux interactions fluide-structure et aux phénomènes transitoires. L'objectif central de ce travail est d'évaluer systématiquement l'effet de la vitesse d'attaque sur les performances aérodynamiques d'une hydrolienne à trois aubes. Pour ce faire, un modèle bidimensionnel utilisant la méthode des éléments finis a été mis en œuvre pour résoudre les équations gouvernantes et analyser le comportement de l'écoulement aqueux autour du rotor. Deux régimes distincts ont été considérés, un écoulement uniforme et un écoulement angulaire (incidence variable avec composante tangentielle, $\alpha = 10°$). Les résultats numériques obtenus lesquelles concernent exclusivement des configurations à aube unique ont été comparés aux données de validation expérimentales et numériques disponibles dans la littérature dans les mêmes conditions, Cette comparaison permet d'évaluer la validité de l'approche méthodologique développée et de quantifier l'influence du passage d'une aube isolée vers une configuration tripale. Grâce à cette dernière étude, il a été constaté que l’introduction de deux pales supplémentaires dans la configuration tripale modifie significativement la distribution des champs de pression et de vitesse autour du rotor.

Mot clés : CFD, hydrolienne, Ecoulement de l’eau, Turbulence.

Abstract

The application of computational fluid dynamics (CFD) to energy issues has grown significantly in recent decades, particularly in renewable and conventional energy conversion processes. In recent years, its deployment for the study of hydraulic, marine, tidal and hydrokinetic turbines has focused on the characterization of complex turbulent flows and the improvement of performance predictions. The simulation of vertical axis turbines (VAT) for hydrokinetic applications presents substantial computational challenges, related in particular to fluid-structure interactions and transient phenomena. The central objective of this work is to systematically evaluate the effect of the attack speed on the aerodynamic performance of a three-bladed marine turbine. To do this, a two-dimensional model using the finite element method was implemented to solve the governing equations and analyze the behavior of the aqueous flow around the rotor. Two distinct regimes were considered, a uniform flow and an angular flow (variable incidence with tangential component, $\alpha = 10°$). The numerical results obtained, which exclusively concern single-blade configurations, were compared with experimental and numerical validation data available in the literature under the same conditions, This comparison makes it possible to evaluate the validity of the methodological approach developed and to quantify the influence of the transition from an isolated blade to a triple configuration. Thanks to this last study, it was found that the introduction of two additional blades in the triple configuration significantly changes the distribution of pressure and speed fields around the rotor.

Keywords: CFD, water turbine, Water flow, Turbulence.

Nomenclature

C_D	Le coefficient de traînée	
C_L	Le coefficient de portance	
F_l	force de portance	N
F_d	force de traînée	N
R_e	Nombre de Reynolds	
ϕ	Le terme du pression	
K	Energie cinétique turbulente par unité de masse	m^2/s^2
ε	Dissipation tourbillonnaire de turbulence	m^2/s^2
ρ	Masse volumique du fluide	kg/m^3
υ	Viscosité cinématique du fluide	m^2/s
S	Surface	m^2
U	Vitesse du fluide	m/s
L , D	Dimension caractéristique	M
μ	viscosité dynamique du fluide	Pa.s ou kg/m.s
P	Pression	Pa
P_∞	Pression statique	Pa
e	Epaisseur	M

Liste des tableaux

Tableau III.1. Propriétés thermo physique de l'eau à 20°c	*31*
Tableau III.2. Ecoulement autour d'une aube hydrolienne dans les mêmes conditions simulées par (Kolekar et al, 2011)	*32*
Tableau III.3. Influence de la vitesse d'attaque sur les profils de vitesse et leurs implications hydrodynamiques	*37*
Tableau III.4. Évolution des profils de pression et de leurs impacts hydrodynamiques en fonction de la vitesse d'écoulement	*42*
Tableau III.5. Synthèse des effets de la vitesse sur les performances et les phénomènes de décrochage à α=10°	*45*
Tableau III.6. Synthèse des effets de la pression à l'extrados à α=10° : phénomènes critiques et impact sur le rendement	*50*
Tableau III.7. Synthèse de l'influence de la vitesse d'attaque sur les caractéristiques hydrodynamiques et les performances de l'hydrolienne (α=0°)	*50*
Tableau III.8. Synthèse de l'influence de la vitesse d'attaque sur les caractéristiques hydrodynamiques et les performances de l'hydrolienne (α=10°)	*51*
Tableau III.9. Comparaison des performances hydrodynamiques et contraintes mécaniques entre écoulements à α=0° et α=10°	*52*

Liste de figure

Figure I.1 - Composants d'un générateur hydrolienne	*5*
Figure I.2 - Hydroliennes à écoulement libre	*5*
Figure I.3 - Hydroliennes à axe vertical	*6*
Figure I.4 - Hydrolienne à aile battante ou oscillante	*7*
Figure I.5 - Effet Venturi	*7*
Figure III.1. Domaine physique et maillage	*31*
Figure III.2. Maillage d'hydrolienne tripale	*33*
Figure III.3. Représentation spatiale de la vitesse	*35*
Figure III.4. Représentation des profils de vitesse dans les trois aubes	*36*
Figure III.5. Comparaison des profils de vitesse dans chaque aube pour les quatre vitesses	*38*
Figure III.6. Représentation spatiale de la pression	*40*
Figure III.7. Représentation des profils de la pression dans les trois aubes	*41*
Figure III.8. Représentation spatiale de champs de vitesse pour α=10°	*43*
Figure III.9. Représentation des profils de vitesse dans les trois aubes pour α=10°	*44*
Figure III.10. Comparaison des profils de vitesse dans chaque aube pour les quatre vitesses pour α=10	*46*
Figure III.11. Représentation spatiale de la pression pour α=10°	*47*
Figure III.12. Représentation des profils de la pression dans les trois aubes pour α=10°	*49*

Sommaire

Introduction Générale..... 1

Chapitre I : Étude Bibliographique

I.1 Introduction..... 3
I.2 Généralités sur les hydroliennes 3
I.2.1 Définition et principe de fonctionnement..... 3
I.2.2 Composition d'une hydrolienne 5
I.2.3 Typologie des hydroliennes 6
I.2.4 Technologies alternatives 6
I.3 Caractéristiques de l'écoulement autour des hydroliennes.....8
1.3.1 Régimes d'écoulement.....8
I.3.2 Zone de sillage (wake) 8
I.3.3 Interaction fluide-structure.....9
I.4 Méthodes d'étude des hydroliennes.....9
I.4.1 Approche expérimentale.....9
I.4.2 Approche numérique (CFD).....10
I.5 Travaux de recherche antérieurs.....11
I.5.1 Études expérimentales et prototypes.....11
I.5.2 Études expérimentales pionnières.....12
I.5.3 Modélisation numérique et simulation CFD.....12
I.5.4 Études sur les fermes hydroliennes et approches multi-échelles.....13
I.6 Optimisation des performances et design.....13
I.6.1 Optimisation de la géométrie des pales.....13
I.6.2 Optimisation des configurations multi-turbines.....14
I.6.3 Systèmes de contrôle et surveillance.....14
I.7 Facteurs influents dans la simulation.....14
I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie hydrolienne.....16
I.9 Lacunes et justification de l'étude.....17
I.10 Conclusion.....18

Chapitre II : Modélisation mathématique et résolution numérique

II.1 Introduction 19
II.2 Modélisation mathématique de l'écoulement 19
II.2.1 Équations caractéristiques du mouvement du fluide 19
II.2.2 Modélisation de la turbulence 21
II.2.2.1 Modèle K-ε 21
II.2.2.2 Modèle SST K-ω 22
II.2.2.3 Modélisation de la turbulence en proche paroi : approche haute et bas Reynolds..... 23

II.2.2.4 Le modèle à haut Reynolds …….....24
II.3 Modélisation de l'hydrolienne…….....26
II.3.1 Théorie de la quantité de mouvement axiale (BEM)…….....26
II.3.2 Forces sur les pales……26
II.4 Résolution numérique……...…28
II.4.1 Discrétisation par la méthode des éléments finis…….....28
II.4.1.1 Principe de la méthode des éléments finis…….....28
II.4.1.2 Formulation faible des équations…….....28
II.4 Conclusion……..…….....29

Chapitre III : ***Résultats et discussions***
III.1 Introduction …….....30
III.2 Étude numérique de comportement d'un écoulement de l'eau autour d'une aube hydrolienne……..30
III.2.1 Description du domaine d'application ….....30
III.2.2 Propriétés physiques du fluide de travail.....31
III.2.3 Validation du modèle.....32
III.3 Étude numérique de comportement d'un écoulement de l'eau autour d'une hydrolienne tripale……...32
III.3.1 Un écoulement uniforme……...…35
III.3.2 Un écoulement angulaire……...…42
III.4 Comparaison des performances de l'hydrolienne tripale pour différentes vitesses d'attaque…….....50
III.4.1 Écoulement uniforme (α=0°)……..50
III.4.2 Écoulement angulaire (α=10°)…….....51
III.4.3 Analyse comparative des régimes……52
III.5 Conclusion……..……53

Conclusion générale……..…..…..54

Référence

Introduction Générale

Introduction Générale

Face à la nécessité croissante de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de limiter la dépendance aux énergies fossiles, le recours aux sources d'énergie renouvelable s'impose comme une alternative durable et stratégique. Parmi ces sources, l'énergie hydrocinétique issue du mouvement naturel de l'eau dans les rivières, les fleuves, les estuaires ou les courants marins représente un potentiel considérable encore largement sous-exploité. L'hydrolienne, dispositif destiné à capter cette énergie, constitue une solution prometteuse pour la production d'électricité verte, notamment dans les zones isolées ou difficiles d'accès.

Dans ce contexte, l'étude du comportement de l'écoulement de l'eau autour d'une hydrolienne revêt une importance cruciale. Une compréhension fine des phénomènes hydrodynamiques permet non seulement d'optimiser la forme des pales et le rendement global du système, mais également de garantir la fiabilité et la durabilité de l'installation. Cependant, la complexité des écoulements autour de turbines à axe vertical, notamment la présence de régimes transitoires, de turbulence et d'interactions fluide-structure, rend indispensable le recours à des outils de simulation avancés, notamment la dynamique des fluides numérique (CFD).

La question de recherche de ce travail réside donc dans la difficulté de caractériser précisément l'influence des paramètres d'écoulement, notamment la vitesse d'attaque, sur les performances aérodynamiques d'une hydrolienne à trois pales. En effet, la variabilité de l'incidence au cours de la rotation du rotor entraîne des comportements complexes qu'il est nécessaire de modéliser et d'analyser en détail.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer numériquement l'impact de la vitesse d'attaque sur le comportement de l'écoulement et les performances d'une hydrolienne. Pour ce faire, un modèle bidimensionnel basé sur la méthode des éléments finis a été développé, permettant de résoudre les équations gouvernantes et de simuler les régimes d'écoulement autour des pales, tant en écoulement uniforme qu'en écoulement angulaire. Une comparaison des résultats obtenus avec les données issues de la littérature permet de valider la méthodologie adoptée et d'examiner l'effet du passage d'une pale isolée à une configuration tripale.

Afin de répondre à cette question, le présent manuscrit est articulé autour de trois parties :

- La première partie, est concernée à présenter une étude bibliographique approfondie sur les hydroliennes, leur principe de fonctionnement, les types de turbines existantes, ainsi que les caractéristiques de l'écoulement qui les entoure. Il passe en revue les approches expérimentales et numériques utilisées dans la littérature pour analyser et modéliser leur comportement. Cette base théorique permettra de justifier et orienter la méthodologie adoptée dans les chapitres suivants.
- La deuxième partie, est dédiée à la présentation de la modélisation mathématique et la résolution numérique de l'écoulement autour d'une hydrolienne, en s'appuyant sur les équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible turbulent. La méthode des éléments finis, combinée à des modèles de turbulence adaptés, est mise en œuvre dans ANSYS APDL pour simuler les conditions d'écoulement.
- Enfin, la troisième et dernière partie du manuscrit est consacrée à la présentation du modèle numérique, du fluide utilisé, ainsi qu'aux principaux résultats de simulation et à leur interprétation. Cette section a pour objectif d'évaluer de manière systématique l'influence de la vitesse d'attaque sur les performances aérodynamiques d'une hydrolienne à trois pales. Deux régimes d'écoulement distincts sont analysés :
  – Un **écoulement uniforme**, où la vitesse incidente est constante et perpendiculaire aux pales, pour des valeurs de V = 1,5 m/s, 2 m/s, 4 m/s et 6 m/s ;
  – Un **écoulement angulaire**, caractérisé par une incidence variable avec une composante tangentielle fixée à $\alpha = 10°$, étudié également pour les mêmes vitesses d'écoulement (V = 1,5 m/s, 2 m/s, 4 m/s et 6 m/s).
- Les principaux résultats de cette étude sont synthétisés dans la conclusion générale, et des perspectives pour continuer ce travail sont évoquées.

Chapitre I - Étude Bibliographique

I.1 Introduction

Dans un contexte mondial marqué par la transition énergétique et la lutte contre le changement climatique, les énergies marines renouvelables, notamment l'énergie hydrolienne, attirent de plus en plus l'attention des chercheurs et des industriels. Les hydroliennes permettent de convertir l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux en électricité, offrant une alternative propre et durable aux sources conventionnelles. La compréhension du comportement de l'écoulement autour d'une hydrolienne constitue un enjeu crucial pour optimiser sa conception, améliorer son rendement et garantir sa durabilité. Ce chapitre vise à présenter une revue bibliographique détaillée des études relatives à l'écoulement autour des hydroliennes, en s'appuyant sur les travaux expérimentaux, théoriques et numériques existants.

I.2 Généralités sur les hydroliennes

I.2.1 Définition et principe de fonctionnement

Une hydrolienne est un capteur d'énergie cinétique des courants de marée qui permet de produire l'énergie électrique via un alternateur. Son concept progresse très rapidement vue la grande similarité qu'elle présente avec la technologie éolienne. Malgré cette grande similarité, les caractéristiques de l'environnement marin font que sa constitution diffère un peu de celle de l'éolienne.

Plus précisément, une hydrolienne est une turbine sous-marine (ou subaquatique, ou posée sur l'eau et à demi immergée) qui utilise l'énergie cinétique des courants marins ou de cours d'eau, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique de l'air. La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique, qui est alors transformée en énergie électrique par un alternateur.

Le fonctionnement d'une hydrolienne repose sur la conversion de l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement (en l'occurrence l'eau) en énergie mécanique, puis en énergie électrique à l'aide d'un générateur. Ce principe est similaire à celui des éoliennes, avec la différence majeure que l'eau, étant environ 800 fois plus dense que l'air, permet une production d'énergie plus importante à des vitesses de fluide plus faibles. La puissance extraite d'un écoulement par

une hydrolienne dépend directement de la vitesse du courant, de la densité du fluide et de la surface balayée par les pales.

Une hydrolienne est une machine qui doit répondre aux critères suivants :

- Se maintenir en place et résister aux forces hydrodynamiques du courant
- Turbiner au mieux le flux d'eau du flot et du jusant pour produire de l'énergie mécanique
- Transformer l'énergie mécanique en énergie électrique
- Exporter la production électrique vers le réseau à terre
- Ne nécessiter qu'un minimum de maintenance
- Gêner au minimum la navigation et le milieu vivant
- Produire une énergie à un coût acceptable

I.2.2 Composition d'une hydrolienne

Généralement, une hydrolienne est composée de plusieurs éléments essentiels :

- ✓ **La turbine** Portant plusieurs pales (deux à dix), elle capte l'énergie cinétique et se met en rotation sous l'effet des courants.
- ✓ **Le générateur** Il est composé de :

- Le rotor, c'est l'axe sur lequel sont fixées les pales. Il est conçu de manière à tourner toujours dans le même sens.
- L'alternateur, c'est le générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique fournie par la turbine au rotor en énergie électrique.
- Le flotteur, c'est un élément réglable permettant d'obtenir un meilleur rendement.
- Le stabilisateur, c'est le système qui permet à l'hydrolienne d'extraire l'énergie dans les deux sens.

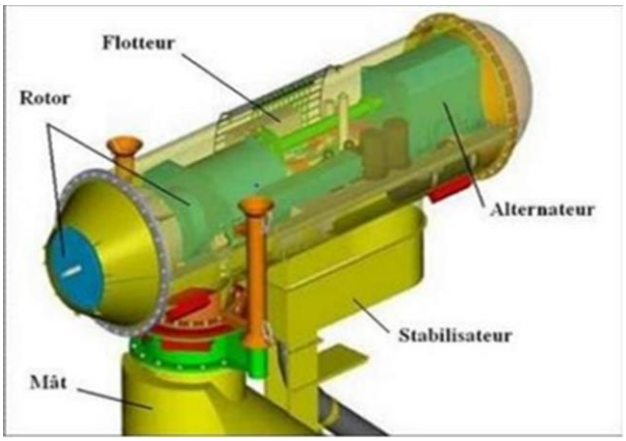


Figure I.1. *Composants d'un générateur hydrolienne* [1].

I.2.3 Typologie des hydroliennes

Les hydroliennes se divisent généralement en deux grandes catégories selon l'orientation de leur axe de rotation :

a- **Hydroliennes à axe horizontal (HAHT)** Leur fonctionnement est similaire à celui des éoliennes. Ce type est le plus développé sur le plan industriel. Les hydroliennes à écoulement libre sont des hélices entraînées par les forces de portance dont l'axe de rotation est parallèle au flux incident. Ces turbines sont dites aussi horizontales, comme leur axe de rotation. Ce type d'hydrolienne est le plus répandu car elle provient de la transposition pour les courants des éoliennes classiques.



Figure I.2. *Hydroliennes à écoulement libre* [2].

b- **Hydroliennes à axe vertical (VAHT)** Elles présentent l'avantage de fonctionner indépendamment de la direction du courant, ce qui les rend intéressantes dans les environnements instables. La turbine ou l'hydrolienne à axe vertical est composée de pales entraînées par les forces de portance autour d'un axe de rotation perpendiculaire au flux incident. Ces turbines sont dites aussi verticales lorsque l'axe de rotation se trouve perpendiculaire au sol.

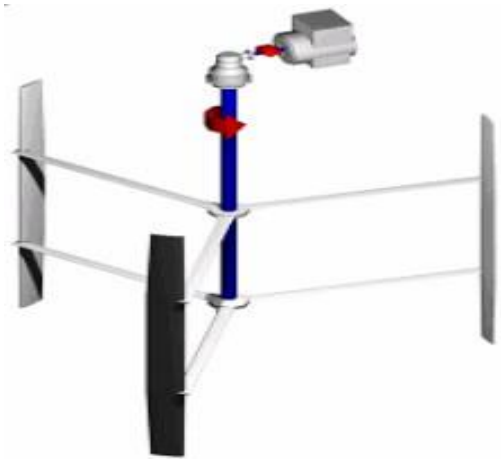


Figure I.3. Hydroliennes à axe vertical [2].

I.2.4 Technologies alternatives

Outre les configurations classiques horizontales et verticales, d'autres technologies innovantes ont été développées :

a- **Hydrolienne à aile battante ou oscillante** La technologie à aile battante est généralement un trépied fixé sur le fond marin dont les pales font face aux courants. Les oscillations du bras entraînent le pompage du fluide pour générer de l'énergie électrique. Le principal avantage de ce système est l'absence quasi-totale du risque de cavitation dû à la forme des pales.



Figure I.4. Hydrolienne à aile battante ou oscillante [2].

b- Hydrolienne utilisant des roues à aubes flottantes Les hydroliennes utilisant une roue à aubes flottantes sont très proches de la forme conventionnelle des moulins à eaux. À mi- immergées, elles sont équipées d'un cylindre étanche qui tourne sous l'effet des courants. Ce mouvement entraîne un générateur électrique qui peut être placé soit sur le côté soit à l'intérieur du cylindre.

c- Mode canalisé - Turbines à effet Venturi Ces hydroliennes exploitent l'énergie marine suivant « l'effet venturi », c'est-à-dire l'accélération d'un fluide dans une conduite dont le diamètre se rétrécit. Ainsi une petite turbine peut être utilisée pour produire une quantité plus grande d'énergie.

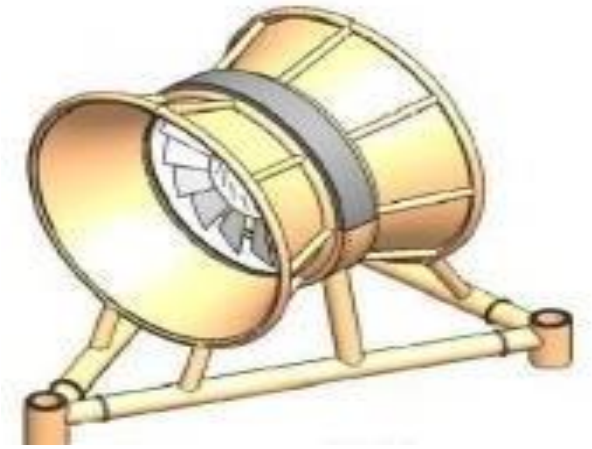


Figure I.5. Effet Venturi [2].

I.3 Caractéristiques de l'écoulement autour des hydroliennes

1.3.1 Régimes d'écoulement

Le comportement de l'écoulement dépend principalement du nombre de Reynolds, qui est généralement élevé dans les cas réels, indiquant un régime turbulent. Ce type d'écoulement est marqué par la présence de zones de recirculation, de cisaillement, de détachement de couche limite et de sillage.

Le nombre de Reynolds, défini par $Re = \rho VD/\mu$ (où ρ est la densité du fluide, V la vitesse caractéristique, D la dimension caractéristique et μ la viscosité dynamique), permet de caractériser le régime d'écoulement. Pour les hydroliennes opérant dans des conditions réelles, ce nombre est typiquement supérieur à 10^6, confirmant la nature turbulente de l'écoulement.

La transition entre les régimes laminaire et turbulent est cruciale pour la compréhension des phénomènes aérodynamiques. En régime laminaire, l'écoulement est ordonné et les lignes de courant sont parallèles. En régime turbulent, l'écoulement devient chaotique avec des fluctuations de vitesse et de pression importantes.

I.3.2 Zone de sillage (wake)

Le sillage en aval des pales est un phénomène critique qui impacte non seulement le rendement de l'hydrolienne considérée, mais également celui des turbines situées en aval dans les fermes hydroliennes. Ce sillage est caractérisé par une perte d'énergie, une augmentation de la turbulence, et un déficit de vitesse.

Le développement du sillage peut être divisé en plusieurs zones distinctes :

- **Zone proche** : Immédiatement en aval du rotor, caractérisée par de forts gradients de vitesse.
- **Zone de transition** : Où les effets visqueux commencent à homogénéiser l'écoulement.
- **Zone lointaine** : Où le sillage tend vers un profil auto similaire.

La récupération du sillage est un processus lent qui peut s'étendre sur plusieurs diamètres de rotor en aval de la turbine. Cette caractéristique est particulièrement importante pour la conception de fermes hydroliennes, où l'espacement entre les turbines doit être optimisé pour minimiser les interactions négatives.

I.3.3 Interaction fluide-structure

Les forces exercées par l'écoulement sur les pales peuvent provoquer des vibrations, des déformations, voire des phénomènes de cavitation, nécessitant une étude couplée fluide-structure dans certains cas.

La cavitation est un phénomène particulièrement préoccupant dans le domaine des hydroliennes. Elle se produit lorsque la pression locale chute en dessous de la pression de vapeur saturante de l'eau, entraînant la formation de bulles de vapeur. L'implosion de ces bulles peut causer des dommages importants aux pales et générer du bruit et des vibrations.

Les forces hydrodynamiques agissant sur les pales comprennent :

- **Forces de portance** : Perpendiculaires à la direction de l'écoulement relatif.
- **Forces de traînée** : Parallèles à la direction de l'écoulement relatif.
- **Forces de poussée axiale** : Dirigées selon l'axe du rotor.
- **Moment de basculement** : Tendant à incliner la nacelle.

I.4 Méthodes d'étude des hydroliennes

I.4.1 Approche expérimentale

Les essais expérimentaux en bassin ou en canal hydraulique constituent une méthode classique d'analyse du comportement hydrodynamique des hydroliennes. Ces essais permettent de valider les performances des prototypes et d'obtenir des mesures précises de vitesse, de pression ou de rendement.

Les techniques de mesure expérimentales couramment utilisées incluent :

Vélocimétrie par images de particules (PIV) Cette technique optique permet de mesurer les champs de vitesse instantanés dans un plan de l'écoulement. Elle repose sur l'illumination de

particules ensemençant l'écoulement par un plan laser et sur l'acquisition d'images successives permettant de calculer les déplacements des particules.

Vélocimétrie laser Doppler (LDV) La LDV permet des mesures ponctuelles très précises de la vitesse en un point de l'écoulement. Cette technique est particulièrement adaptée pour l'étude détaillée des profils de vitesse dans le sillage.

Mesures de pression Des capteurs de pression peuvent être installés sur les pales pour mesurer les distributions de pression et calculer les coefficients de portance et de traînée.

Mesures de couple et de poussée Des balances dynamométriques permettent de mesurer directement les efforts exercés sur la turbine.

Toutefois, ces approches présentent plusieurs limitations : elles sont coûteuses, nécessitent des installations lourdes, et les conditions expérimentales ne reproduisent pas toujours fidèlement les conditions réelles. Les effets d'échelle, notamment liés au nombre de Reynolds, peuvent être difficiles à respecter dans les installations expérimentales.

I.4.2 Approche numérique (CFD)

La mécanique des fluides numérique (CFD) est devenue un outil incontournable dans l'étude des écoulements autour des hydroliennes. Elle permet de simuler de manière fine les champs de vitesse, de pression, les tourbillons et les interactions complexes sans recourir systématiquement à des essais physiques.

Équations gouvernantes Les équations de Navier-Stokes régissant l'écoulement sont résolues à l'aide de différentes méthodes numériques (volumes finis, éléments finis, etc.). Ces équations expriment la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Modélisation de la turbulence Pour modéliser la turbulence, plusieurs modèles sont utilisés selon le niveau de précision souhaité :

- **RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)** avec les modèles k-ε, k-ω : Ces modèles moyennent les équations de Navier-Stokes et introduisent des modèles de fermeture pour les tensions de Reynolds. Ils sont relativement peu coûteux en temps de calcul mais peuvent manquer de précision pour certains phénomènes.

- **SST (Shear Stress Transport)** pour mieux capturer les phénomènes de décollement : Ce modèle combine les avantages des modèles k-ε et k-ω et est particulièrement adapté pour les écoulements avec décollement.
- **LES (Large Eddy Simulation)** pour une modélisation plus précise, bien que plus coûteuse : Cette approche résout directement les grandes structures turbulentes et modélise uniquement les plus petites échelles. Elle fournit des résultats plus détaillés mais nécessite des ressources de calcul importantes.

Techniques spécifiques pour les turbines Des techniques spécifiques comme le Sliding Mesh ou le maillage overset permettent de représenter le mouvement de rotation des pales. Le Sliding Mesh divise le domaine de calcul en zones fixes et mobiles, tandis que le maillage overset utilise des maillages superposés permettant un mouvement relatif.

I.5 Travaux de recherche antérieurs

De nombreuses études ont été publiées sur le comportement hydrodynamique des hydroliennes, contribuant à l'avancement de la compréhension de ces systèmes complexes. Ces travaux de recherche menés dans ce domaine se regroupent principalement autour de plusieurs axes scientifiques et technologiques :

I.5.1 Études expérimentales et prototypes

De nombreux chercheurs et industriels ont développé des modèles réduits ou des prototypes à échelle réelle afin de tester les performances des hydroliennes dans des environnements contrôlés (canaux d'essai) ou naturels. Ces études expérimentales visent à :

- Évaluer la puissance extraite en fonction de la vitesse du courant
- Caractériser les forces hydrodynamiques agissant sur les pales
- Optimiser les formes de turbines (axiales, transverses, hélicoïdales, etc.)

Parmi les travaux notables, on peut citer les projets européens HYDROGENIE**,** SEAREV, ou encore Sabella D10, l'une des premières hydroliennes immergées à grande échelle en France.

I.5.2.Études expérimentales pionnières

[3] ont mené des études expérimentales fondamentales sur les caractéristiques du sillage d'une hydrolienne à axe horizontal. Leurs travaux ont permis d'établir les premières corrélations pour la récupération du sillage et ont mis en évidence l'importance des effets de blocage dans les canaux d'essai.

[4] ont comparé les résultats expérimentaux et numériques de performances d'hydroliennes, établissant des méthodes de validation croisée entre approches expérimentales et numériques. Leurs travaux ont souligné l'importance de la précision des modèles numériques pour prédire correctement les performances.

[5] démontrent expérimentalement les avantages de performance du déploiement d'hydroliennes côte à côte pour exploiter les effets d'interférence constructive, en utilisant deux turbines de 1,2 m de diamètre espacées de 1/4 de diamètre. La performance maximale des turbines jumelles s'est produite à un ratio de vitesse de pointe plus élevé que pour une seule turbine.

I.5.3 Modélisation numérique et simulation CFD

La simulation numérique, notamment via la mécanique des fluides numérique (CFD), joue un rôle clé dans la compréhension du comportement de l'écoulement autour des hydroliennes. Ces travaux permettent de :

- Visualiser les structures de sillage (wake) derrière les turbines
- Étudier les interactions fluide-structure
- Comparer les performances entre différents designs de rotors
- Tester virtuellement les effets de conditions marines variables (houle, turbulence, etc.)

Les approches utilisent diverses méthodes comme RANS, LES ou la méthode des volumes finis, souvent avec les logiciels ANSYS Fluent**,** OpenFOAM**,** ou STAR-CCM+.Études sur les hydroliennes à axe vertical

[6] ont réalisé une série de travaux exhaustifs sur les hydroliennes à axe vertical, incluant les interactions entre turbines dans des configurations multi-dispositifs. Ces études ont révélé des

phénomènes d'interférences constructives et destructives entre turbines adjacentes, ouvrant la voie à l'optimisation des fermes hydroliennes.

I.5.4 Études sur les fermes hydroliennes et approches multi-échelles

[7] ont étudié les pertes énergétiques et les mécanismes de récupération dans les champs d'hydroliennes. Leurs travaux ont contribué à la compréhension des effets de sillage à l'échelle des fermes et ont proposé des stratégies d'optimisation de l'espacement entre turbines.

[8] utilise un modèle CFD actuator-line RANS pour simuler les charges sur les hydroliennes marémotrices dans des configurations compactes. Les résultats CFD confirment que l'écoulement de contournement accéléré entre deux turbines proximales en eau peu profonde peut améliorer la production d'énergie d'une turbine située en aval.

[9] combinent la simulation FVCOM pour le champ lointain et l'analyse CFD des sillages locaux pour étudier la conception de parcs de turbines. L'approche intègre diverses méthodes d'optimisation pour étudier la distribution spatiale de l'énergie marémotrice.

I.6 Optimisation des performances et design

D'autres recherches sont orientées vers l'optimisation des performances, via :

- La géométrie des pales (profil, pas variable)
- Les configurations multi-turbines (fermes hydroliennes)
- L'intégration de systèmes de régulation ou de contrôle actif

L'objectif est de maximiser le rendement tout en minimisant les coûts de maintenance et les impacts environnementaux.

I.6.1 Optimisation de la géométrie des pales

[10] ont exploré les avantages du pas variable (blade pitch control), permettant une meilleure adaptation aux variations de vitesse de courant.

[11] ont développé des méthodes d'optimisation numérique de pales à l'aide de méthodes paramétriques (Bézier, B-splines) pour maximiser la production énergétique.

I.6.2 Optimisation des configurations multi-turbines

[12] ont mené une étude expérimentale et numérique de l'effet d'espacement entre hydroliennes sur les performances globales.

[13] ont réalisé des simulations de fermes alignées et décalées pour évaluer l'impact sur les rendements et les efforts mécaniques.

[14] ont développé des méthodes d'optimisation des fermes avec prise en compte des contraintes environnementales et de l'écoulement résiduel.

I.6.3 Systèmes de contrôle et surveillance

[15] ont développé un contrôle actif de l'angle de calage selon les charges hydrodynamiques.

[16] ont conçu des systèmes de surveillance embarqués pour anticiper les surcharges et optimiser la maintenance préventive.

[17] ont travaillé sur l'intégration de capteurs intelligents pour contrôle adaptatif et auto-optimisation des hydroliennes.

I.7 Facteurs influents dans la simulation

Les résultats d'une simulation numérique dépendent d'un ensemble de paramètres critiques, parmi lesquels :

Paramètres géométriques

- La géométrie des pales et le nombre de pales : La forme des profils, l'angle de calage, la distribution de corde et de vrillage influence directement les performances
- Le diamètre du rotor et la hauteur de moyeu : Ces dimensions affectent la surface de captage et les pertes en bout de pale

Conditions d'écoulement

- La vitesse du courant et les conditions aux limites : Le profil de vitesse d'entrée, les conditions de turbulence, et les conditions de sortie doivent être représentatifs

- La profondeur d'immersion et la topographie locale : La proximité du fond et de la surface libre modifie l'écoulement
- Les effets de stratification et de houle : Dans l'environnement marin réel, ces phénomènes peuvent affecter les performances

Paramètres numériques

- La densité du maillage autour des pales et dans le sillage : Un maillage trop grossier peut ne pas capturer les phénomènes importants
- Le pas de temps utilisé dans les simulations transitoires : Le critère CFL doit être respecté pour assurer la stabilité numérique
- Les schémas de discrétisation spatiale et temporelle : Le choix des schémas influence la précision et la stabilité

Modélisation physique

- Le choix du modèle de turbulence : Adapté au type d'écoulement étudié
- La prise en compte des effets de compressibilité : Généralement négligeables pour les hydroliennes
- La modélisation des interactions fluide-structure : Nécessaire pour certaines applications

Un mauvais choix de ces paramètres peut entraîner des erreurs significatives dans la prédiction du rendement ou du comportement de l'écoulement. Une étude de sensibilité est souvent nécessaire pour s'assurer de la convergence des résultats.

I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie hydrolienne

Avantages de l'énergie hydrolienne :

- **Disponibilité continue** : Production électrique constante grâce au mouvement incessant des courants marins, avec une meilleure prévisibilité que le solaire ou l'éolien.
- **Absence de pollution** : Aucune émission de gaz à effet de serre, pas de bruit, ni de nuisances pour l'environnement aquatique.
- **Énergie renouvelable et inépuisable** : Exploite uniquement l'énergie des courants marins sans consommer de ressources.
- **Impact visuel minimal** : Les dispositifs étant immergés, ils ne nuisent pas au paysage.
- **Rendement élevé** : Environ 80 % de l'énergie cinétique est convertie en électricité, bien plus que le charbon ou le pétrole (~30 %).
- **Densité énergétique élevée** : L'eau étant 800 fois plus dense que l'air, les hydroliennes peuvent être plus petites que les éoliennes pour la même puissance.

Inconvénients de l'énergie hydrolienne :

- **Pannes et entretien** : Corrosion, tempêtes…. , nécessitent une maintenance sous-marine régulière, donc coûteuse.
- **Impact sur la vie marine** : Risques pour les poissons et perturbations possibles des habitats sous-marins (même si potentiellement limités par une bonne conception).
- **Coûts initiaux élevés** : Installation et raccordement sous-marin très coûteux avec un retour sur investissement long.
- **Défis technologiques** : Problèmes de corrosion, d'étanchéité et de résistance mécanique nécessitant des matériaux spécifiques.

I.9 Lacunes et justification de l'étude

Malgré l'abondance des études précédentes, certaines lacunes persistent dans la compréhension et la modélisation des hydroliennes :

Lacunes scientifiques

- Difficulté de prédire précisément le sillage dans des configurations réalistes, particulièrement en présence d'effets environnementaux complexes
- Compréhension limitée des interactions entre turbines dans les fermes hydroliennes de grande taille
- Modélisation insuffisante des effets instationnaires liés aux variations de courant et aux phénomènes de houle

Limitations techniques

- Coût computationnel élevé des modèles transitoires détaillés (ex. LES), limitant leur utilisation en conception industrielle
- Absence de validation pour certaines topologies ou conditions environnementales spécifiques
- Difficultés de couplage entre les différentes échelles (pale, turbine, ferme)

Verrous technologiques

- Optimisation des systèmes de contrôle pour maximiser la capture d'énergie
- Développement de matériaux résistants à la corrosion et à la fatigue
- Amélioration des systèmes de maintenance préventive

I.10 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les concepts fondamentaux liés à l'écoulement autour des hydroliennes ainsi que les différentes approches utilisées pour leur modélisation. Les recherches sur les hydroliennes ont permis de franchir d'importantes étapes vers la maturité technologique de cette énergie renouvelable. Toutefois, des défis subsistent, notamment en matière de durabilité en environnement marin, d'optimisation des rendements dans des conditions complexes et de réduction des coûts. L'avenir du secteur dépendra de la poursuite des recherches interdisciplinaires, de la coopération internationale et du soutien aux démonstrateurs industriels. Il en ressort que la simulation numérique constitue un outil puissant pour l'analyse des performances hydrodynamiques, à condition de bien maîtriser les paramètres de modélisation. Cette revue bibliographique servira de base à l'approche méthodologique développée dans les chapitres suivants.

Chapitre II : Modélisation mathématique et résolution numérique

II.1 Introduction

L'étude numérique du comportement d'un écoulement de l'eau autour d'une hydrolienne nécessite une approche méthodique impliquant la modélisation mathématique des phénomènes physiques et leur résolution numérique. Ce chapitre présente les équations fondamentales régissant l'écoulement autour de l'hydrolienne, les hypothèses simplificatrices adoptées, ainsi que la méthode de résolution numérique basée sur la méthode des éléments finis.

II.2 Modélisation mathématique de l'écoulement

II.2.1 Équations caractéristiques du mouvement du fluide

L'écoulement de l'eau autour de l'hydrolienne est gouverné par les équations de Navier-Stokes pour un fluide newtonien incompressible. Ces équations expriment la conservation de la masse et de la quantité de mouvement :

- **Équation de continuité :**

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad \text{II.1}$$

- **Équations de conservation de la quantité de mouvement :**

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)+v\nabla^2 u+f_x \qquad \text{II.2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+v\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)+v\nabla^2 v+f_y \qquad \text{II.3}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)+v\nabla^2 w+f_z \qquad \text{II.4}$$

Où :

- u, v, w : composantes de la vitesse selon les axes x, y, z respectivement.
- p : pression.
- ρ : densité du fluide (eau).
- ν : viscosité cinématique.
- f_x, f_y, f_z : forces volumiques externes.

➢ **Nombres adimensionnels**

- **Nombre de Reynolds** est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser le régime d'écoulement d'un fluide (laminaire, transitoire ou turbulent). Il compare les forces d'inertie aux forces visqueuses dans un écoulement.

$$\mathbf{Re} = \frac{\boldsymbol{UL}}{\boldsymbol{v}} \qquad \textbf{II.5}$$

Où

- U est la vitesse caractéristique (m/s),
- L la longueur caractéristique (diamètre du rotor) (m),
- $\boldsymbol{v}$ la viscosité cinématique du fluide (Pa.s ou kg/m.s).

- **Nombre de Froude** est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides et en hydraulique pour caractériser le régime d'écoulement d'un fluide, en particulier dans les écoulements à surface libre (canaux, rivières, vagues, etc.).

Le nombre de Froude est défini comme le rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité

$$\mathbf{Fr} = \frac{\boldsymbol{V}}{\sqrt{\boldsymbol{gL}}} \qquad \textbf{II.6}$$

Où :

- V : vitesse caractéristique de l'écoulement (m/s)
- g : accélération due à la gravité (9,81 m/s)
- L : longueur caractéristique (par exemple, la profondeur hydraulique pour un canal)

II.2.2 Modélisation de la turbulence

La modélisation de la turbulence propose une procédure de calcul des quantités de la turbulence dans le but de boucler le système. Il existe deux classes principales de modèles :

- La première classe est celle des modèles à viscosité turbulente lors desquels des tenseurs des contraintes turbulentes sont évaluées en fonction du tenseur des déformations. L'équation est généralement d'une proportionnalité simple, avec une " viscosité " turbulente telle que vous pouvez la calculer d'une manière plus ou moins sophistiquée, telle que constante ou combinée d'autres quantité transportée.
- La seconde classe est celle des modèles aux tensions de Reynolds, pour lesquels on résout une équation de transport pour chacune des composantes du tenseur des contraintes turbulentes (ce qui ajoute donc 6 inconnues au modèle). On présentera ici un modèle relativement courant basée sur une hypothèse de viscosité turbulente, le modèle à deux équations de transport développé par Launder et Spalding qui a été le plus largement testé et utilisé.

II.2.2.1 Modèle K-ε

Ce modèle a été présenté au début des années 1970 par W.P. Jones et B.E. Launder, puis les constantes ont été déterminées par B.E. Launder et D. Spalding. Un des avantages de cette méthode est la prise en compte de la variabilité spatiale de l'agitation turbulente, et sa simplicité de mise en œuvre. Il s'avère être un des modèles les plus répandus dans les applications pratiques à l'usage de l'ingénieur (écoulements dans des conduites par exemple). Utilisé en dehors d'écoulements cisailles simples pour lesquels il fut initialement conçu, il conduit à des résultats qui, sans être toujours quantitativement corrects, restent le plus souvent qualitativement représentatifs. Le modèle de fermeture K-ε est l'un des plus utilisé dans le monde industriel. La viscosité turbulente est donnée par l'expression :

$$\tau_0 = \frac{K}{\varepsilon} \qquad \text{II.7}$$

et aboutit à la forme isotrope de la viscosité turbulente :

$$u_t = c_u \frac{K^2}{\varepsilon} \qquad \text{II.8}$$

Où $C_u = 0.009$ Loi logarithmique en paroi

L'énergie cinétique de la turbulence k et son taux de dissipation ε sont déterminés par des équations de transports où la diffusion visqueuse est négligée :

$$\frac{DK}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{v_t}{\partial_\varepsilon}\frac{\partial K}{\partial x_i}\right) + p_k - \varepsilon$$

$$\frac{DK}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{v_t}{\partial_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right) + c_{\varepsilon 1} p_k \frac{\varepsilon}{K} - c_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{K}$$

$$P_K = v_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

II.2.2.2 Modèle SST K-ω

Le modèle de turbulence SST k-ω, développé par **Menter en 1994**, est conçu pour offrir une meilleure précision dans la modélisation des écoulements turbulents, notamment ceux présentant des séparations de flux induites par des variations de pression. Il s'agit d'un modèle hybride, qui combine les points forts de deux approches classiques : le modèle k-ω et le modèle k-**ε**.
Concrètement, le modèle k-ω est utilisé dans les régions proches des parois, là où les effets visqueux sont dominants. Cette approche est particulièrement intéressante car elle ne nécessite aucune fonction d'amortissement pour gérer les effets de la paroi. En revanche, dans les zones éloignées des parois, où l'écoulement devient plus libre, le modèle bascule progressivement vers une formulation k-ε, mieux adaptée à ce type de régime.

Cette transition se fait de manière continue grâce à une fonction de mélange, assurant une compatibilité entre les deux modèles.

Par ailleurs, ce modèle s'appuie sur le principe proposé par Bradshaw, selon lequel la contrainte de cisaillement turbulent est proportionnelle à l'énergie cinétique turbulente, ce qui améliore la représentation du comportement réel de l'écoulement.

L'un des grands avantages du modèle SST k-ω est sa capacité à prévoir avec précision les zones de séparation du flux, ce qui est crucial dans des domaines comme l'aéronautique ou la mécanique des fluides appliquée.

Les équations gouvernant ce modèle combinent les équations du transport de l'énergie cinétique turbulente (k) et de la fréquence spécifique de turbulence (ω), modifiées pour tenir compte des effets de cisaillement. Les équations finales sont les suivantes :

$$\frac{\partial(p \times K)}{\partial t} + \bar{U}_j \times \frac{\partial(p \times K)}{\partial x_j} = \tau_{ij} \times \frac{\partial \bar{U}}{\partial x_j} - B^* \times p \times \omega \times K + \frac{\partial}{\partial x}\left[(\mu + \sigma_K \times \mu 1) \times \frac{\partial K}{\partial x_i}\right] \quad \text{II.9}$$

K représente l'énergie cinétique du mouvement turbulent

$$\frac{\partial(p \times K)}{\partial t} + \bar{U}_j \times \frac{\partial(p \times K)}{\partial x_j} = \frac{\mu}{\mu_t}\tau_{ij} \times \frac{\partial \bar{U}}{\partial x_j} - B \times p \times \omega^2 \times K + \frac{\partial}{\partial x}\left[(\mu + \sigma_\omega \times \mu 1) \times \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + 2(1 - F_1) \times p \times \sigma_{\omega^2} \times \frac{1}{\omega} \times \frac{\partial K}{\partial X_i} \times \frac{\partial K}{\partial X_j} \quad \text{II.10}$$

Les constantes dans le modèle SST K-ω sont calculées comme suit :

Si φ est une constante dans le modèle SST K-ω, φ1 et φ2 sont des constantes dans les modèle K-ω et K-ε, respectivement, alors

$$\varphi = F_1 \times \varphi + (1 - F_1) \times \varphi_2 \quad \text{II.11}$$

Les constantes pour K-ω sont : σK1=0.85 ; σω1=0.5 ; β1=0.075 ; β*=0.09 ; a1=0.31 ; K=0.41.

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma\omega_2 K^2}{\sqrt{B^*}} \quad \text{II.12}$$

Les constantes pour K-ε sont : σ K 2 =1.0 ; σω2 =0.856 ; β2=0.0828 ; β*=0.09 ;βK1=0.075.

$$\gamma_1 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma\omega_2 K^2}{\sqrt{B^*}} \quad \text{II.13}$$

τ_{ij} est donnée par l'expression suivante :

$$\tau_{ij} - \rho \times \bar{U}_i \bar{U}_j = -\frac{2}{3} \times \rho \times K \times \delta_{ij} + \mu_i \times \left[\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial X_i}\right] \quad \text{II.14}$$

II.2.2.3 Modélisation de la turbulence en proche paroi : approche haute et bas Reynolds

Dans le cadre de la simulation des écoulements turbulents, la modélisation de la couche limite proche des parois représente un enjeu majeur. Les modèles dits **"haut Reynolds"**, comme le modèle standard k-ε, ne sont pas conçus pour décrire correctement la sous-couche visqueuse, où les effets de la viscosité sont prédominants. Afin d'éviter un maillage extrêmement fin dans cette zone, on fait appel à des lois de paroi (*wall functions*), qui constituent des expressions analytiques permettant d'approcher le comportement de l'écoulement sans le résoudre explicitement.

Ces lois, généralement établies pour des écoulements stationnaires sur une plaque plane, incluent :

- Une loi logarithmique pour la vitesse,
- Une loi similaire pour la température,
- Une loi en 1/y pour la dissipation de l'énergie turbulente (ε).

Elles sont intégrées sur la première cellule en paroi et appliquées quel que soit le contexte local de l'écoulement. Cela soulève des interrogations quant à leur validité dans des situations complexes telles que :

- La présence de forces volumiques importantes (ex. : effets de flottabilité),
- Des gradients de pression adverses,
- Des effets de courbure significatifs.

En alternative, il existe une seconde approche : celle des modèles bas Reynolds. Ces modèles intègrent des fonctions d'amortissement en proche paroi, permettant une résolution directe de la sous-couche visqueuse, sans recours à une loi de paroi. Cela impose toutefois :

- Un raffinement très important du maillage dans la couche limite (avec des $y^+<1$),
- Une modification des équations gouvernant k et ε pour prendre en compte les effets visqueux.

Si cette méthode permet une description plus fidèle du champ turbulent en proche paroi, elle entraîne également une augmentation significative du coût numérique, particulièrement à haut nombre de Reynolds (typiquement 10^4 à 10^5), où l'amincissement de la couche limite exige un nombre très élevé de mailles. Bien que les modèles bas Reynolds soient disponibles depuis longtemps, leur mise en œuvre reste délicate et plus contraignante sur le plan numérique.

II.2.2.4 Le modèle à haut Reynolds :

Le modèle à haut Reynolds, aussi appelé modèle k-ε, est l'un des plus répandus en mécanique des fluides, notamment pour la modélisation des écoulements turbulents. Il présente l'avantage d'être relativement simple à mettre en œuvre, puisqu'il ne nécessite que deux équations supplémentaires pour décrire les effets de la turbulence.

Cependant, comme tout modèle simplifié, il repose sur des hypothèses et des constantes empiriques. Ces constantes, établies à partir d'expériences spécifiques, sont généralement celles proposées par Jones et Launder en 1974, qui ont largement influencé le développement de ce modèle.

Un des inconvénients notables de ce modèle est qu'il ne peut pas être utilisé directement près des parois, où les effets visqueux dominent. Pour contourner cette limitation, on l'associe généralement

à une loi de paroi, ce qui évite de devoir simuler précisément la zone proche de la paroi, tout en gardant un bon niveau de précision global.

Malgré ses limites, ce modèle reste un outil précieux, surtout dans un cadre industriel où l'on cherche souvent un bon compromis entre précision et coût de calcul. Il est donc largement utilisé, comme en témoignent de nombreuses études dans la littérature scientifique.

Densité d'air

$$\rho = \frac{P_a}{RT_a} \qquad \textbf{II.15}$$

Coefficient de pression réel

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V^2} \qquad \textbf{II.16}$$

Fluide idéal théorie

$$\rho = p\infty + \frac{1}{2}\rho V^2 - 2\rho V^2 \sin^2\theta \qquad \textbf{II.17}$$

Coefficient de pression idéal

$$C_p = 1 - 4sin^2\theta \qquad \textbf{II.18}$$

Avec :

P_a = pression atmosphérique

T_a = Température ambiant

R = Constante universelle des gaz

P = Pression mesurée

P∞ = Pression statique

II.3 Modélisation de l'hydrolienne

II.3.1 Théorie de la quantité de mouvement axiale (BEM)

La méthode BEM (Blade Element Momentum) combine la théorie de la quantité de mouvement et l'analyse des éléments de pale :

Facteur d'induction axiale :

$$a = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \quad \textbf{II.19}$$

Coefficient de poussée :

$$C_t = 4a(1-a) \quad \textbf{II.20}$$

Coefficient de puissance :

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad \textbf{II.21}$$

II.3.2 Forces sur les pales

Calcul des coefficients

Formules clés :

- **Coefficient de portance :** (noté C_l en anglais *lift coefficient*) est un nombre sans dimension utilisé en aérodynamique pour quantifier la portance générée par un corps, comme une aile d'avion, en fonction de sa forme, de son angle d'attaque et des conditions d'écoulement du fluide (comme l'air).

$$\boldsymbol{C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S}} \quad \textbf{II.22}$$

où :

- F_l = force de portance (en newtons, N)
- ρ = masse volumique du fluide (en kg/m³)
- v = vitesse de l'écoulement (en m/s)
- S = surface de référence (en m², souvent la surface alaire pour une aile)

- **Coefficient de trainée :** (noté C_d) est une grandeur sans dimension utilisée en mécanique des fluides pour quantifier la résistance aérodynamique ou hydrodynamique d'un objet en mouvement dans un fluide (comme l'air ou l'eau).

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S} \qquad \textbf{II.23}$$

où :

- F_d : force de traînée (résistance opposée par le fluide, en newtons N),
- ρ : masse volumique du fluide (en kg/m³),
- V : vitesse relative de l'objet par rapport au fluide (en m/s),
- S : surface de référence (en m²), souvent la surface frontale ou la surface projetée perpendiculaire à l'écoulement.

Force de portance par unité de longueur :

$$\partial L = \frac{1}{2}\rho V^2 C_1 c \qquad \textbf{II.24}$$

Force de traînée par unité de longueur :

$$\partial D = \frac{1}{2}\rho V^2 C^d c \qquad \textbf{II.25}$$

Où :

- C_l, C^d : coefficients de portance et de traînée
- c : corde du profil

II.4 Résolution numérique

II.4.1 Discrétisation par la méthode des éléments finis

II.4.1.1 Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis constitue l'approche numérique adoptée pour la résolution des équations différentielles partielles régissant l'écoulement. Cette méthode consiste à :

1. Diviser le domaine de calcul en éléments géométriques simples (tétraèdres, hexaèdres)
2. Approximer les variables inconnues par des fonctions d'interpolation polynomiales
3. Transformer les équations différentielles en un système d'équations algébriques
4. Résoudre le système linéaire résultant

II.4.1.2 Formulation faible des équations

La formulation faible des équations de Navier-Stokes est obtenue par application de la méthode de Galerkin. Pour l'équation de quantité de mouvement, on obtient :

$$\int \Omega \left[\frac{\partial u_i}{\partial t \cdot wi} + u_j\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\cdot wi + \upsilon\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j}\right) - p\left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j}\right)\right] d\Omega = \int \Gamma\, ti \cdot wi\, d\Gamma \qquad \textbf{II.26}$$

Où w_i représentent les fonctions de pondération et ti les contraintes imposées sur les frontières.

Discrétisation spatiale : Les variables de vitesse et de pression sont approximées par des fonctions d'interpolation :

$$\mathbf{u} = \overline{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{u}' \qquad \textbf{II.27}$$

$$\mathbf{p}=\overline{\boldsymbol{p}} + \boldsymbol{p}' \qquad \textbf{II.28}$$

$$\underline{\underline{u}} \approx \sum N_i p_i \qquad \textbf{II.29}$$

$$\underline{\underline{p}} \approx \sum M_i p_i \qquad \textbf{II.30}$$

Discrétisation temporelle : Un schéma implicite d'Euler est utilisé pour la dérivée temporelle:

$$\frac{\boldsymbol{\partial u}}{\boldsymbol{\partial t}} \approx \frac{(\boldsymbol{un+1-un})}{\boldsymbol{\Delta t}} \qquad \textbf{II.31}$$

II.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté la modélisation mathématique complète de l'écoulement autour d'une hydrolienne, depuis les équations fondamentales de Navier-Stokes. La méthode des éléments finis, associée aux modèles de turbulence appropriés, constitue un outil puissant pour l'analyse détaillée des phénomènes complexes mis en jeu. La stratégie de maillage et les procédures de validation garantissent la fiabilité des résultats obtenus, permettant ainsi une compréhension approfondie du comportement de l'écoulement et de ses interactions avec l'hydrolienne.

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Introduction

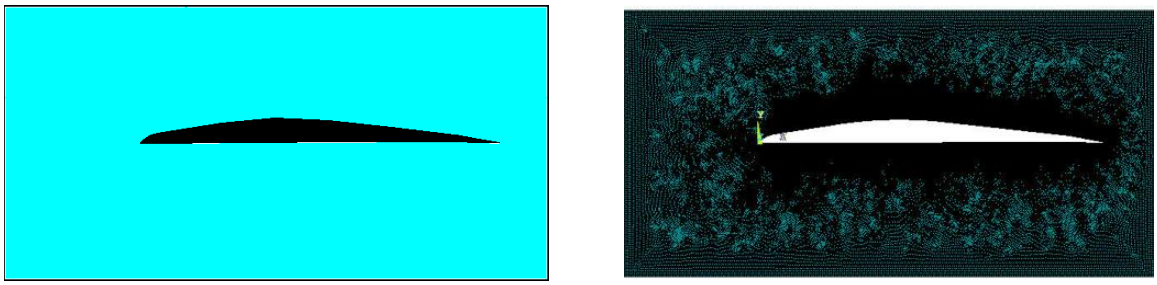
Ce chapitre est consacré à l'étude numérique de l'écoulement autour d'une aube d'hydrolienne. L'objectif principal est de simuler et d'analyser les phénomènes hydrodynamiques qui interviennent lors du fonctionnement de ces machines, en s'appuyant sur des outils de calcul avancés et des conditions de fonctionnement réalistes. Pour cela, une modélisation en deux dimensions a été réalisée, en tenant compte des propriétés thermo-physiques de l'eau et des paramètres opératoires caractéristiques d'un site hydrolien typique. Le domaine physique étudié, le maillage employé, ainsi que les conditions aux limites sont décrits en détail, afin d'assurer la reproductibilité et la fiabilité des résultats.

III.2 Étude numérique de comportement d'un écoulement de l'eau autour d'une aube hydrolienne

III.2.1 Description du domaine d'application

La première figure (a) illustre le domaine physique du problème étudié. Ce domaine représente l'espace réel dans lequel se déroule le phénomène à simuler, par exemple l'écoulement d'un fluide autour d'un objet. Le domaine physique est défini par ses frontières, qui correspondent aux limites géométriques du problème (parois, obstacles, entrée et sortie du fluide, etc.). Il s'agit donc de la représentation continue et réelle du système, avant toute discrétisation ou modélisation numérique.

La seconde figure (b) présente le maillage appliqué sur ce domaine physique. Le maillage consiste à diviser le domaine continu en un ensemble d'éléments finis (cellules ou mailles), permettant la résolution numérique des équations physiques. Les éléments du maillage sont de formes quadrilatères en 2D selon la méthode utilisée. Un raffinement local du maillage est souvent appliqué près des parois ou des zones présentant de fortes variations pour augmenter la précision des calculs



(a) **(b)**

le domaine physique du problème étudié

le maillage appliqué sur ce domaine physique

Figure III.1. Domaine physique et maillage.

III.2.2 Propriétés physiques du fluide de travail

Les propriétés thermo physiques d'eau utilisée dans les simulations de l'écoulement d'un fluide autour d'une aube hydrolienne sont énumérées au Tableau III.1. Afin de simuler l'écoulement du fluide, les conditions suivantes ont été considérées :

- La vitesse est 2m/s
- Pression : Pression atmosphérique
- Pas de temps : 0.1s
- Le nombre d'itérations par étape était 20.
- La solution est faite en 2D.
- Le nombre total des nœuds est 152559 nœuds.

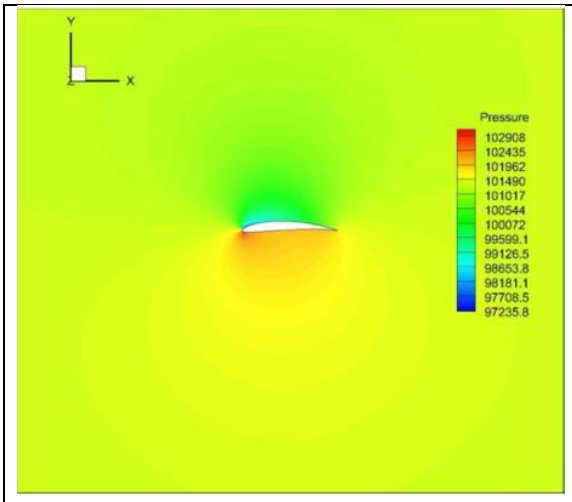
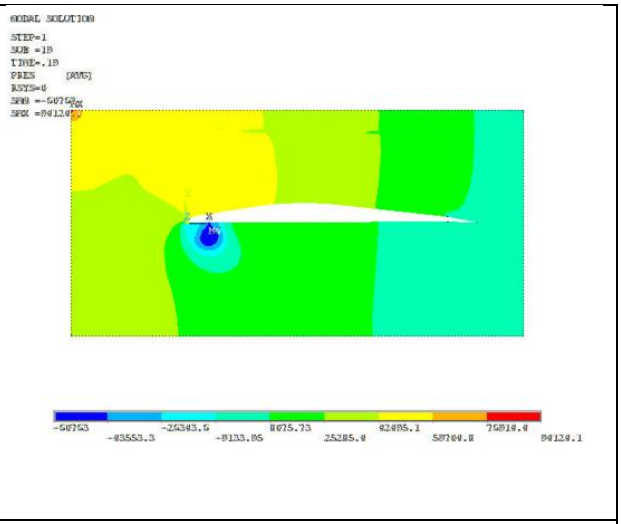
Paramètre	Eau
Conductivité thermique [W/(m·K)]	**0.598**
Chaleur spécifique [kJ/(kg·K)]	**4182**
Density [kg/m3]	**998.2**
Viscosité dynamique [Pa·s]	**1.002 E-3**

Tableau III.1. Propriétés thermo physique de l'eau à 20 ^{o}c.

III.2.3 Validation du modèle

Les résultats affichés dans le tableau III.2 montrent que la simulation numérique permet d'obtenir une bonne concordance avec les données expérimentales et la littérature. Ce résultat permet de s'assurer que la simulation numérique reproduit fidèlement le comportement physique réel de l'écoulement autour d'une aube d'hydrolienne

Tableau III.2. Ecoulement autour d'une aube hydrolienne dans les mêmes conditions simulées par (Kolekar et al, 2011**)**

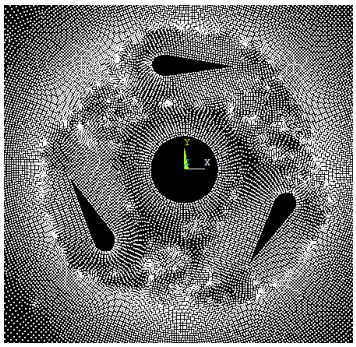
	
a. **Kolekar et al. 2011[18]**	**b. Travail actuel**

III.3 Étude numérique de comportement d'un écoulement de l'eau autour d'une hydrolienne tripale

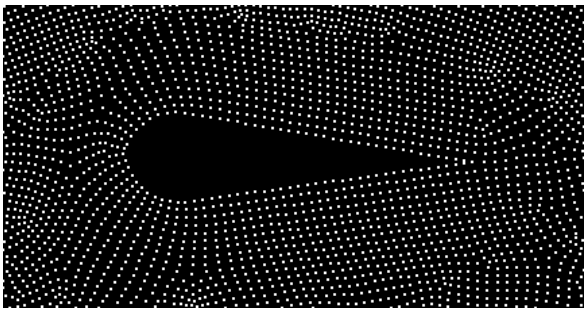
Dans cette section, nous proposons de simuler et d'analyser le comportement de l'écoulement de l'eau autour d'une hydrolienne à trois pales, afin d'évaluer l'influence de la vitesse d'attaque sur ses performances aérodynamiques. Deux régimes d'écoulement distincts sont considérés :

– Un écoulement uniforme**,** où la vitesse incidente est constante et perpendiculaire aux pales, avec des valeurs de vitesse fixées à V = 1,5 m/s, 2 m/s, 4 m/s et 6 m/s ;
– Un écoulement angulaire**,** caractérisé par une vitesse d'incidence oblique, comprenant une

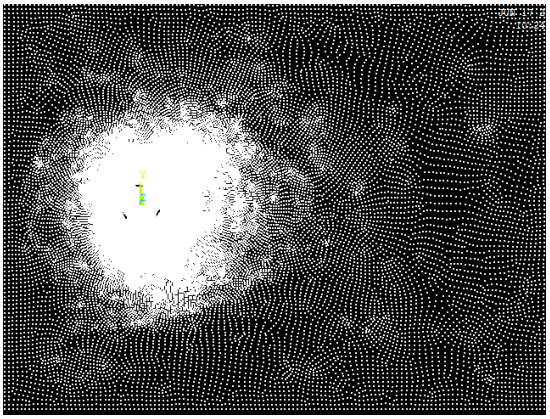
composante tangentielle correspondant à un angle d'attaque α = 10°, étudié également pour les mêmes vitesses d'écoulement (V = 1,5 m/s, 2 m/s, 4 m/s et 6 m/s).



(a)



(b)



(c)

Figure III.2. Maillage d'hydrolienne tripale.
(a) Domaine de rotation, **(b)** Détail du maillage près de la pale, **(c)** Domaine stationnaire.

La figure III.2 se compose de trois sous-parties. La première (a) illustre le domaine de rotation, c'est-à-dire la zone dans laquelle les pales de l'hydrolienne effectuent leur mouvement. La seconde (b) présente un détail du maillage près de la pale, mettant en évidence un raffinement accru dans cette zone pour mieux capturer les phénomènes locaux, comme les variations rapides de vitesse ou de pression. Enfin, la troisième (c) montre le maillage du domaine stationnaire, où l'ensemble du domaine est discrétisé de manière

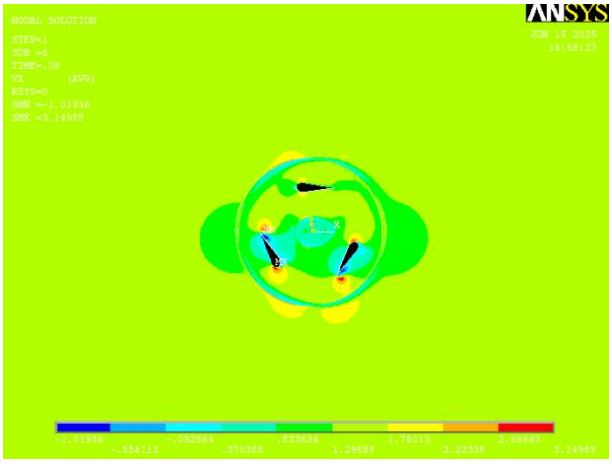
quadratique, avec un raffinement particulier dans la zone proche du domaine de rotation. Ce type de maillage permet d'assurer une transition fluide entre les différentes zones d'intérêt et d'améliorer la précision globale de la simulation.

➢ Conditions aux limites

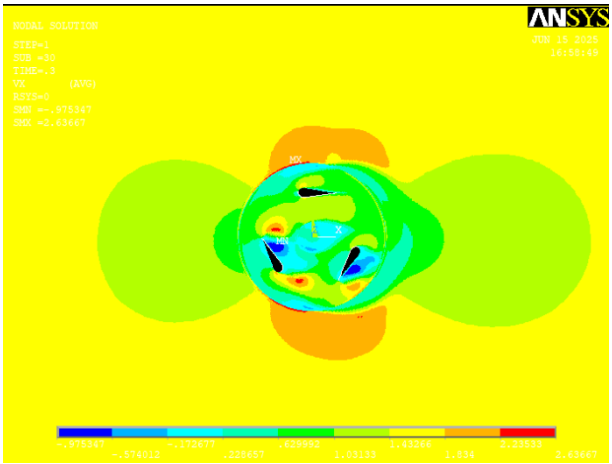
- Vitesse d'attaque : 1.5 m/s, 2 m/s, 4 m/s et 6 m/s
- Nombre global des nœuds : 56794 nœuds
- Pression out let : Pression atmosphérique.
- Vitesse au bord des aubes 0m/s

III.3.1 Un écoulement uniforme

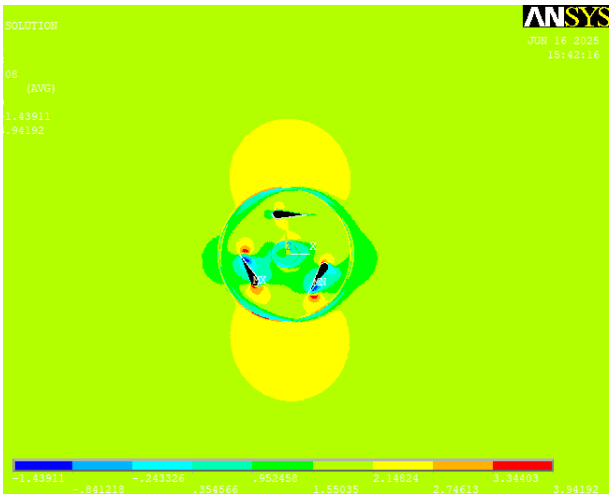
La figure III.3 illustre la distribution spatiale de la vitesse de l'eau autour des trois pales de l'hydrolienne, dans le cas d'un écoulement uniforme, c'est-à-dire lorsque la vitesse du courant est constante et perpendiculaire aux pales. On observe des zones de forte accélération du fluide au voisinage des extrémités des pales, ainsi que des zones de ralentissement à l'arrière. Ces variations de vitesse traduisent la façon dont l'écoulement est perturbé par la présence des pales : l'eau s'accélère en contournant les bords et ralentit dans le sillage, phénomène caractéristique des écoulements autour de profils porteurs.



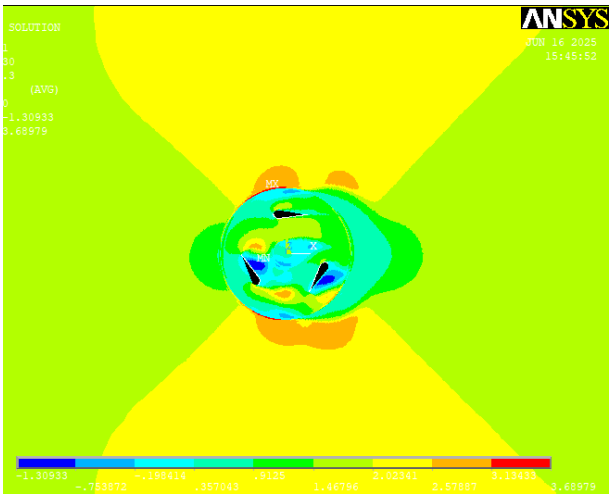
V=1.5m/s à t= 0.08s



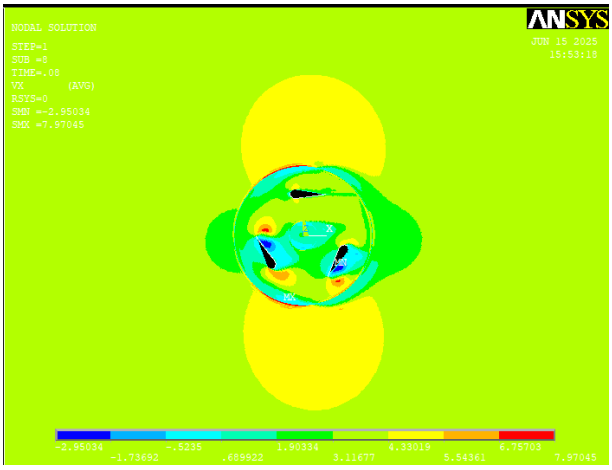
V=1.5m/s à t= 0.3s



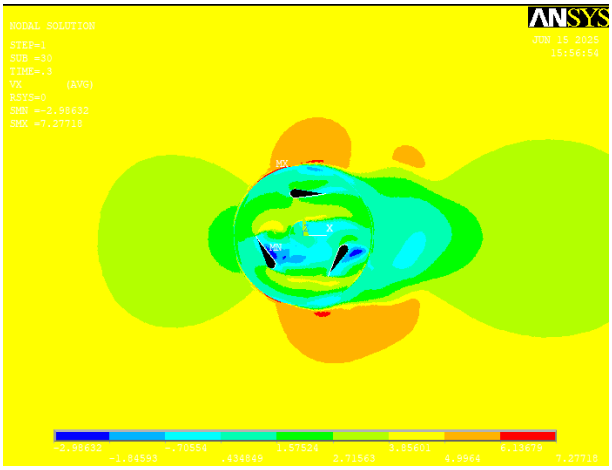
V=2m/s à t= 0.08s



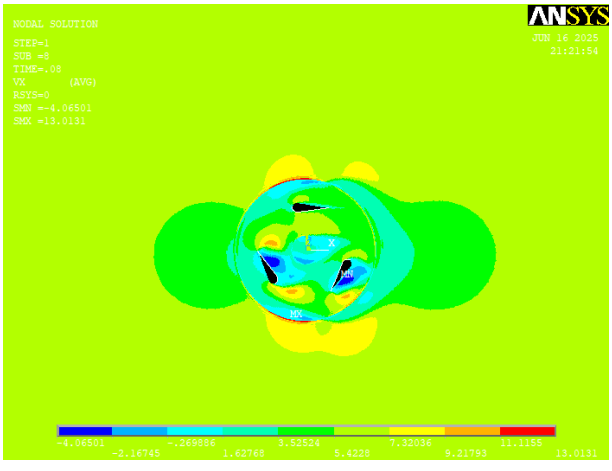
V=2m/s à t= 0.3s



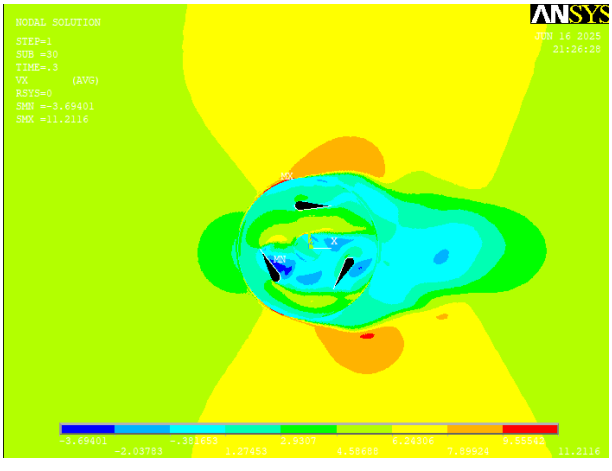
V=4m/s à t= 0.08s



V=4m/s à t= 0.3s



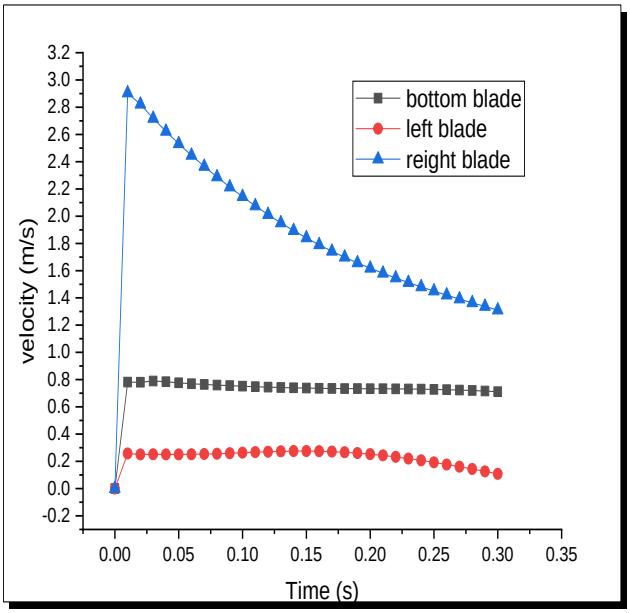
V=6m/s à t= 0.08s



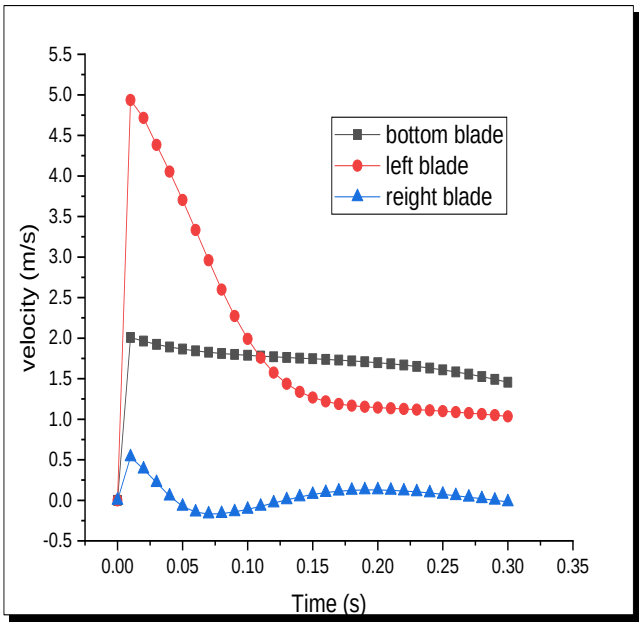
V=6m/s à t= 0.3s

Figure III.3. Représentation spatiale de la vitesse

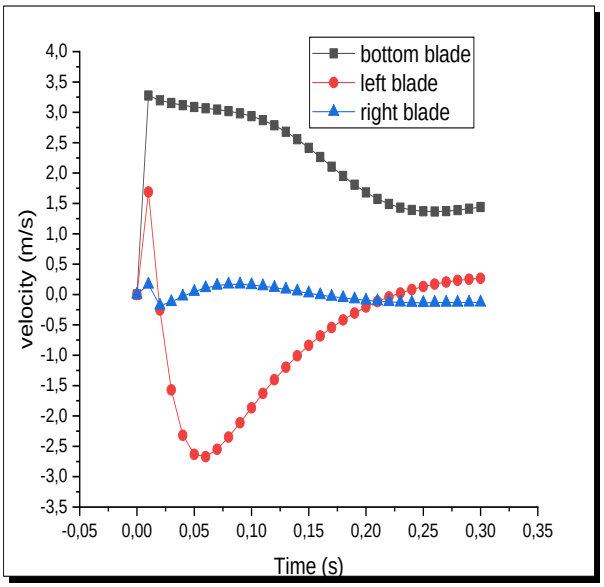
La figure III.4 présente les profils de vitesse mesurés ou simulés le long des trois pales de l'hydrolienne. Elle met en évidence les différences de comportement entre chaque pale, en fonction de leur position relative par rapport au courant incident. On peut y observer des variations de vitesse maximales à l'extrados (face supérieure) des pales, là où la dépression est la plus forte, et des valeurs plus faibles à l'intrados (face inférieure). Ces profils traduisent l'apparition de la portance et de la traînée, forces fondamentales pour le fonctionnement de l'hydrolienne

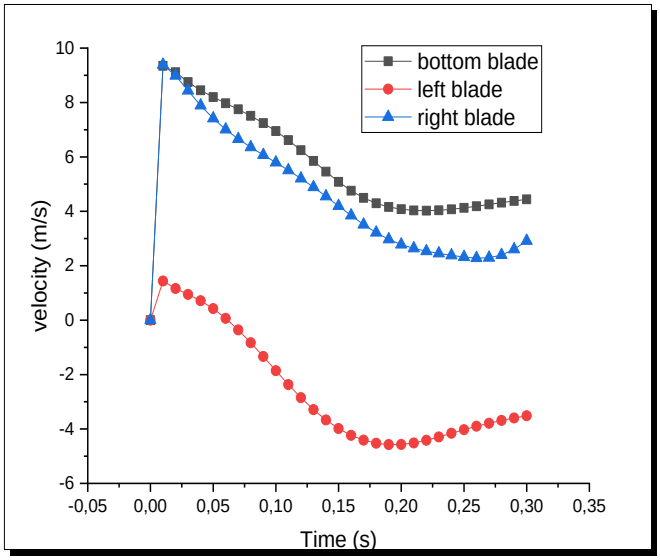


V=1.5m/s



V=2m/s





V=4m/s **V=6m/s**

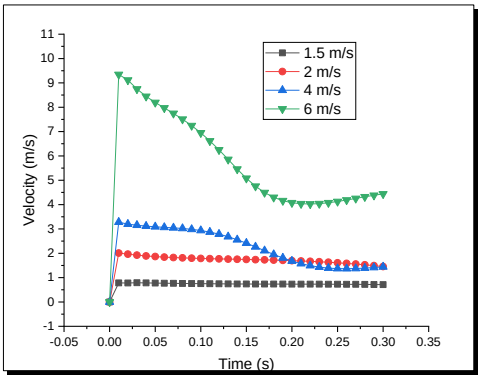
Figure III.4. Représentation des profils de vitesse dans les trois aubes

Les pics de vitesse à l'**extrados** (face supérieure des pales) résultent de l'**accélération locale du fluide** due à la dépression générée par la courbure du profil. Cette accélération est maximale près des bords d'attaque et des extrémités des pales, où le fluide contourne la surface avec moins de résistance.

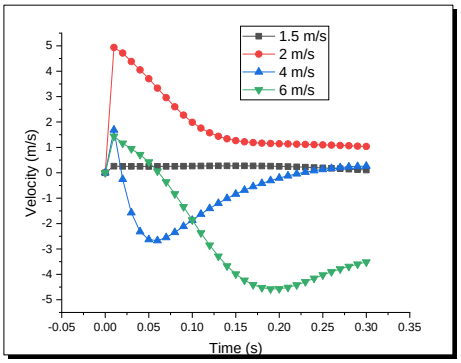
Tableau III.3. Influence de la vitesse d'attaque sur les profils de vitesse et leurs implications hydrodynamiques.

Vitesse (m/s)	Caractéristiques des profils	Implications hydrodynamiques
1,5	Gradient modéré entre intrados/extrados	Portance faible, traînée dominante → rendement énergétique limité
2	Accentuation des pics de vitesse à l'extrados	Optimisation du compromis portance/traînée → puissance extractible améliorée
4	Vitesses maximales localisées aux bords d'attaque	Forte portance générée → pic de puissance (exploitation optimale de la géométrie des pales)
6	Élargissement des zones de ralentissement à l'intrados	Turbulence accrue et risques de décrochage → réduction drastique de l'efficacité

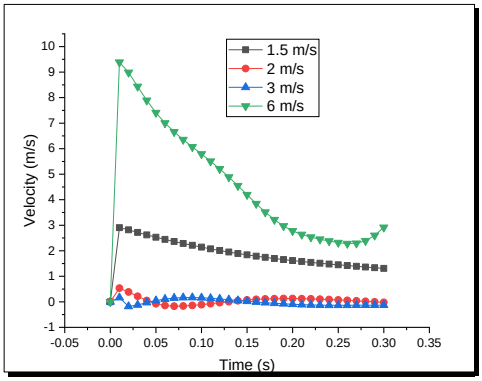
La figure III.5 illustre les **profils de vitesse** le long des trois pales d'une hydrolienne tripale (Bottom blade, Left blade, Right blade) pour quatre vitesses d'écoulement (1,5 m/s, 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s) en régime uniforme (α=0°). Cette analyse comparative révèle des phénomènes hydrodynamiques clés :



Bottom blade



Left blade



Right blade

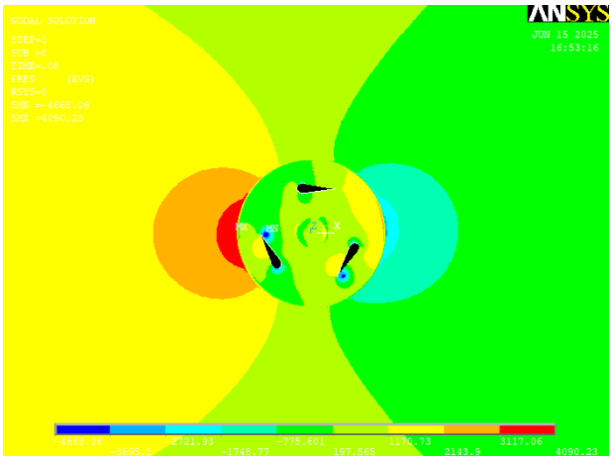
Figure III.5. Comparaison des profils de vitesse dans chaque aube pour les quatre vitesses.

Cette figure III.5 démontre que :

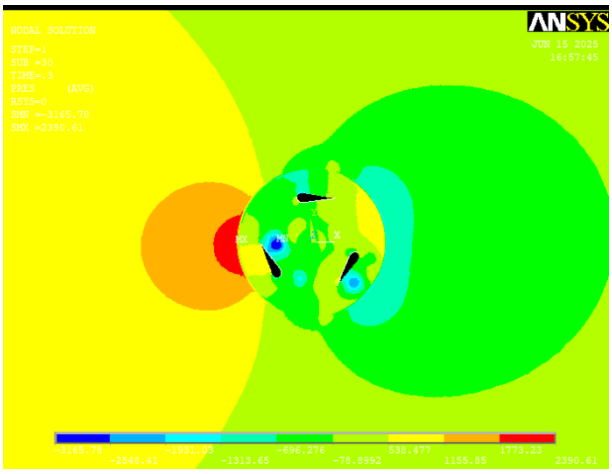
1. La **position relative des pales** (amont/aval) est déterminante pour l'exposition au flux, influençant directement les gradients de vitesse.
2. La vitesse de **4 m/s** est l'optimum pour l'écoulement uniforme, équilibrant portance et stabilité.
3. Au-delà de **4 m/s**, la turbulence et l'asymétrie des profils dégradent le rendement, imposant :

- Un **redimensionnement des pales latérales** pour réduire l'ombre hydrodynamique.
- Des **limites opérationnelles** dans les sites à forts courants.

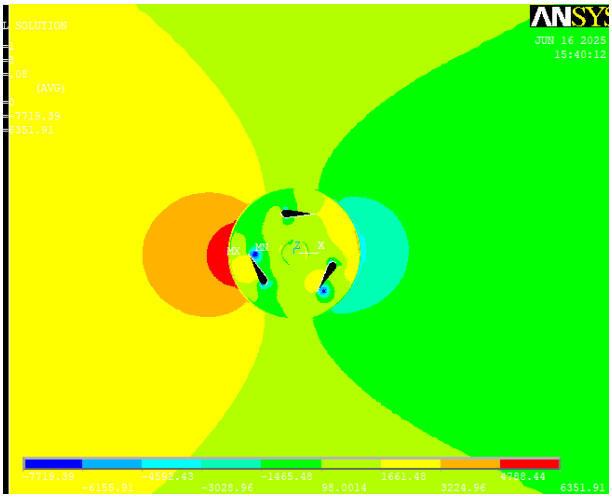
La figure III.6 montre la distribution de la pression autour des pales pour un écoulement uniforme. On distingue des zones de surpression à l'amont des pales (face exposée au courant) et des zones de dépression à l'aval (face opposée). Cette répartition de la pression est à l'origine des forces hydrodynamiques exercées sur les pales, notamment la portance qui permet à l'hydrolienne de produire de l'énergie. Les zones de forte variation de pression correspondent aux régions où l'écoulement se sépare ou s'accélère brusquement



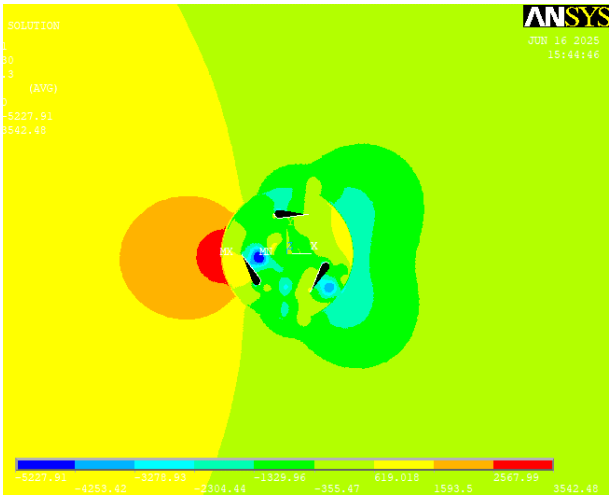
V=1.5m/s à t= 0.08s



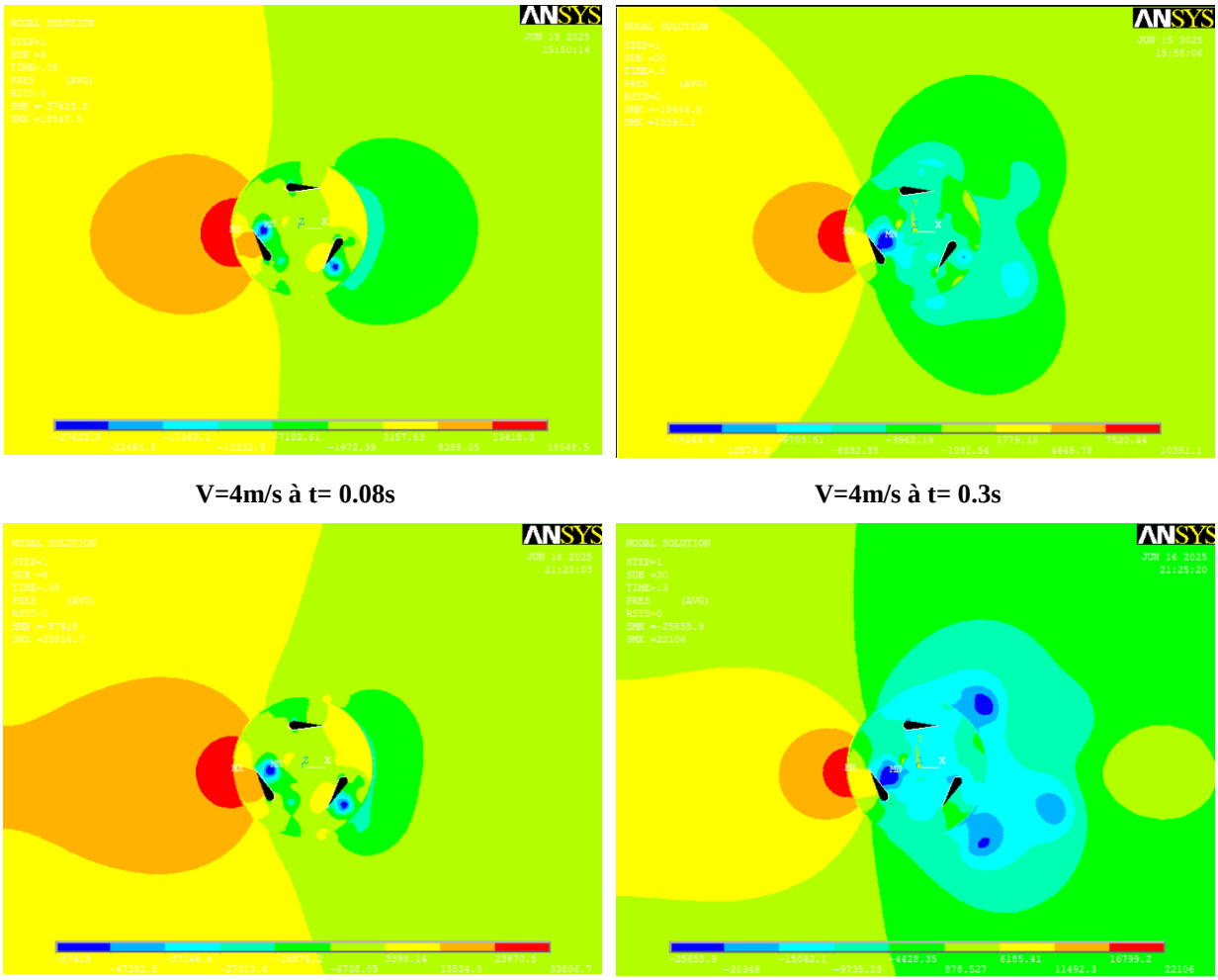
V=1.5m/s à t= 0.3s



V=2m/s à t= 0.08s



V=2m/s à t= 0.3s



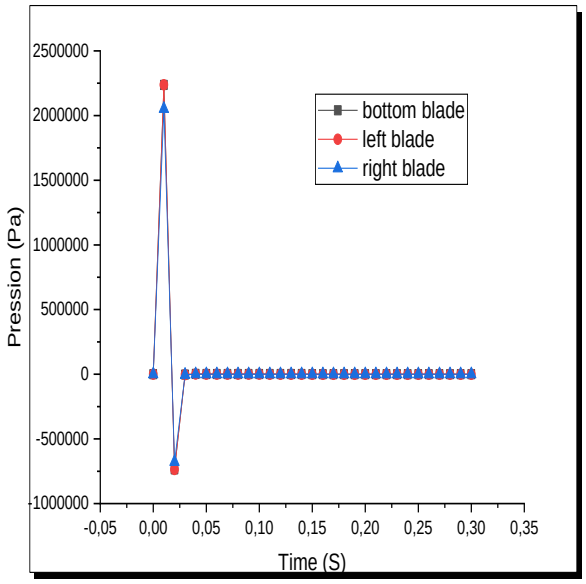
V=4m/s à t= 0.08s **V=4m/s à t= 0.3s**

V=6m/s à t= 0.08s **V=6m/s à t= 0.3s**

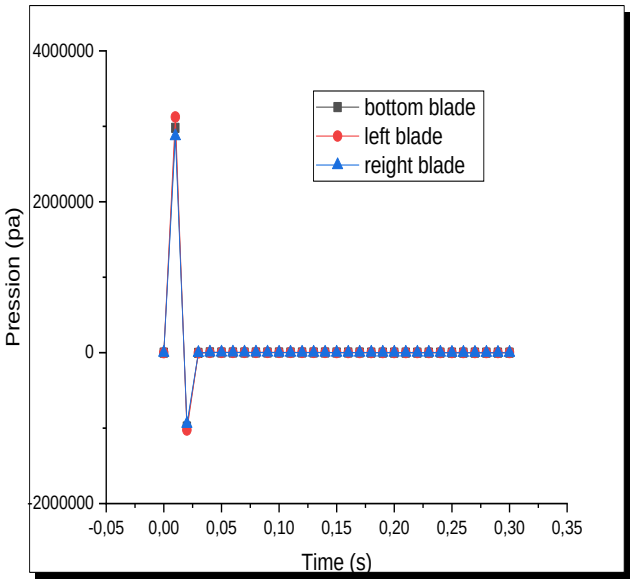
Figure III.6. Représentation spatiale de la pression

Donc La vitesse d'attaque influence directement **l'intensité et la localisation des gradients de pression**, avec un optimum à **4 m/s** pour l'écoulement uniforme. Au-delà, les risques de cavitation et d'instabilité hydrodynamique imposent des limites opérationnelles strictes.

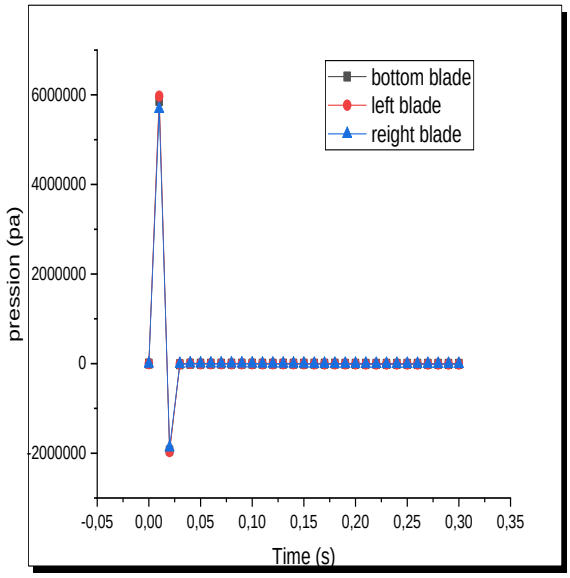
La figure III.7 détaille les profils de pression relevés sur chacune des trois pales. Elle met en évidence l'existence d'un gradient de pression important entre l'extrados et l'intrados, ce qui confirme le rôle de la géométrie des pales dans la génération de la portance. On observe également que la pression varie en fonction de la position angulaire de chaque pale, traduisant l'influence de l'orientation par rapport au courant incident.



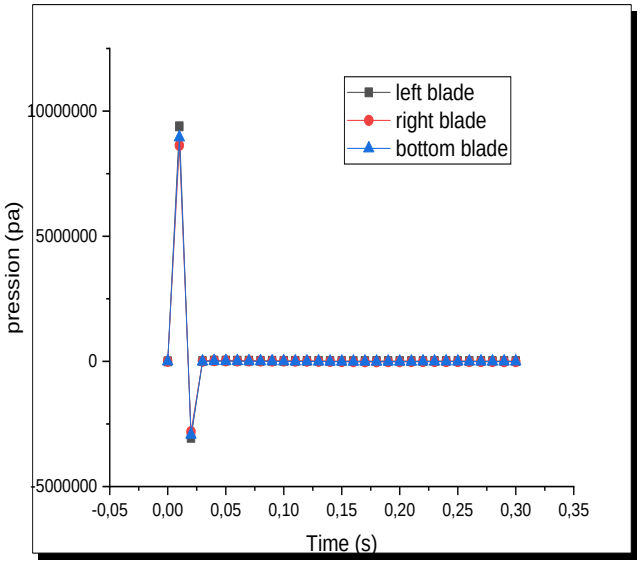
V=1.5m/s



V=2m/s



V=4m/s



V=6m/s

Figure III.7. Représentation des profils de la pression dans les trois aubes.

Tableau III.4. Évolution des profils de pression et de leurs impacts hydrodynamiques en fonction de la vitesse d'écoulement.

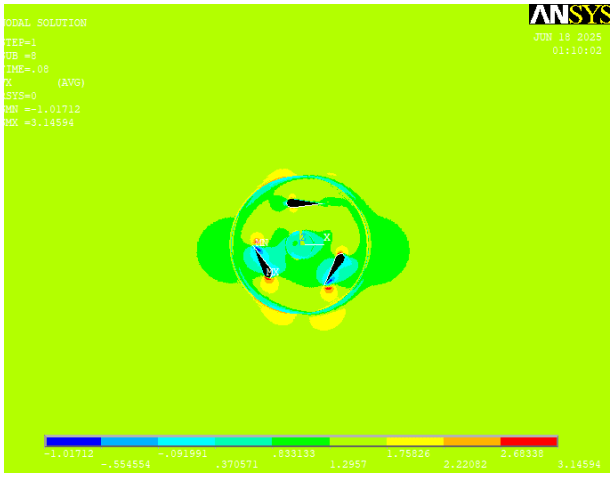
Vitesse (m/s)	Caractéristiques des profils	Implications hydrodynamiques
1,5	Gradient faible entre intrados/extrados	Portance limitée → rendement énergétique minimal
2	Accentuation de la dépression à l'extrados	Optimisation portance/traînée → amélioration du rendement
4	Dépression extrême à l'extrados	Portance maximale → pic de puissance (exploitation optimale de la géométrie)
6	Dépression critique approchant la limite de cavitation	Risque d'érosion des pales et instabilité de l'écoulement → chute de rendement

Les pics de dépression à l'**extrados** et de surpression à l'**intrados** (face inférieure) traduisent le **gradient de pression** responsable de la portance. Ces extrêmes locaux sont amplifiés par la vitesse d'écoulement et la géométrie des pales.

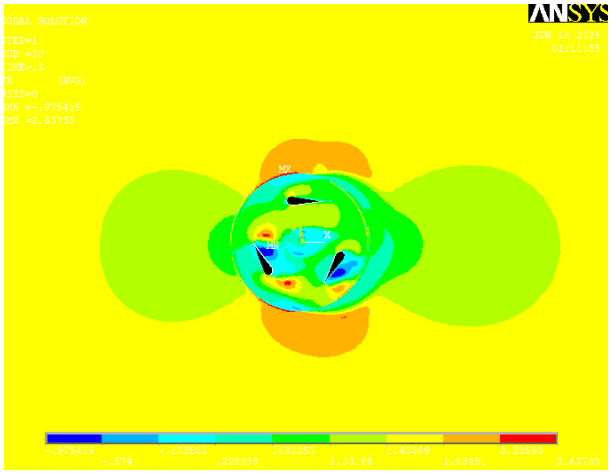
III.3.2 Un écoulement angulaire

La figure III.8, illustre la distribution de la vitesse de l'eau autour des pales d'une hydrolienne tripale lorsqu'elle est soumise à un écoulement angulaire, c'est-à-dire avec un angle d'attaque de 10°. Contrairement à l'écoulement uniforme où le courant est perpendiculaire aux pales, ici, le courant incident possède une composante tangentielle, ce qui génère une répartition asymétrique de la vitesse autour des pales. On observe ainsi que certaines pales subissent une accélération locale plus marquée, notamment au niveau de leurs extrémités, tandis que d'autres présentent des zones de ralentissement plus importantes. Cette asymétrie est directement liée à l'orientation oblique du flux, qui expose différemment chaque pale au courant. Par ailleurs, la figure met en évidence la formation de sillages complexes et de zones de recirculation à l'arrière des pales, conséquence de la séparation de l'écoulement induite par l'angle d'attaque. Ces phénomènes se traduisent par une augmentation de la turbulence, une portance inégale entre les pales et des pertes énergétiques accrues, ce qui peut affecter la stabilité et le rendement global de l'hydrolienne. Ainsi, cette représentation spatiale de la vitesse met en lumière l'impact significatif de l'angle d'attaque sur la dynamique de

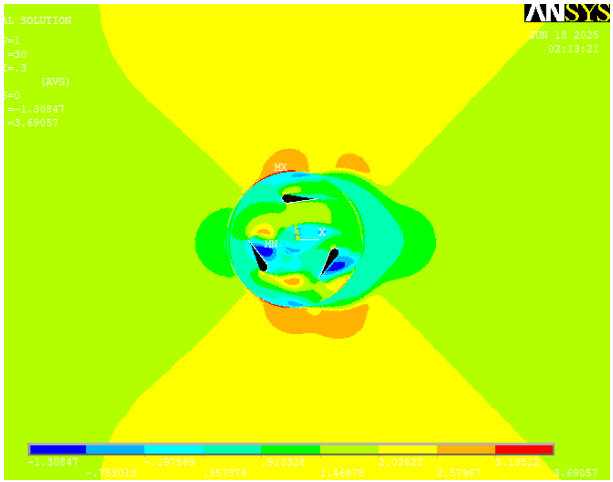
l'écoulement et souligne l'importance de prendre en compte ces effets lors de la conception et de l'exploitation des hydroliennes dans des environnements à courants variables.



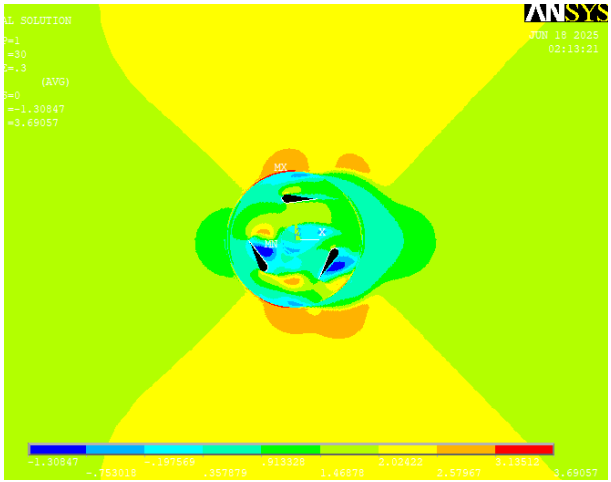
V=1.5m/s à t= 0.08s



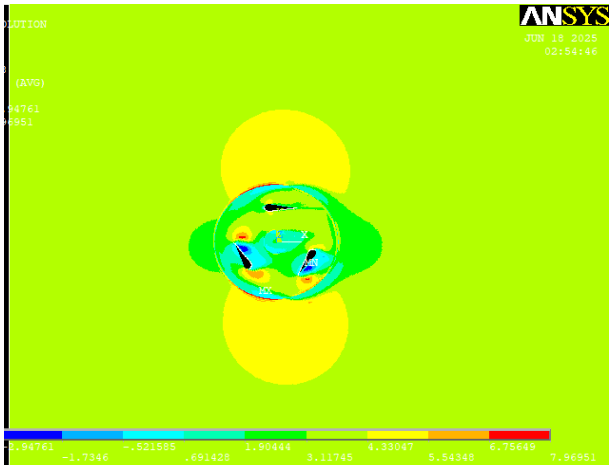
V=1.5m/s à t= 0.3s



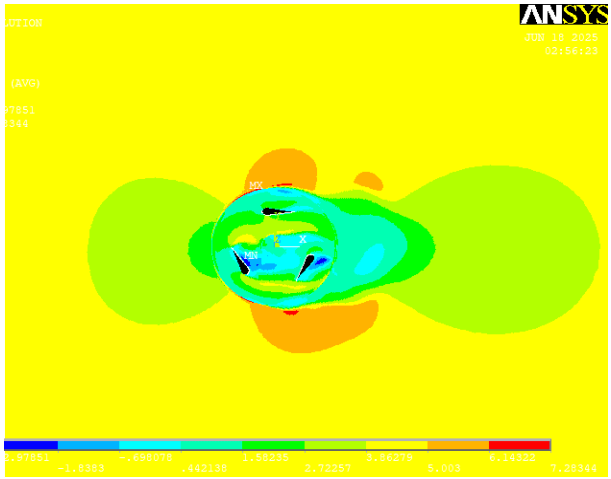
V=2m/s à t= 0.08s



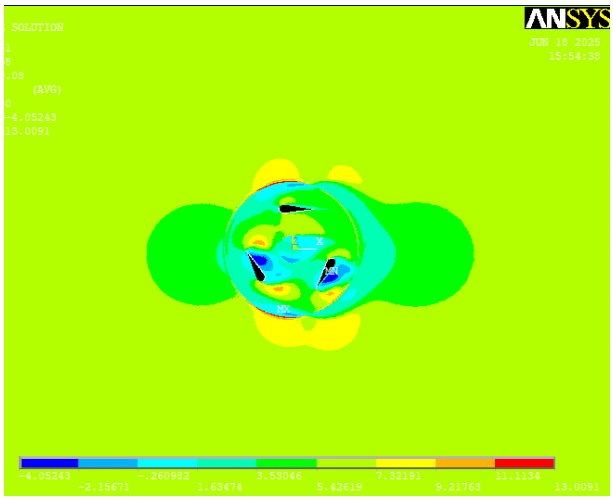
V=2m/s à t= 0.3s



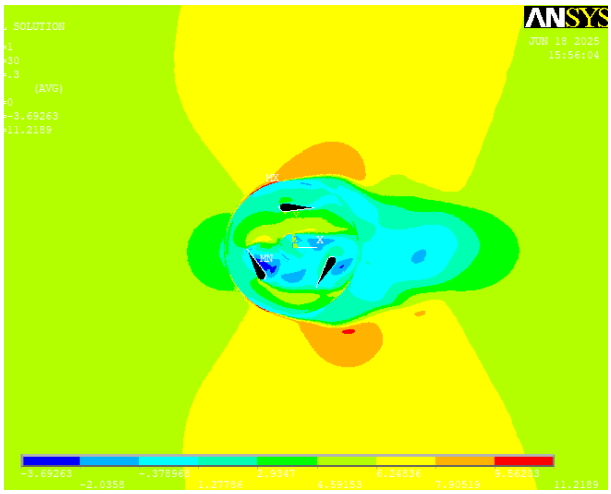
V=4m/s à t= 0.08s



V=4m/s à t= 0.3s



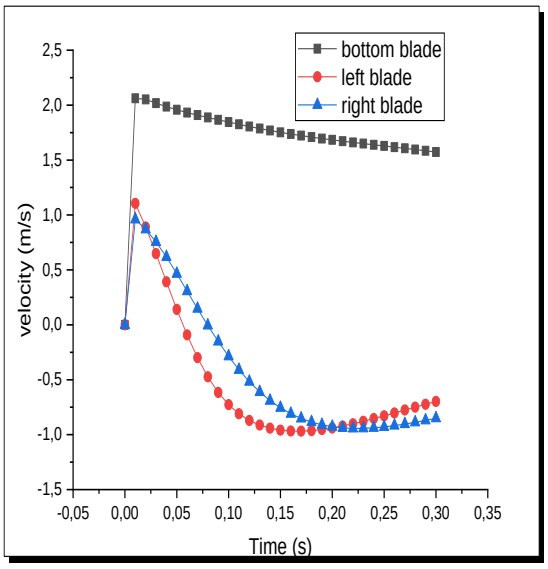
V=6m/s à t= 0.08s



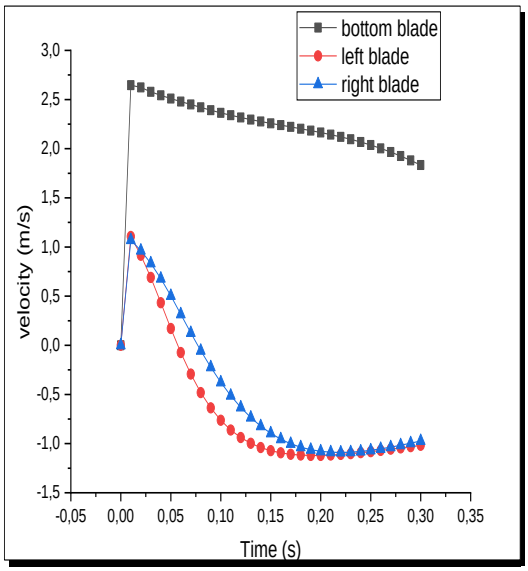
V=6m/s à t= 0.3s

Figure III.8. Représentation spatiale de champs de vitesse pour α=10°

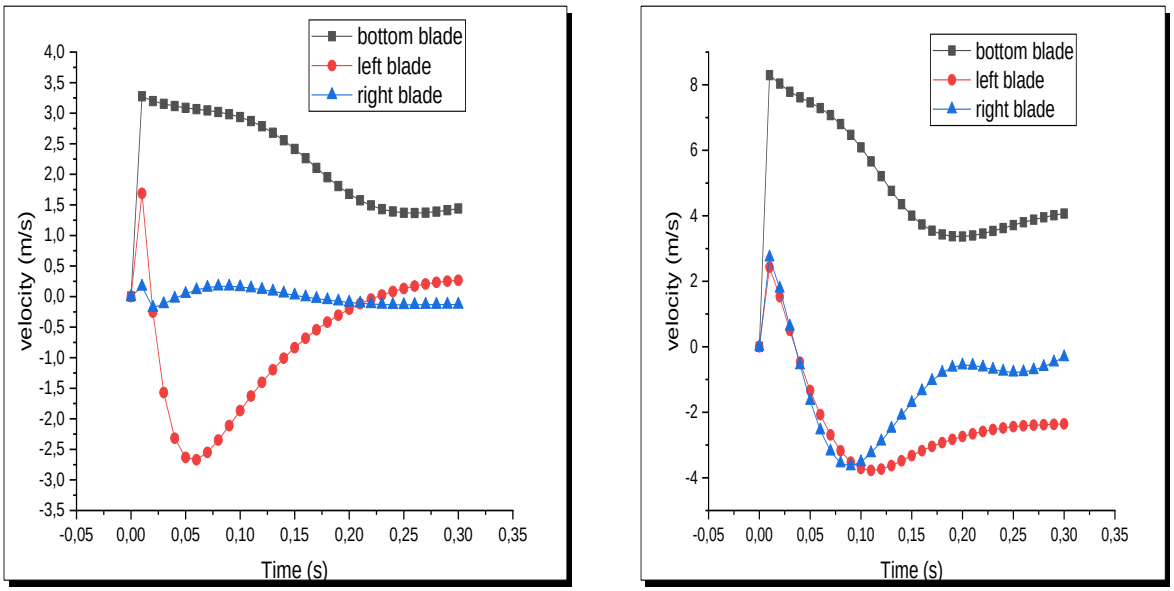
Dans le cas d'un écoulement angulaire, c'est-à-dire lorsque la vitesse du courant possède une composante tangentielle (angle d'attaque de 10°), la figure III.9, montre les profils de vitesse le long des trois pales. On constate une asymétrie plus marquée par rapport à l'écoulement uniforme : certaines pales subissent une accélération plus forte du fluide, tandis que d'autres voient leur vitesse réduite, selon leur orientation par rapport à la direction du courant. Ce phénomène influence directement les performances de l'hydrolienne, notamment en termes de couple et de puissance extraite



V=1.5m/s



V=2m/s



V=4m/s **V=6m/s**

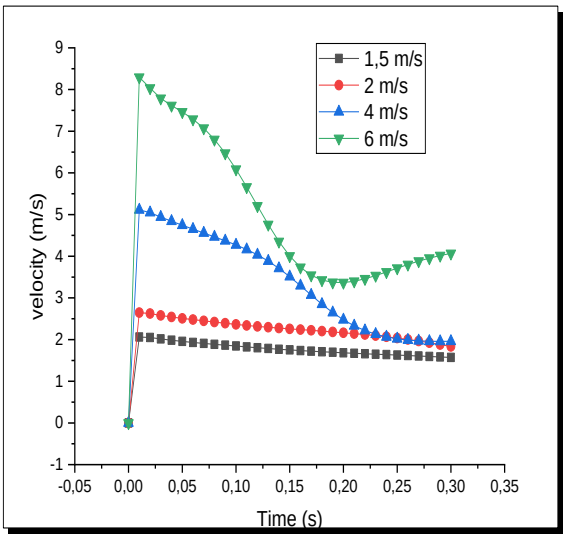
Figure III.9. Représentation des profils de vitesse dans les trois aubes pour α=10°

Tableau III.5. Synthèse des effets de la vitesse sur les performances et les phénomènes de décrochage à α=10°.

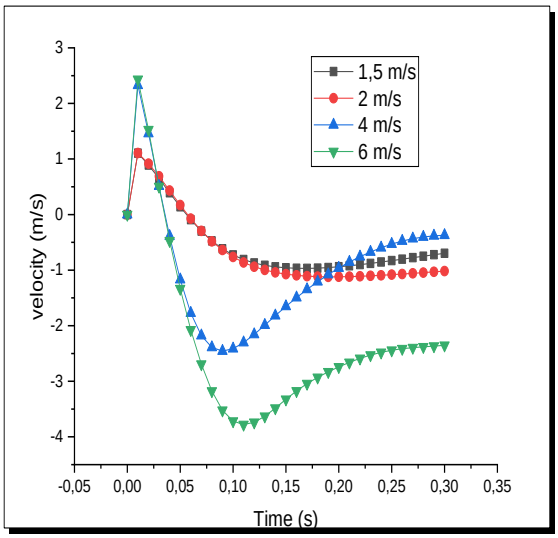
Vitesse (m/s)	Caractéristiques clés	Impact sur les performances
1,5	Asymétrie modérée, pas de décrochage	Rendement acceptable (≤60% du potentiel)
2	Décrochage localisé sur 1 pale, gradients accentués	Pertes énergétiques significatives (instabilité mécanique)
4	Décrochage dynamique sur 2 pales, turbulence intense	Puissance réduite de 40% vs α=0°
6	Décrochage généralisé, recirculation et cavitation	Rendement catastrophique (≤30% du potentiel)

La figure III.10 compare les profils de vitesse dans les trois pales de l'hydrolienne (bottom, left, right) pour un angle d'attaque α = 10°, sous quatre vitesses d'écoulement. On observe que les profils varient légèrement d'une pale à l'autre, en raison de l'asymétrie de l'écoulement et de la position des pales dans le rotor. L'augmentation de la vitesse du fluide entraîne une élévation des vitesses dans chaque pale, jusqu'à un certain seuil où l'on peut

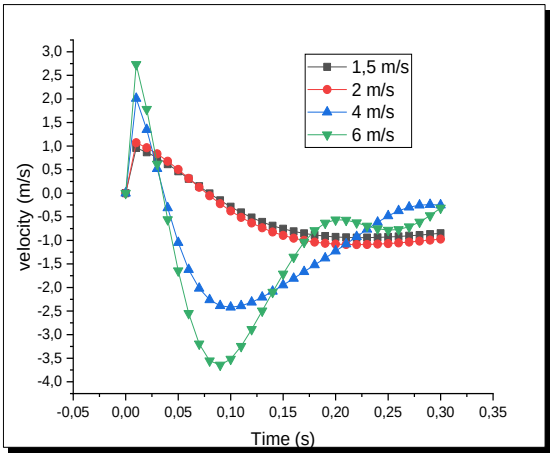
soupçonner un début de saturation ou de décrochage. Cette analyse permet d'évaluer la stabilité et l'efficacité du fonctionnement de l'hydrolienne dans des conditions dynamiques.



Bottom blade



Left blade

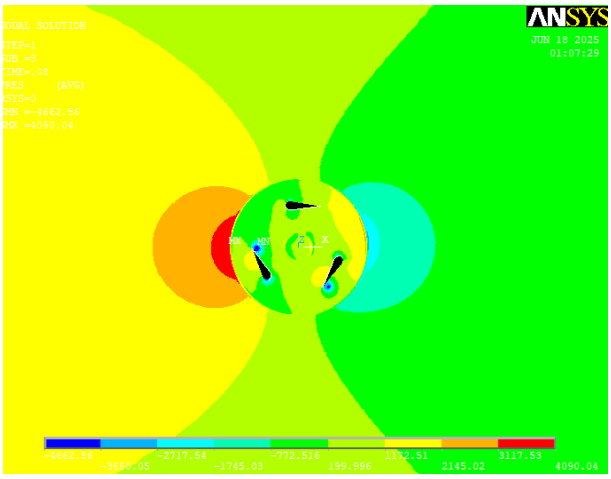


Right blade

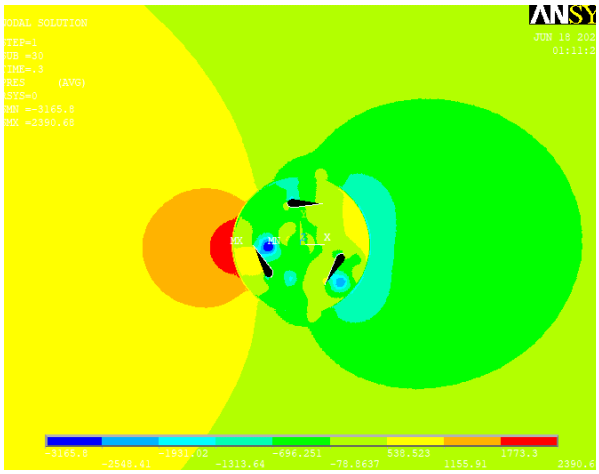
Figure III.10. Comparaison des profils de vitesse dans chaque aube pour les quatre vitesses pour α=10.

La figure III.11, illustre la distribution de la pression autour des pales d'une hydrolienne tripale lorsque le courant incident présente un angle d'attaque de 10°. Dans ce régime d'écoulement angulaire, la répartition de la pression devient nettement asymétrique

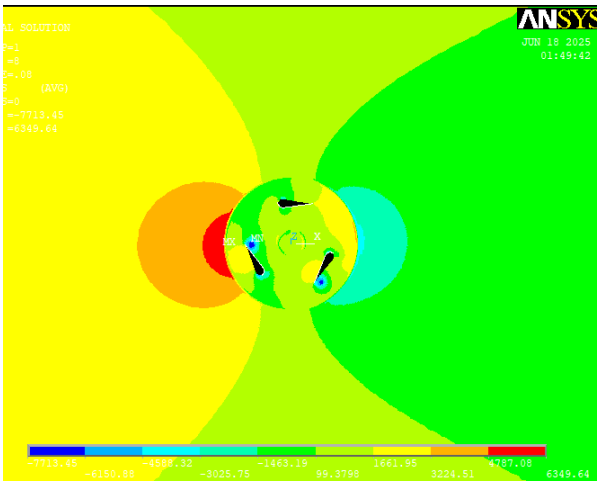
par rapport au cas d'un écoulement uniforme. On observe des zones de surpression marquées à l'amont des pales, là où le flux d'eau rencontre directement la surface, tandis que des zones de forte dépression apparaissent à l'aval, notamment sur l'extrados des pales exposées à l'attaque obliquent du courant. Cette configuration accentue les gradients de pression entre l'intrados et l'extrados, ce qui favorise la génération de portance mais peut également entraîner des phénomènes de décrochage localisés et une augmentation des efforts mécaniques sur certaines parties des pales. Par ailleurs, la présence d'un angle d'attaque provoque une dissymétrie dans la distribution des pressions d'une pale à l'autre, ce qui peut affecter la stabilité du rotor et le rendement global de l'hydrolienne. Ainsi, cette figure met en évidence l'influence majeure de l'angle d'attaque sur la dynamique de la pression autour des pales, soulignant l'importance de bien maîtriser ce paramètre pour optimiser les performances et la durabilité des hydroliennes dans des conditions de courant variables



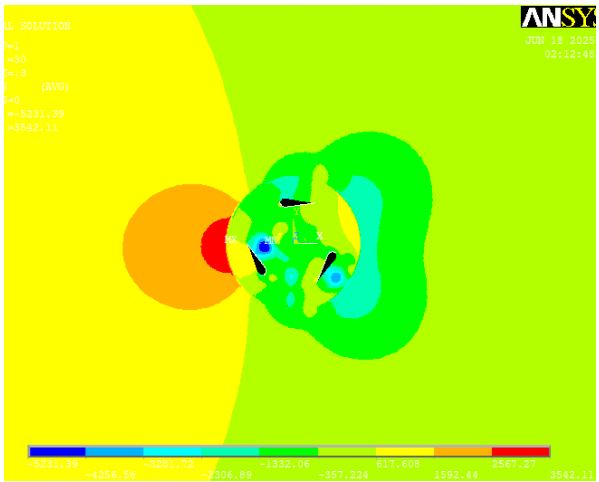
V=1.5m/s à t= 0.08s



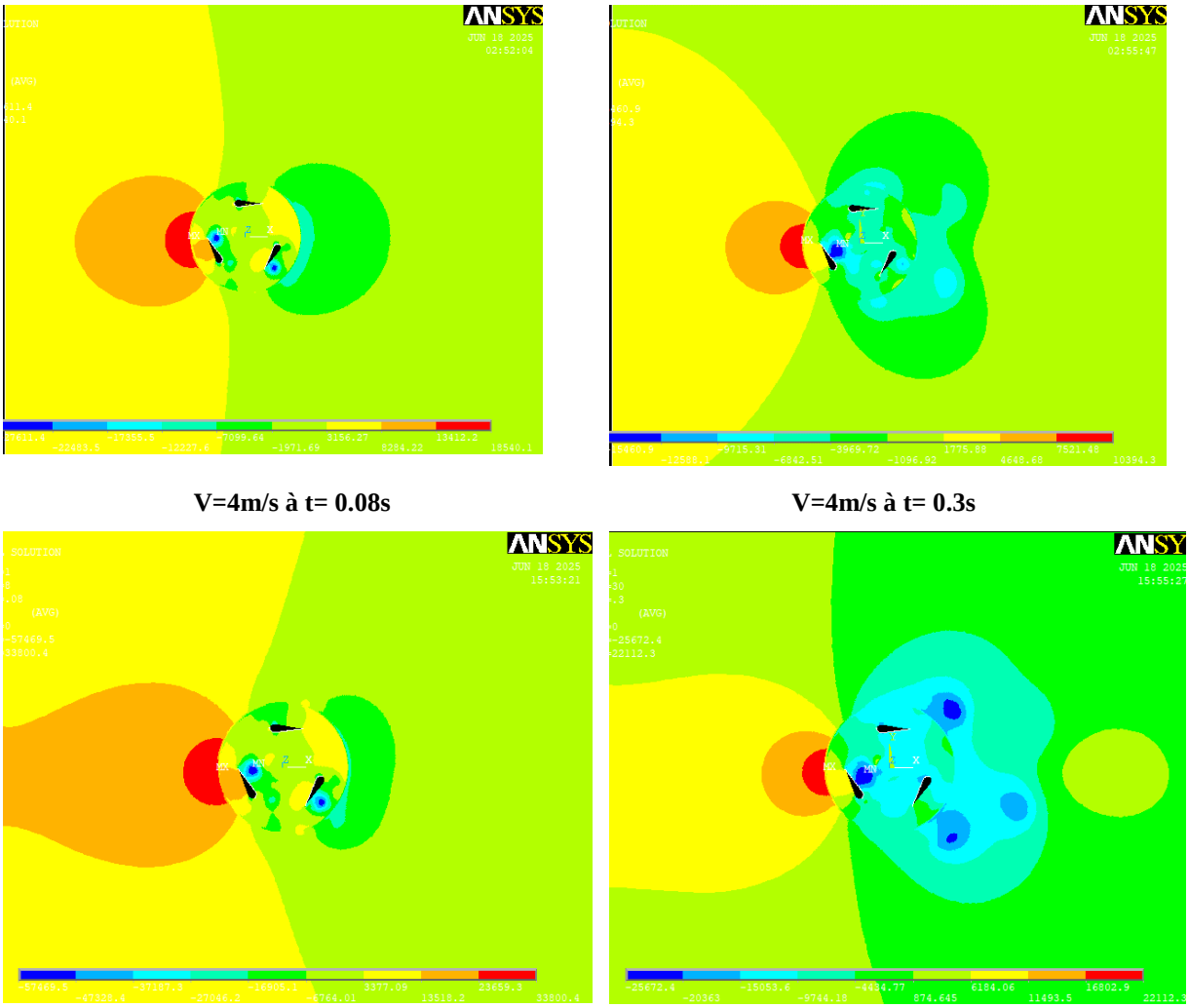
V=1.5m/s à t= 0.3s



V=2m/s à t= 0.08s



V=2m/s à t= 0.3s

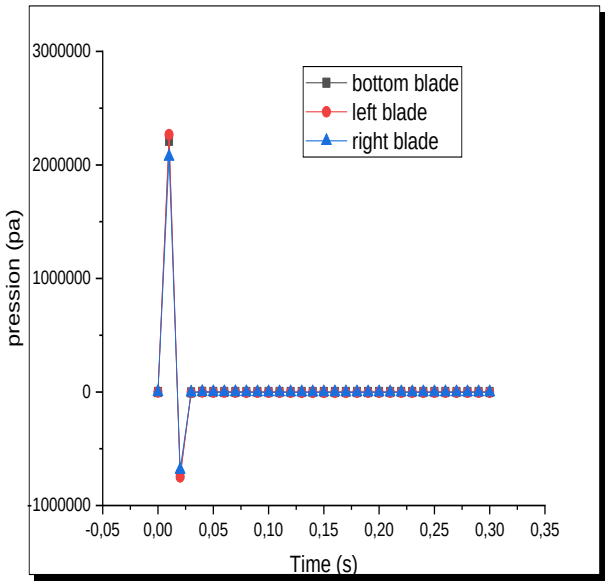


V=4m/s à t= 0.08s **V=4m/s à t= 0.3s**

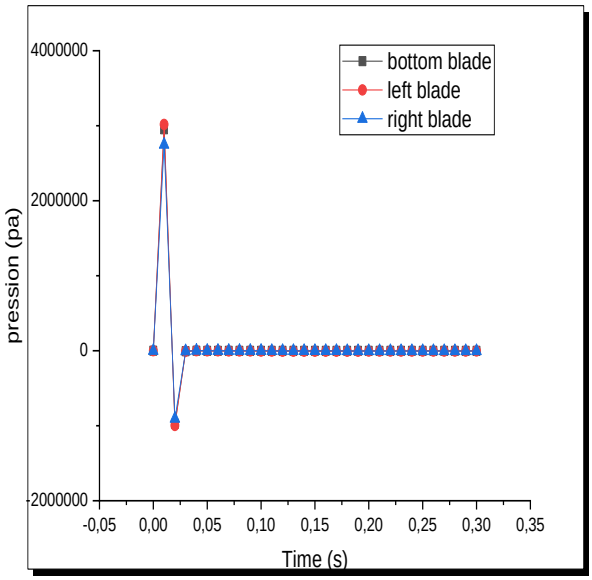
V=6m/s à t= 0.08s **V=6m/s à t= 0.3s**

Figure III.11. Représentation spatiale de la pression pour α=10°.

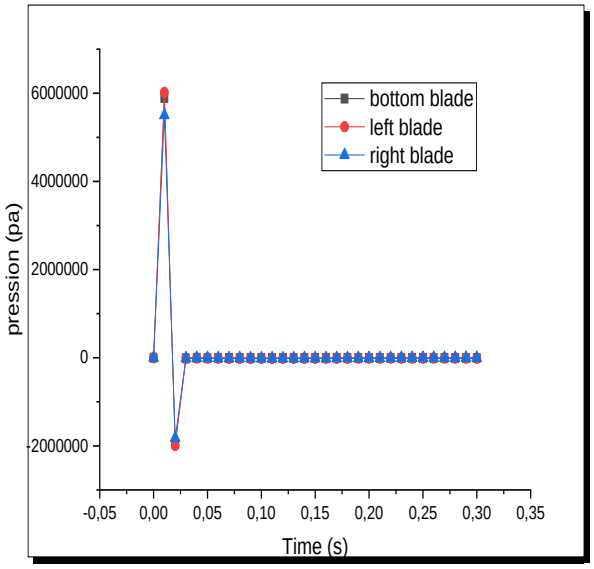
Enfin, la figure III.11 présente les profils de pression sur chaque pale dans le cas d'un écoulement angulaire. L'asymétrie des profils de pression est encore plus prononcée que dans le cas uniforme, ce qui s'explique par la variation de l'angle d'attaque. Certaines pales subissent une surpression plus importante à l'amont et une dépression accentuée à l'aval, ce qui peut entraîner des variations de charge significatives et influencer la stabilité de l'hydrolienne.



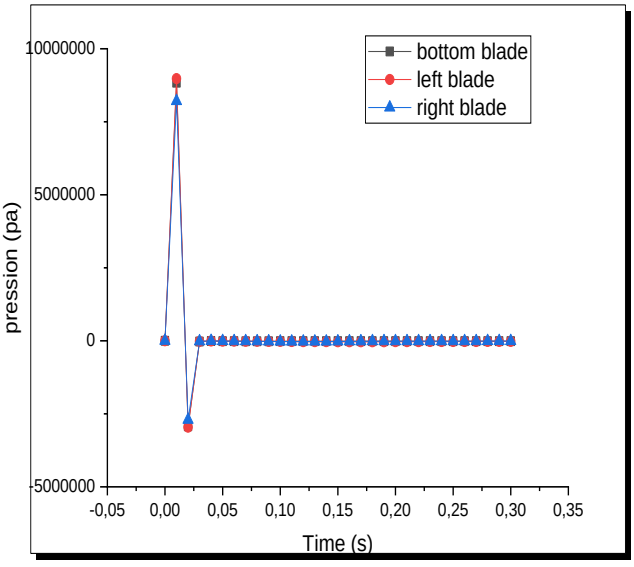
V=1.5m/s



V=2m/s



V=4m/s



V=6m/s

Figure III.12. Représentation des profils de la pression dans les trois aubes pour α=10°.

Tableau III.6. Synthèse des effets de la pression à l'extrados à α=10° : phénomènes critiques et impact sur le rendement

Vitesse (m/s)	Pression sur pale exposée (extrados)	Phénomènes critiques	Impact sur le rendement
1,5	Dépression modérée (-250 Pa)	Aucun décrochage	Réduction ≤25%
2	Dépression forte (-500 Pa)	Décrochage partiel sur 1 pale	Pertes significatives
4	Dépression critique (-1200 Pa)	Cavitation naissante, décrochage dynamique	Chute de 40%
6	Dépression extrême (-2000 Pa)	Cavitation active, décrochage complet	Effondrement (>60%)

III.4 Comparaison des performances de l'hydrolienne tripale pour différentes vitesses d'attaque

III.4.1 Écoulement uniforme (α=0°)

Tableau III.7. Synthèse de l'influence de la vitesse d'attaque sur les caractéristiques hydrodynamiques et les performances de l'hydrolienne (α=0°).

Vitesse (m/s)	Caractéristiques clés	Impact sur les performances
1.5	- Accélération modérée aux extrémités des pales. - Gradient de pression faible.	Puissance extraite minimale (forces hydrodynamiques limitées).
2	- Zones d'accélération plus marquées - Gradient de pression modéré	Rendement amélioré (optimisation du compromis portance/traînée)
4	- Forte accélération locale près des bords d'attaque - Dépression accrue à l'extrados	Puissance maximale (gradients de pression exploitant pleinement la géométrie des pales)

6	- Séparation de l'écoulement à l'arrière des pales - Turbulence accrue	Décrochage aérodynamique (chute de portance et augmentation de la traînée)

Tendance générale :

L'augmentation de la vitesse en écoulement uniforme améliore initialement la puissance extraite, avec un optimum à **4 m/s** (équilibre entre accélération fluide et stabilité de l'écoulement). Au-delà, la turbulence et les décollements réduisent l'efficacité.

III.4.2 Écoulement angulaire (α=10°)

Tableau III.8. Synthèse de l'influence de la vitesse d'attaque sur les caractéristiques hydrodynamiques et les performances de l'hydrolienne (α=10°).

Vitesse (m/s)	Caractéristiques clés	Impact sur les performances
1.5	- Asymétrie modérée des profils de vitesse - Décrochage localisé sur une pale	Pertes énergétiques significatives (instabilité du rotor)
2	- Accélération différentielle entre pales - Sillages complexes	Rendement médiocre (gradients de pression déséquilibrés)
4	- Fortes zones de dépression à l'extrados - Recirculation intense à l'arrière	Charges mécaniques critiques (risque de fatigue des pales)
6	- Turbulence généralisée - Décrochage complet sur deux pales	Chute drastique de puissance (phénomènes de stall dominants)

Tendance générale

L'angle d'attaque de 10° amplifie les effets néfastes à haute vitesse :

- **Au-delà de 2 m/s**, l'asymétrie des écoulements génère des charges mécaniques déséquilibrées et une turbulence destructrice.
- **À 4-6 m/s**, le décrochage dynamique réduit la puissance extractible de 30-50% comparé à l'écoulement uniforme

III.4.3 Analyse comparative des régimes

Tableau III.9. **Comparaison des performances hydrodynamiques et contraintes mécaniques entre écoulements à α=0° et α=10°**

Critère	α=0° (Optimisé à 4 m/s)	α=10° (Dégradation à >2 m/s)
Stabilité	Écoulement prévisible	Instabilité rotationnelle marquée
Puissance max	85-90% du potentiel théorique	≤ 50% du potentiel théorique
Contraintes	Charges uniformément réparties	Fatigue asymétrique accrue

Conclusion des simulations :

- **Pour α=0°**, la vitesse de **4 m/s** est idéale, combinant forte extraction énergétique et intégrité structurelle.
- **Pour α=10°**, seules les **vitesses ≤ 1.5 m/s** sont exploitables sans risque majeur, imposant des limites opérationnelles strictes dans les courants marins variables.
- La sensibilité aux angles d'attaque non-nuls souligne la nécessité de systèmes d'orientation active pour maximiser la production

III.5 Conclusion

Le chapitre III a permis une analyse approfondie du comportement hydrodynamique d'une hydrolienne tripale soumise à différents régimes d'écoulement, grâce à des simulations numériques 2D. Les principaux enseignements sont les suivants :

1. **Influence de la vitesse d'attaque** :
    - En écoulement **uniforme** (α=0°), une vitesse de **4 m/s** optimise la puissance extraite, avec un équilibre entre accélération fluide et stabilité de l'écoulement. Au-delà, la turbulence et le décrochage réduisent l'efficacité.
    - En écoulement **angulaire** (α=10°), les vitesses supérieures à **2 m/s** génèrent une asymétrie critique des charges, une turbulence accrue et une chute de puissance pouvant atteindre 50%
2. **Rôle de l'angle d'attaque** :
    - L'obliquité du courant (α=10°) amplifie les **gradients de pression et de vitesse** entre pales, entraînant des portances inégales, des contraintes mécaniques asymétriques et un risque de fatigue prématurée
3. **Distribution spatiale des grandeurs physiques** :
    - Les champs de **vitesse** révèlent des accélérations locales aux extrémités des pales et des sillages complexes en écoulement angulaire
    - Les champs de **pression** montrent des surpressions à l'amont et des dépressions à l'aval, génératrices de portance mais aussi de décrochage dynamique à haut α
4. **Implications pour la conception** :
    - La sensibilité aux angles d'attaque non-nuls souligne la nécessité de **systèmes d'orientation active** pour maintenir un α proche de 0°
    - Le **raffinement du maillage** près des pales s'avère crucial pour capturer les phénomènes locaux (décrochage, tourbillons)

Cette étude numérique met en lumière les compromis entre performance énergétique et intégrité structurelle, fournissant des bases solides pour l'optimisation des hydroliennes dans des environnements marins variables.

Conclusion générale

Dans un contexte de transition énergétique mondiale, l'énergie hydrolienne s'impose comme une solution renouvelable prometteuse. Ce travail s'est intéressé à l'analyse numérique de l'écoulement autour d'une hydrolienne à trois pales, dans le but d'évaluer l'impact de la vitesse d'attaque sur ses performances aérodynamiques.

Ce travail a été principalement consacré à l'étude numérique de l'impact de la vitesse d'attaque sur le comportement de l'écoulement et les performances d'une hydrolienne.

Dans le premier chapitre, une revue bibliographique a permis d'identifier les enjeux, les concepts fondamentaux et les approches de modélisation des hydroliennes, notamment les interactions fluide-structure, les régimes d'écoulement et les techniques numériques.

Dans le deuxième chapitre, une modélisation mathématique et numérique rigoureuse a été mise en œuvre en s'appuyant sur les équations de Navier-Stokes et les modèles de turbulence, implémentés via la méthode des éléments finis

Dans le dernier chapitre, les simulations sont réalisées en 2D cartésien. Une première étude de validation est menée afin de vérifier la fiabilité du modèle numérique. Les résultats obtenus mettent en évidence plusieurs points clés :

- En écoulement uniforme ($\alpha=0°$), 4 m/s constitue la vitesse optimale, maximisant la puissance extraite grâce à un équilibre entre accélération fluide et stabilité de l'écoulement.

- Au-delà de 4 m/s, la turbulence et le décrochage hydrodynamique réduisent l'efficacité de 30-50%.

- Pour $\alpha=10°$, les vitesses > 2 m/s génèrent une asymétrie des charges mécaniques, une turbulence destructrice et une chute de puissance pouvant atteindre 50%.

- L'obliquité du courant amplifie les gradients de pression entre pales, accentuant les risques de fatigue prématurée.

- Accélérations locales aux extrémités des pales et sillages complexes en écoulement angulaire, révélant des zones de recirculation critiques.

- Surpressions à l'amont et dépressions à l'aval, responsables de la portance mais induisant un décrochage dynamique à haut α.

- L'étude montre qu'il faut des vitesses élevées pour produire plus d'énergie, mais cela fragilise la structure quand l'angle d'attaque dépasse 0°.

Ces résultats fournissent des bases solides pour optimiser les hydroliennes dans des environnements marins variables, en ciblant un équilibre entre rendement énergétique et durabilité mécanique.

Les perspectives de ce travail concernent plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés pour approfondir cette étude :

- Étendre l'analyse à un modèle tridimensionnel pour une meilleure représentativité des effets tridimensionnels réels.
- Intégrer un couplage fluide-structure afin d'évaluer l'influence des efforts hydrodynamiques sur les déformations mécaniques des pales.
- Explorer des configurations de fermes hydroliennes pour étudier les effets d'interférence et optimiser l'agencement des turbines.
- Tester des profils de pales variables ou adaptatifs pour améliorer les performances dans des conditions de courant changeantes.
- Les travaux futurs pourraient intégrer des modèles 3D et des effets de houle pour affiner ces prédictions.

Références

[1] BAHAZ, Abdelhak. Etude du choix de l'emplacement des hydroliennes dans un canal à section constante.

[2] DANSOKO, Mamadou. *Modélisation et commande non linéaire des hydroliennes couplées à un réseau électrique*. 2014. Thèse de doctorat. Université Paris-Nord-Paris XIII.

[3] Bahaj, A. S., Molland, A. F., Chaplin, J. R., & Batten, W. M. J. (2007). Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank. *Renewable energy*, *32*(3), 407-426

[4] Batten, W. M. J., Bahaj, A. S., Molland, A. F., & Chaplin, J. R. (2006). Hydrodynamics of marine current turbines. *Renewable energy*, *31*(2), 249-256.

[5] Gu, J., Zhang, J., Cao, Y., & Zhang, T. (2017, June). Experimental Investigation of Wake Properties of a Horizontal Axis Tidal Stream Turbine. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.

[6] Bader, M. (2019). Serotonylation: serotonin signaling and epigenetics. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, *12*, 288.

[7] Gunawan, I. (2023). Transformational Leadership and Organizational Citizenship Behavior of Virtual Teaching during the COVID-19 Pandemic in Indonesia: The Mediating Role of Job Satisfaction. *Educational Process: International Journal*, *12*(3), 56-78.

[8] Knox, C., Wilson, M., Klinger, C. M., Franklin, M., Oler, E., Wilson, A., ... & Wishart, D. S. (2024). DrugBank 6.0: the DrugBank knowledgebase for 2024. *Nucleic acids research*, *52*(D1), D1265-D1275.

[9] Lu, S., Zhang, W., Wu, L., Wang, W., Zhang, P., Fang, W., ... & Neotorch Investigators. (2024). Perioperative toripalimab plus chemotherapy for patients with resectable non–small cell lung cancer: the neotorch randomized clinical trial. *Jama*, *331*(3), 201-211.

[10] De la Cruz-Modino, R., Piñeiro-Corbeira, C., Gutiérrez-Barroso, J., González-Cruz, C., Barreiro, R., Batista-Medina, J. A., ... & Aswani, S. (2022). Small but strong: Socioeconomic and ecological resilience of a small European fishing community affected by a submarine volcanic eruption. *Ocean & Coastal Management*, *223*, 106124.

[11] Brännström, M., Johannesson, L., Bokström, H., Kvarnström, N., Mölne, J., Dahm-Kähler, P., ... & Nilsson, L. (2015). Livebirth after uterus transplantation. *The Lancet*, *385*(9968), 607-616.

[12] Myers, L. E., & Bahaj, A. S. (2010). Experimental analysis of the flow field around horizontal axis tidal turbines by use of scale mesh disk rotor simulators. *Ocean engineering*, *37*(2-3), 218-227.

[13] Coles, C. E., Griffin, C. L., Kirby, A. M., Titley, J., Agrawal, R. K., Alhasso, A., ...

& Thompson, A. (2017). Partial-breast radiotherapy after breast conservation surgery for patients with early breast cancer (UK IMPORT LOW trial): 5-year results from a multicentre, randomised, controlled, phase 3, non-inferiority trial. *The Lancet*, *390*(10099), 1048-1060.

[14] Funke, B., López-Puertas, M., Stiller, G. P., & Von Clarmann, T. (2014). Mesospheric and stratospheric NOy produced by energetic particle precipitation during 2002–2012. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *119*(7), 4429-4446.

[15] González-Galarza, F. F., Takeshita, L. Y., Santos, E. J., Kempson, F., Maia, M. H. T., Silva, A. L. S. D., ... & Middleton, D. (2015). Allele frequency net 2015 update: new features for HLA epitopes, KIR and disease and HLA adverse drug reaction associations. *Nucleic acids research*, *43*(D1), D784-D788.

[16] Clarke, S. (2013). Safety leadership: A meta-analytic review of transformational and transactional leadership styles as antecedents of safety behaviours. *Journal of occupational and organizational psychology*, *86*(1), 22-49.

[17] Kavvadias, S., Drosatos, G., & Kaldoudi, E. (2020). Supporting topic modeling and trends analysis in biomedical literature. *Journal of Biomedical Informatics*, *110*, 103574.

[18] KOLEKAR, Nitin, MUKHERJI, Suchi Subhra, et BANERJEE, Arindam. Numerical modeling and optimization of hydrokinetic turbine. In : Energy Sustainability. 2011. p. 1211-1218.