

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche scientifique

المدرسة الوطنية العليا للعلوم والبحر وتهيئة الساحل

École nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement du littoral



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme master 2

En l'environnement marin et côtier

Option : ingénierie de l'environnement marin et côtier

Thème

***Caractérisations spatio-temporelles des régimes
du vent dans le bassin Algérien***

Présenté par

Chahrour meriem

Brihoum malika

Encadré par

M. Benyahia Firad

M. Boufeniza redouane larbi

Soutenue publiquement le 28 juin 2025, devant le jury composé de :

M. KADA MOHAMED	MAA	Président	(ENSSMAL)
M.FIRAD.B	MCB	Promoteur	(ENSSMAL)
M.BOUFENIZA RL	Chercheur	Co-promoteur	(NUIST)
M.FERNANE Lounes	MCB	Examinateur	(ENSSMAL)

REMERCIEMENT

Avant tout, nous remercions Allah, le Tout-Puissant et Miséricordieux, de nous avoir accordé la foi, la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur, *Dr. Benyahia Firad*, pour la confiance qu'il nous a accordée, ainsi que pour ses remarques pertinentes, ses conseils avisés, ses encouragements constants et sa disponibilité précieuse tout au long de ce projet.

Nos remerciements s'adressent également à notre Co-promoteur, *Dr. Boufeniza Redouane Larbi*, pour son accompagnement, ses orientations, ses conseils et son soutien, qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à *M. Mohamed Kada*, président du jury, et à *M. FERNANE Lounes*, examinateur, pour le temps précieux qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail. Leurs observations pertinentes et leurs remarques constructives ont grandement enrichi ce mémoire et contribué à son amélioration.

Nous souhaitons aussi remercier l'ensemble des enseignants de l'ENSSMAL qui ont contribué, chacun à leur manière, à notre formation.

Notre reconnaissance va enfin aux membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour leurs observations enrichissantes.

Nous n'oublions pas d'exprimer notre gratitude à toutes les personnes, de près ou de loin, qui nous ont soutenus tout au long de cette aventure.

□ وَهُوَ الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيحَ بُشْرًا بَيْنَ يَدَيْ رَحْمَتِهِ □ الأعراف : □□□

تعد الرياح من أبرز الظواهر الكونية التي تتنكر امامنا يوميا، ومع ذلك يغفل الكثيرون عن دقتها وإعجازها، في هذه الآية المباركة تتجلى رحمة الله ولطفه بعباده، اذ جعل من الرياح مبشرات بنزول الغيث، تحمل السحب، وتدفعها نحو الأرض العطشى، وقد دفعنا الى هذا الاختيار أيضا ما ورد في القران الكريم من آيات عظيمة تصف الرياح في مواضع الرحمة، مما يبين أن الرياح ليست فقط مظهرا طبيعيا بل اية من آيات الله التي تستحق التدبر والبحث العلمي والإيماني.

كما ان الرياح تؤدي دورا محوريا في التوازن البيئي والمناخي، الامر الذي يجعل دراستها علميا وقرانيا امرا يجمع بين العلم والإيمان، ويعكس التكامل بين الدين والمعرفة، وهو ما طمحننا الى إبرازه من خلال هذه المذكرة.

Le vent est l'un des phénomènes cosmiques les plus remarquables qui se manifestent devant nous chaque jour, et pourtant, nombreux sont ceux qui en ignorent la précision et le caractère miraculeux. Dans ce verset béni, se manifeste la miséricorde de Dieu et Sa bienveillance envers Ses serviteurs : Il a fait du vent un annonciateur de la pluie, transportant les nuages et les poussant vers la terre assoiffée.

Ce choix s'est également imposé à nous en raison des nombreux versets coraniques grandioses décrivant le vent comme un signe de miséricorde, ce qui montre que le vent n'est pas simplement un phénomène naturel, mais bien un signe parmi les signes divins qui mérite réflexion, étude scientifique et méditation spirituelle.

De plus, le vent joue un rôle central dans l'équilibre environnemental et climatique, ce qui rend son étude à la fois scientifique et coranique, un domaine où se rejoignent foi et savoir, et qui reflète l'harmonie entre religion et connaissance, un message que nous avons voulu mettre en lumière à travers ce mémoire.

DEDICACE

Tout d'abord je dédie ce modeste travail :

À moi-même,

Pour chaque pas franchi dans le doute, chaque nuit blanche endurée, Ce mémoire est le fruit de mes efforts, de ma patience et de ma confiance en Dieu.

À ma mère,

La lumière de mes jours, le soutien de chaque instant. Ton amour et tes prières ont été la clé de ma réussite.

À mon père, Celui qui m'a appris à donner sans attendre, à avancer avec dignité. Que Dieu te protège et te comble de Ses bénédictions.

À mes sœurs Amina et Douaa

vos sourires et votre tendresse sont des refuges doux.

Chaque instant avec vous est un trésor que je chéris profondément.

À mes deux étoiles Serine et Mouna, mes chères nièces, Vous illuminez mes journées. Votre innocence, vos sourires et vos câlins sont une source de bonheur pur. Que Dieu vous protège.

À mes deux frères, Zakaria et Mohamed

Vous êtes mes soutiens silencieux, mes repères solides. Merci pour votre présence, vos encouragements et votre affection discrète. Que Dieu vous protège et vous accorde le succès dans tous les aspects de votre vie.

À mes amies précieuses,

Malika, mon binôme pour toujours,

Maissa., Maroua, faten, Amani, Rania, Maram,

vous avez été des éclats de lumière dans cette aventure.

MERIEM Chahrour

DEDICACE

À moi-même

À moi-même, je me remercie profondément pour chaque heure tardive, chaque page blanche domptée, et chaque obstacle transformé en élan. Je suis fière de toi pour avoir mené ce travail jusqu'au bout.

À ma mère, source inépuisable de tendresse, pour tes gestes délicats, tes paroles rassurantes face au doute, et ton amour inconditionnel. Ce travail est un hommage à ta force.

À mon père, pilier silencieux et protecteur, pour ta présence discrète mais constante, pour ton regard qui m'élève même dans mes moments d'incertitude. Ce projet est aussi le reflet de toi.

À mon frère Nadir, mon partenaire de victoire et gardien de mon sourire : tes blagues inattendues et ton énergie m'ont allégée du stress à chaque fois.

À mes sœurs Rania, Mariem et Manar, la symphonie de ma famille : votre soutien constant, vos messages matinaux « comment vas-tu ? », et vos sourires ont été ma force quotidienne.

À mes amies

À mes amies, sources d'optimisme dans ce long marathon.

À Meriem, ma fidèle binôme,

À Hadil, khadija, Maram., Aridj, Rania, Amani... merci pour les pauses café rafraîchissantes, nos

Moments d'extase partagés, et vos messages « tu es formidable » qui résonnaient comme des échos d'encouragement.

MALIKA Brihoum

Table des matières

REMERCIEMENT	2
DEDICACE	5
LISTES DES FIGURES	7
<i>Liste des Tableaux</i>	9
LISTE D'ABREVIATIONS	10
LISTE DES SYMBOLES	11
RESUME	12
<i>Abstract</i>	13
<i>ملخص</i>	14
INTRODUCTION	16
CHAPITRE I : Généralité	18
I.1 Vent	19
I.2 Vitesse du vent	20
I.3 Direction du vent.....	21
I.4 Les anomalies.....	22
I.5 Empirical Orthogonal Functions(EOF)	Error! Bookmark not defined.
I.6 Parc éolien offshore.....	23
I.7 L'investissement dans l'énergie éolienne sur mer et sur terre.....	24
CHAPITRE II : Matériels Et Méthodes	26
II.1 Matériels	27
II.1.1 Base des données	27
II.1.2 Logiciels utilisés	30
II.1.3 Outils utilisé.....	30
II.2 Couverture temporelle.....	30
II.3 Zone d'étude	31
II.2 Méthodologie	32
II.2.1 Analyse statistique descriptive	32
II.2.2 Analyse spatio-temporelle.....	32
II.2.2.1 L'analyse des anomalies	32

II.2.2.2 Empirical Orthogonal Functions (EOF).....	32
II.2.2.3 Le test de Mann-Kendall.....	33
II.2.2.1 Analyse temporelle	33
II.2.2.2 Analyse spatiale	33
II.2.3 Parc éolienne offshore	34
CHAPITRE III :	36
<i>Résultats Et Discussion</i>	36
<i>III. Les Résultats</i>	37
III.1 Analyses Statistique descriptive	37
III.2 Analyse Spatio-temporelle	43
III.2.1 Variation Saisonnière	43
III.2.1 Variation Mensuelle	44
III.2.1 Variation annuelle	45
III.2.1 : la décomposition STL (Seasonal-Trend décomposition using Loess).....	46
III.2.2 Tests de tendance de Mann-Kendall	47
III.2.3 Empirical Orthogonal Functions(EOF)	48
III.2.4 Les anomalies.....	49
III.2.4.1 Anomalies saisonnières	49
III.2.4.2 Anomalies Mancieulles	50
III.2.4.3 Anomalie annuelle.....	51
III.3 Parc éolien offshore	51
IV. Discussion	57
CONCLUSION	64
BIBLIOGRAPHIE	66
ANNEXES	67

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Origine du vent (Yves Desnoës, 2003)	19
Figure 3: influence du frottement hémisphère sud	21
Figure 2: Influence du frottement hémisphère Nord.....	21
<i>Figure 4: Structure et composants d'une installation éolienne.</i>	23
Figure 5: Processus de collecte des données	27
<i>Figure 6: Situation géographique de la zone d'étude (ZEE)</i>	31
<i>Figure 7:Distribution Fréquentielle des Vitesses du Vent (%)</i>	38
Figure 8: Répartition directionnelle du vent (%) selon les points cardinaux	39
Figure 9: Distribution des vitesses de vent (%) selon les directions cardinales principales	40
Figure 10: Évolution des Vitesses Moyennes Mensuelles du Vent (1940-2024).....	41
Figure 11: Variation Horaire de la Direction et de la Vitesse du Vent	42
<i>Figure 12:Variation Saisonnière de la Vitesse moyenne du Vent sur la Période 1940–2024</i>	43
Figure 13: Distribution Mensuelle de la Vitesse moyenne du Vent	44
<i>Figure 14: Distribution de la moyenne annuelle de la vitesse du vent (1940–2024)</i>	45
<i>Figure 15: la décomposition STL (Seasonal-Trend décomposition using Loess)</i>	46
<i>Figure 16:Évolution annuelle de la vitesse du vent (1940–2024) avec test de tendance de Mann-Kendall</i>	47
<i>Figure 17: Empirical Orthogonal Functions(EOF) appliquée à la vitesse du vent dans la zone économique exclusive</i>	48
Figure 18 : Anomalies saisonnières de la vitesse du vent (1940–2024)	49

Figure 19: Anomalies Mensuelles de la vitesse du vent (1940–2024)	50
<i>Figure 20:</i> Anomalie spatiale de la vitesse moyenne du vent dans le bassin algérien (1940-2024)	51
<i>Figure 21:</i> ZEE algérienne avec la localisation des meilleurs sites identifiés pour	51
<i>Figure 22:</i> la Performance des Fermes Éoliennes Offshore	53

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Principales bibliothèques Python utilisées pour l'analyse et la visualisation des données météorologiques	29
Tableau 2: <i>Statistiques descriptifs de la vitesse de vent de toute la période</i>	37
Tableau 3: Caractéristiques des trois meilleurs sites identifiés pour l'exploitation de l'énergie éolienne offshore en ZEE	52
Tableau 4: la production énergétique.....	53
Tableau 5: Analyse Globale des Sites (Économie, Environnement, Société, Infrastructures)	55

LISTE D'ABREVIATIONS

ERA5: Fifth Generation ECMWF Reanalysis for the Global Climate

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather forecasts

CDS : Copernicus Climate Data Store

ZEE : Zone Économique Exclusive

EOF: Empirical Orthogonal Function (Function Orthogonal Empirique)

STL: Seasonal-Trend decomposition using Loess

U10 : Composante zonale du vent à 10 mètres

V10 : Composante méridienne du vent à 10 mètres

NetCDF : Network Common Data Form (format de données scientifique)

WAsP: Wind Atlas Analysis and Application Program

LISTE DES SYMBOLES

V : Vitesse du vent (m/s)

P (rhoa) : Densité de l'air (kg/m³)

A : Surface balayée par les pales de l'éolienne (m²)

Cp : Coefficient de puissance

P : Puissance éolienne (W ou MW)

Profondeur : Profondeur en mer

Score : Indice composite pour l'évaluation du potentiel offshore

m/s : Mètres par seconde

MW : Mégawatt

Km: Kilomètre

RESUME

Le vent constitue un paramètre météorologique fondamental, intervenant dans de nombreux processus atmosphériques, océaniques et environnementaux. Il influence la circulation atmosphérique, la dispersion des polluants, la modulation des températures et conditionne plusieurs activités humaines, telles que la navigation maritime, l'aviation, la gestion des risques côtiers et le développement des énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne. Le bassin algérien, caractérisé par une dynamique océanographique marquée, revêt un intérêt stratégique pour de nombreuses activités économiques. Cependant, la variabilité spatio-temporelle des régimes de vent y demeure encore peu documentée, en particulier concernant leur saisonnalité, leur intensité et leur direction. Cette lacune limite la compréhension des mécanismes atmosphériques locaux et freine l'exploitation optimale de cette ressource énergétique. Dans ce contexte, cette étude vise à analyser la variabilité des vitesses et des directions du vent à différentes échelles spatiales et temporelles, à travers l'exploitation des données issues du modèle de réanalyse ERA5 (Cinquième réanalyse du climat mondial du CEPMMT) sur une période de 84 ans (1940-2024). Les objectifs poursuivis sont les suivants : i. Caractériser les régimes de vent dominants sur le littoral algérien; ii. Identifier les zones particulièrement adaptées aux installations éoliennes offshore. Les résultats obtenus mettent en évidence une hétérogénéité spatio-temporelle marquée des régimes de vent le long des côtes algériennes, ainsi qu'un potentiel significatif pour le développement de l'énergie éolienne, notamment dans les zones côtières. L'analyse des séries temporelles et des cartographies de vent permet d'apporter des éléments de réponse sur la dynamique éolienne régionale et d'ouvrir des perspectives pour une meilleure gestion des ressources marines et énergétiques. Ce travail souligne l'importance des bases de données climatiques longues et cohérentes pour combler le déficit de connaissances sur les régimes de vent dans le bassin algérien. Une compréhension approfondie de leur variabilité, en termes de saisonnalité, d'intensité et de direction, est essentielle pour anticiper les impacts climatiques et valoriser durablement le potentiel énergétique éolien de la région.

Mots clés : Régimes de vent, Variabilité spatiotemporelle, Bassin Algérien, Analyse des tendances, éoliennes offshore

Abstract

Wind is a fundamental meteorological parameter involved in numerous atmospheric, oceanic, and environmental processes. It influences atmospheric circulation, pollutant dispersion, temperature modulation, and affects various human activities such as maritime navigation, aviation, coast risk management, and the development of renewable energies—particularly wind energy. The Algerian basin, characterized by marked oceanographic dynamics, holds strategic importance for many economic activities. However, the spatio-temporal variability of wind regimes in this area remains insufficiently documented, especially regarding their seasonality, intensity, and direction. This gap limits the understanding of local atmospheric mechanisms and hinders the optimal exploitation of this energy resource. In this context, the present study aims to analyze the variability of wind speeds and directions at different spatial and temporal scales by utilizing data from the ERA5 (Fifth Generation ECMWF Reanalysis for the Global Climate) reanalysis model over a period of 84 years from (1940-2024). The objectives are as follows: i. to characterize the dominant wind regimes along the Algerian coast. ii. Identify areas particularly suitable for offshore wind farm installations. The results highlight a pronounced spatio-temporal heterogeneity of wind regimes along the Algerian coastline, as well as a significant potential for wind energy development, particularly in coastal areas. The analysis of time series and wind maps provides insights into regional wind dynamics and opens new perspectives for better management of marine energy resources. This work emphasizes the importance of long and consistent climate datasets to fill the knowledge gap concerning wind regimes in the Algerian basin. A thorough understanding of their variability—in terms of seasonality, intensity, and direction—is essential for anticipating climate impacts and sustainably harnessing the region's wind energy potential.

Keywords: Wind regimes, Spatio-temporal, variability, Algerian basin, Trend analysis, Wind farm

ملخص

تعد الرياح عاملا أساسيا في الأرصاد الجوية، إذ تشارك في العديد من العمليات الجوية والمحيطية والبيئية. فهي تؤثر على دوران الغلاف الجوي، وانتشار الملوثات، وتعديل درجة الحرارة، وتؤثر على العديد من الأنشطة البشرية، مثل الملاحة البحرية والطيران، وإدارة المخاطر الساحلية، وتطوير الطاقات المتجددة، وخاصة طاقة الرياح. يعد حوض الجزائر، الذي يتميز بديناميكيات محيطية واضحة، ذات أهمية استراتيجية للعديد من الأنشطة الاقتصادية ومع ذلك، لا يزال التباين المكاني والزمني لأنظمة الرياح غير موثق بشكل كاف لا سيما فيما يتعلق بموسميتها وشدها واتجاهها. تحدد هذه الفجوة من مفهومنا للأليات الجوية المحلية وتعيق الاستغلال الأمثل لهذا المورد من الطاقة. في هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تباين سرعات الرياح واتجاهاتها على نطاقات مكانية وزمانية مختلفة، باستخدام بيانات على مدى 84 عاما. الأهداف هي: 1. تحديد خصائص أنظمة الرياح السائدة على الساحل الجزائري 2. تحديد المناطق ذات الإمكانيات العالية، بالإضافة إلى إمكانيات كبيرة لتطوير طاقة الرياح، لا سيما في المناطق الساحلية. يقدم تحليل السلاسل الزمنية وخرائط الرياح رؤية ثاقبة حول ديناميكيات الرياح الإقليمية، ويفتح افقا لإدارة أفضل للموارد البحرية وموارد الطاقة. يسلط هذا العمل الضوء على أهمية قواعد بيانات المناخية طويلة المدى والمتسقة لسد الفجوة المعرفية حول أنظمة الرياح في حوض الجزائر. يعد الفهم الشامل لتقلباتها، من حيث الموسمية والشدة والاتجاه، امرا أساسيا لتوقع تغير المناخ وتطوير إمكانيات طاقة الرياح في المنطقة بشكل مستدام.

الكلمات المفتاحية: أنظمة الرياح، التباين المكاني والزمني، حوض الجزائر، تحليل الاتجاهات، مزارع الرياح

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le vent constitue un paramètre météorologique fondamental, intervenant dans de nombreux processus atmosphériques, océaniques et environnementaux. Il influence la circulation atmosphérique, la dispersion des polluants, la modulation des températures et conditionne plusieurs activités humaines, telles que la navigation maritime, l'aviation, la gestion des risques côtiers et le développement des énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne. Le bassin algérien, caractérisé par une dynamique océanographique marquée, Il a une importance stratégique pour de nombreuses activités économiques. Cependant, la variabilité spatio-temporelle des régimes de vent y demeure encore peu documentée, en particulier concernant leur saisonnalité, leur intensité et leur direction. Cette lacune limite la compréhension des mécanismes atmosphériques locaux et freine l'exploitation optimale de cette ressource énergétique, L'analyse des séries temporelles et la cartographies de vent permet d'apporter des éléments de réponse sur la dynamique éolienne régionale et d'ouvrir des perspectives pour une meilleure gestion des ressources marines et énergétiques. Ce travail souligne l'importance des bases de données climatiques longues et cohérentes pour combler le déficit de connaissances sur les régimes de vent dans le bassin algérien. Une compréhension approfondie de leur variabilité, en termes de saisonnalité, d'intensité et de direction, est essentielle pour anticiper les impacts climatiques et valoriser durablement le potentiel énergétique éolien de la région, notamment dans le contexte de la transition énergétique et de l'essor des projets de parcs éoliens offshore, qui représentent une voie prometteuse pour la valorisation durable du potentiel énergétique maritime.

Cette étude vise à analyser la variabilité des vitesses et des directions du vent à différentes échelles spatiales et temporelles dans le bassin algérien durant les 84ans (1940 à 2024), à travers l'exploitation des données issus du modèle de réanalyse ERA5 , cette étude peut nous conduire à déterminer les caractéristiques principales des vents notamment leur direction, vitesse ainsi que les facteurs qui influence le vent (liés aux grands systèmes météorologiques mondiaux), ou climatique (en lien avec le changement climatique à long terme).

En outre, elle permet identifier les zones particulièrement exposées à des vents forts, Les objectives poursuivis sont les suivants :

- i. Caractériser les régimes de vent dominants sur le littoral algérien
- ii. Identifier les zones particulièrement adaptées aux installations éoliennes offshore.

Pour répondre à ces objectifs nous avons adopté une méthodologie fondée sur l'analyse de données (série temporelle) météorologique et environnementales, les données climatiques ont été obtenus à partir ERA5 et ainsi, ces plateformes fournissent des informations détaillées à moyenne résolution sur des variables essentielles telles que la vitesse du vent, sa direction et son intensité. Concernant les travaux portant sur le régime des vents dans le bassin algérien, les premières recherches sur le potentiel éolien en Algérie ont été menées par (Diaf *et al.*, 2007) , Elles ont conclu que les opportunités d'exploitation de l'énergie éolienne dans le pays étaient limitées, Par la suite, Abdeslam en 2011, ont étudié le potentiel éolien de la région de Ténès en utilisant le logiciel WAsP. Leur étude, en collaboration avec (Dehmas *et al.*, 2011). S'est focalisée sur l'intégration de l'énergie éolienne avec une unité de dessalement de l'eau de mer sur le site.

Ce travail présenté est structuré en 3 chapitres :

Le premier chapitre Généralités présente le cadre scientifique de l'étude et les notions de base nécessaires à la compréhension du travail.

Le deuxième chapitre matériel et méthode Ce chapitre présente les données, outils et méthodes utilisés pour analyser les régimes de vent dans le bassin algérien.

Le Troisième chapitre présente les résultats de l'analyse des régimes de vent, leur variabilité spatio-temporelle, suivis d'une discussion approfondie et interprétative et traite du potentiel de l'énergie éolienne offshore dans le bassin algérien

CHAPITRE I : Généralité

I.1 Vent

Le vent désigne le déplacement d'une masse d'air provoqué par des différences locales de température et de pression entre deux zones (Figure 1). Ce phénomène peut se manifester sous différentes formes, allant d'une légère brise à des tempêtes violentes, avec des vitesses et des étendues géographiques très variables selon le temps et l'espace. Le vent joue un rôle fondamental dans de nombreux processus naturels, tels que l'oxygénation des milieux aquatiques (océans, rivières), l'érosion des sols ou encore le transport des particules et des minéraux. De nos jours, il constitue également une ressource précieuse exploitée par l'homme pour produire de l'énergie renouvelable, notamment à travers l'énergie éolienne (Boudia *et al.*, 2013).

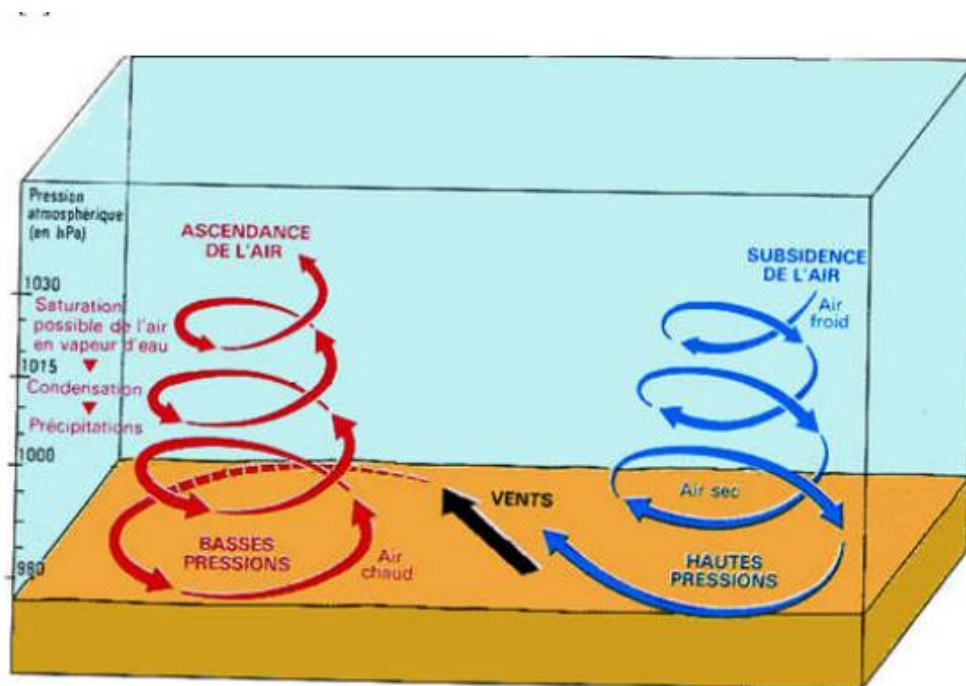


Figure 1: Origine du vent (Yves Desnoës, 2003)

Le vent correspond à un déplacement de l'air, généralement dans le sens horizontal. Ce terme s'applique principalement aux mouvements atmosphériques horizontaux, tandis que les mouvements verticaux ou quasi verticaux sont désignés par le terme courants. Les vents naissent des différences de pression atmosphérique, elles-mêmes causées principalement par des écarts de température. Ces variations de température et de pression résultent d'une répartition inégale de l'énergie solaire à la surface de la Terre, ainsi que des contrastes thermiques entre les continents et les océans. Lorsque deux régions voisines présentent des

températures différentes, l'air chaud plus léger a tendance à s'élever et à se déplacer au-dessus de l'air plus froid et plus dense. (Dahoum, 2020).

I.1.2 Différence entre le vent qui souffle en (mer) et le vent qui souffle en cote (terre) :

Les caractéristiques des vents diffèrent nettement entre les zones maritimes et côtières, en raison des spécificités de leur environnement. En mer, la surface plane et lisse de l'eau favorise des vents plus réguliers et constants, avec une turbulence réduite (Miller *et al.*, 2003). À l'inverse, à proximité des côtes, les irrégularités du relief telles que les arbres, les bâtiments ou les collines provoquent des frottements qui perturbent le flux d'air, entraînant des variations de vitesse et de direction (Jensen *et al.*, 2017). Par ailleurs, les contrastes thermiques entre la terre et la mer génèrent des phénomènes spécifiques, comme les brises côtières, qui n'existent pas en haute mer (Cheng, Ho and Teng, 2022). De plus, les vents marins, plus chargés en humidité, influencent de manière notable les conditions météorologiques locales (Orlic *et al.*, 2025). Comprendre ces différences est essentiel pour analyser les microclimats côtiers et les dynamiques atmosphériques en milieu marin.

I.2 Vitesse du vent

La vitesse du vent désigne le mouvement de l'air dans l'atmosphère, généralement mesuré à une hauteur standard de 10 mètres au-dessus de la mer. Elle est causée par les différences de pression atmosphérique qui résultent de l'irradiation solaire inégale de la surface terrestre (Zhang *et al.*, 2018). Cette vitesse est une composante essentielle de l'étude des phénomènes climatiques, des prévisions météorologiques, ainsi que dans des applications pratiques comme la production d'énergie éolienne. Elle peut être mesurée à l'aide de différents instruments, tels que l'anémomètre, et peut être exprimée en mètres par seconde (m/s) ou en kilomètres par heure (km/h). La vitesse du vent varie considérablement en fonction des conditions géographiques, des saisons, et des phénomènes météorologiques locaux, tels que les tempêtes ou les cyclones (Zhao *et al.*, 2024).

La formule (Ucar and Balo, 2010) :

$$Vitesse \left(\frac{km}{h} \right) = Vitesse (m/s) \times 3,6$$

I.3 Direction du vent

En première approximation, si l'on considère que la vitesse et la direction du vent restent constantes, l'accélération des particules d'air est nulle et les forces en présence s'équilibrent (Yves Desnoës, 2003). En altitude, au-dessus de 1500 mètres, le frottement peut être négligé le vent résulte alors de l'équilibre entre la force de pression et la force de Coriolis (Zhang *et al.*, 2018). Ce phénomène, connu sous le nom d'équilibre géostrophique, implique que le vent souffle parallèlement aux isobares en laissant les basses pressions à droite dans l'hémisphère Nord et à gauche dans l'hémisphère Sud. Cette configuration confirme la loi de Buys-Ballot, selon laquelle dans l'hémisphère Nord, le vent tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour des dépressions, et dans le sens horaire autour des anticyclones (figure 2 ci-dessous), avec une inversion de sens dans l'hémisphère Sud (figure 3 ci-dessous). En revanche, près de la surface terrestre, la présence de la force de frottement modifie cet équilibre, qui devient alors un système à trois forces : pression, Coriolis et frottement. La direction du vent s'en trouve déviée formant un angle par rapport aux isobares, celui-ci est généralement compris entre 20° et 40° sur les continents, et autour de 15° sur les mers. Le vent tend ainsi à pénétrer dans les dépressions et à s'éloigner des anticyclones (Pan *et al.*, 2019 ; Bigelow and Quaife, 2025).

La formule (Wilks, 2019) :

$$\theta = \arctan2(-u, -v) \times \left(\frac{180}{\pi}\right)$$

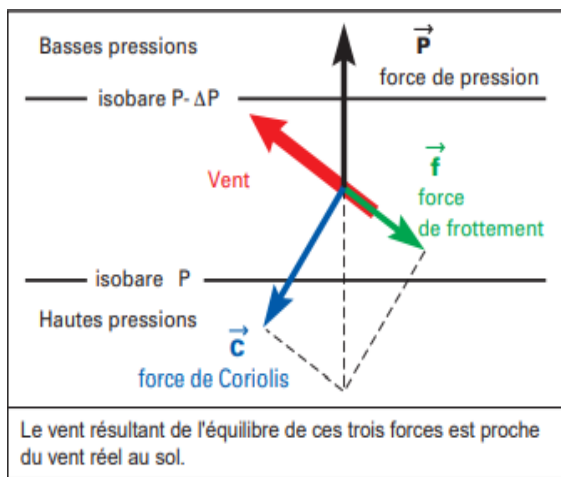


Figure 2: Influence du frottement hémisphère Nord

(Yves Desnoës, 2003)

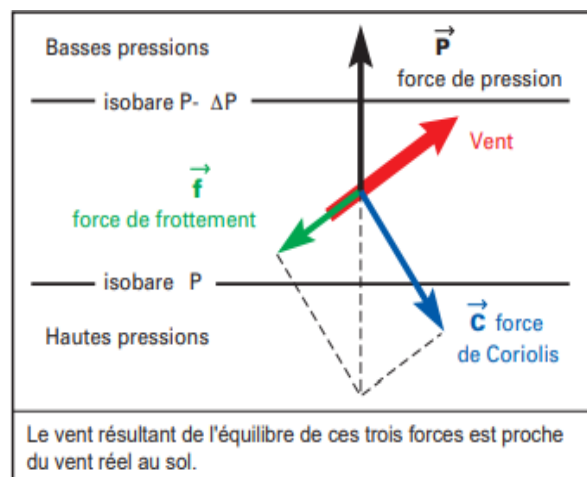


Figure 3: influence du frottement hémisphère sud

(Yves Desnoës, 2003)

I.4 Les anomalies

Une anomalie désigne l'écart, exprimé généralement en valeur absolue ou en pourcentage, entre une valeur observée d'un paramètre climatique ou océanographique (telle que la température de l'air ou de la mer, la vitesse ou la direction du vent, le niveau de la mer, la pression atmosphérique, l'humidité, etc.) et une valeur de référence ou moyenne climatologique connue sous le nom de « normale » ou « climatologie » (Ragone *et al.*, 2019).

Cette valeur de référence est habituellement déterminée à partir d'une période de référence standard, conformément aux recommandations de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Cette période est choisie de manière à lisser les fluctuations interannuelles et à représenter un état moyen du climat pour la région et le paramètre considéré. Ainsi, l'anomalie met en évidence les écarts ponctuels ou prolongés par rapport à ce climat moyen. Ces écarts peuvent être positifs (supérieurs à la normale) ou négatifs (inférieurs à la normale), et se mesurer sur différentes échelles temporelles (quotidienne, mensuelle, saisonnière, annuelle, décennale) (Lionello, Conte and Reale, 2019).

I.5 L'analyse en fonctions orthogonales empiriques (FOE)

Les FOE peuvent être utilisées pour identifier les modes principaux de variabilité au sein d'un jeu de données. Une autre application courante consiste à filtrer certaines échelles de variabilité non désirées en ne conservant qu'un nombre limité de modes dominants ceux associés aux plus fortes variabilités, il est possible de reconstruire un champ tout en supprimant les variations de plus petite échelle. Cependant, l'analyse en FOE ne peut être réalisée au si le jeu de données est complet, ce qui implique la nécessité de corriger ou de supprimer toute donnée manquante au préalable. Le principe des FOE repose sur la recherche de fonctions orthogonales (déterminées empiriquement) qui décrivent la covariance de séries temporelles sur une grille spatiale donnée. Il convient toutefois de noter que les modes obtenus ne possèdent pas nécessairement une signification physique. En effet, certains phénomènes peuvent se répartir sur plusieurs FOE, notamment lorsque leurs valeurs propres sont proches et que les séries temporelles présentent un faible degré de liberté (Haddad *et al.*, 2020).

I.6 Parc éolien offshore

Dans les centrales électriques conventionnelles, des combustibles fossiles tels que le charbon, le gaz et le pétrole sont brûlés pour chauffer de l'eau, produisant de la vapeur à haute pression qui peut entraîner une turbine et, à son tour, un générateur électrique (Esteban *et al.*, 2011). Malheureusement, cela produit également du dioxyde de carbone et d'autres émissions nocives, tout en dépendant de ressources limitées qui doivent être constamment extraites du sous-sol et transportées jusqu'à la centrale (Alizé, 2023). Dans une éolienne, la rotation est obtenue grâce à la puissance propre, naturelle et en fin de compte illimitée du vent.

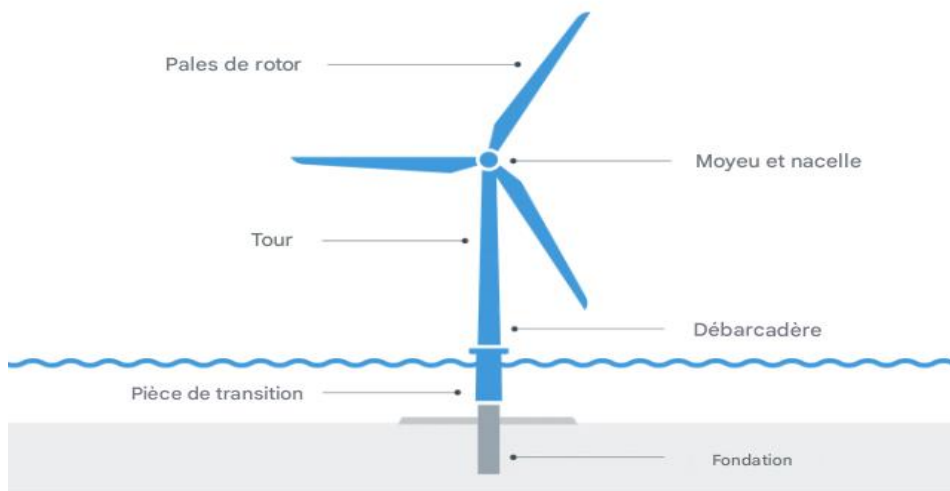


Figure 4: Structure et composants d'une installation éolienne.

(<https://orsted.se/vara-grona-losningar/havsbasead-vindkraft/vad-aar-havsbasead-vindkraft/hur-fungerar-vindkraftverk-till-havs>)

Une seule éolienne est capable de produire plusieurs mégawatts (MW) d'électricité. Pour augmenter la production d'énergie, plusieurs éoliennes sont regroupées pour former ce que l'on appelle un parc éolien (M.Esteban, 2011). Ces installations collectives fonctionnent comme de véritables centrales électriques à grande échelle, générant de l'électricité sans émettre de polluants (Perveen, Kishor and Mohanty, 2014). Les parcs éoliens en mer (offshore) sont composés de nombreuses éoliennes réparties sur de vastes zones océaniques. Chaque éolienne est solidement ancrée à une fondation fixée sur le fond marin ou flottant, supportant une tour qui s'élève au-dessus de la surface de l'eau. Cette élévation permet aux

pales de capter des vents plus forts et plus constants en altitude (Glaum, Neumann and Brown, 2023).

I.7 L'investissement dans éolien Terrestre et offshore

L'investissement dans l'énergie éolienne, qu'elle soit terrestre (onshore) ou maritime (offshore), représente aujourd'hui un levier essentiel pour la transition énergétique mondiale. L'éolien terrestre, repose sur l'installation d'éoliennes sur la terre ferme, généralement dans des zones bien exposées au vent, comme les plaines, les plateaux, les collines ou les zones côtières (Abderrahim *et al.*, 2019). Le choix de l'implantation est stratégique, car la régularité et la vitesse du vent conditionnent directement la rentabilité du projet. Grâce à un coût d'investissement relativement bas comparé à l'éolien en mer, à une technologie mature et bien maîtrisée, et à des délais de construction courts (généralement entre 1 et 2 ans) (McKenna *et al.*, 2021), l'éolien terrestre constitue aujourd'hui l'une des solutions les plus compétitives pour produire de l'électricité verte à grande échelle. Il bénéficie également d'une chaîne logistique et industrielle bien établie, ainsi que de retours d'expérience importants qui permettent d'optimiser les performances des parcs éoliens. (Cherif *et al.*, 2022)

En revanche, l'éolien offshore, implique l'installation d'éoliennes en milieu marin, généralement au large des côtes, là où les vents sont plus puissants, plus réguliers et moins turbulents qu'à terre. Cela permet une production d'électricité plus stable et prévisible (Chong Ng and Li Ran, 2016). Cependant, ce type de projet requiert des infrastructures beaucoup plus complexes : fondations adaptées aux conditions marines (fondations monopieux, jacket, ou flottantes pour les grandes profondeurs), câbles sous-marins pour transporter l'électricité vers le réseau terrestre, plateformes de maintenance, et navires spécialisés pour l'installation et l'entretien des équipements. Ces exigences techniques se traduisent par des coûts d'investissement et de maintenance nettement plus élevés que pour l'éolien terrestre (Tumse *et al.*, 2024).

En contrepartie, l'éolien offshore présente un potentiel énergétique considérable. Les parcs peuvent être de très grande taille et bénéficier de facteurs de charge supérieurs (c'est-à-dire une meilleure utilisation du potentiel de production par rapport au temps). Grâce aux progrès technologiques récents (développement des éoliennes de grande puissance, solutions flottantes pour les zones profondes, optimisation de la maintenance), l'éolien offshore est en

passé de devenir une composante clé de la transition énergétique mondiale, en diversifiant les sources d'énergie renouvelable et en réduisant la dépendance aux énergies fossiles (Caputo *et al.*, 2025).

CHAPITRE II : Matériels Et Méthodes

II.1 Matériels

II.1.1 Base des données

Afin de garantir une collecte de données rigoureuse et reproductible, nous avons suivi une méthodologie bien structurée. Celle-ci est résumée dans (Figure 5) ci-dessous, qui décrit les principales étapes de la préparation des données utilisées dans cette étude.

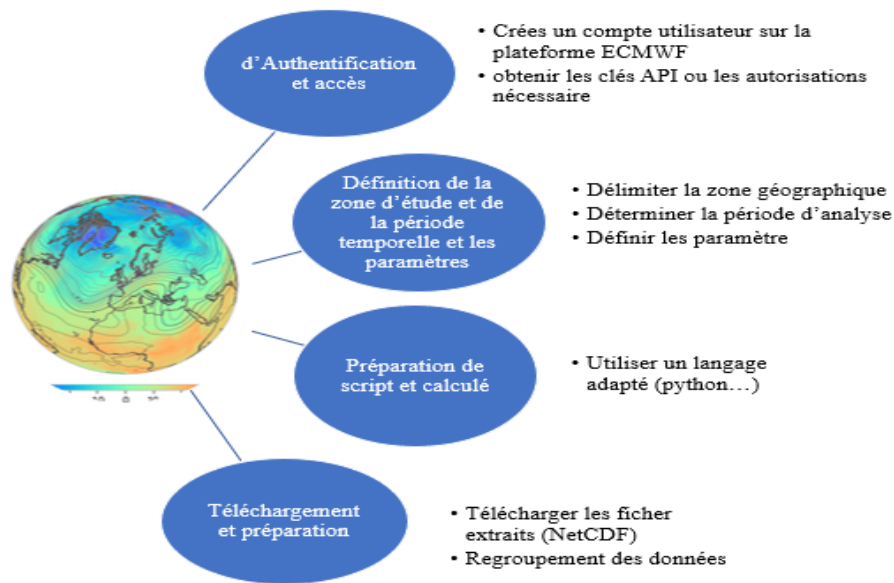


Figure 5:Processus de collecte des données

Le schéma (Figure 5) présenté illustre les principales étapes du processus de collecte et de préparation des données climatiques nécessaires à cette étude comme suite :

La phase d'Authentification et accès : qui consiste à obtenir les droits d'accès aux plateformes de données telles que Copernicus ou ECMWF, via une inscription ou une demande de clé API, les données sont disponibles à une résolution spatiale allant de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (27 830m) et a une résolution temporelle horaire. Elles couvrent trois dimensions (heur, latitude, longitude).

La définition de la zone d'étude et de la période temporelle : permet de cibler précisément la région concernée comme notre zone économique exclusive (ZEE) algérienne :

Nord : 38° 48' 3" N'; Sud : 35° 4' 14" N ; Est : 8° 38' 31" E ; Ouest : 2° 12' 44" W

Ainsi que la période à analyser (1940-2024), garantissant la pertinence des données extraites.

La préparation des scripts et calculé : a été réalisée à l'aide du langage Python, permettant d'automatiser la collecte et le traitement de variables climatiques spécifiques. Parmi celles-ci figurent U10, qui représente la composante zonale de la vitesse du vent, c'est-à-dire la vitesse du vent soufflant d'ouest en est à 10 mètres d'altitude, et V10, qui correspond à la composante méridienne, représentant la vitesse du vent soufflant du sud vers le nord à la même hauteur.

La densité de l'air (ρ ou rhoa) a également été prise en compte. Par ailleurs, la distance par rapport à la côte a été calculée afin de mieux caractériser les zones d'étude et d'interpréter les régimes de vent en fonction de la proximité du littoral.

L'étape de téléchargement et préparation : consiste à organiser les fichiers obtenus par regroupé dans un seul fichier, afin de disposer de données prêtes à être exploitées pour l'analyse.

Une fois les données téléchargées, L'étape suivante consiste à extraire les données à l'aide du langage Python, via l'environnement Jupiter Notebook. L'extraction des paramètres météorologiques s'effectue en identifiant chaque point par ses coordonnées géographiques (longitude, latitude) et son altitude, ainsi qu'un identifiant unique attribué à chaque point. Des bibliothèques spécialisées telles que xarray, numpy, matplotlib et cartopy sont utilisées pour assurer une manipulation souple des données, une analyse statistique approfondie et une visualisation cartographique efficace. Cette approche permet une grande flexibilité dans le traitement de longues séries temporelles et facilite la production de cartes dynamiques illustrant l'évolution spatiale et saisonnière des régimes de vent dans la région étudiée

Tableau 1 : Principales bibliothèques Python utilisées pour l'analyse et la visualisation des données météorologiques

Bibliothèque	description	Référence
Xarray	Une bibliothèque Python qui facilite la manipulation de données multidimensionnelles avec des dimensions nommées, idéale pour l'analyse spatio-temporelle des fichiers NetCDF.	(Hoyer and Hamman, 2017)
Numpy	Une bibliothèque essentielle de Python offrant des tableaux multidimensionnels et des fonctions rapides pour les calculs mathématiques et statistiques.	(Harris et al., 2020)
Matplotlib	Une bibliothèque de visualisation Python permettant de créer divers graphiques (courbes, histogrammes, boîtes à moustaches) statiques, animés ou interactifs.	(Ari and Ustazhanov, 2014)

Les données de vent utilisées dans cette étude proviennent de la réanalyse ERA5, incluant les composantes zonale (U10) et méridienne (V10) du vent, ainsi que la densité de l'air à une résolution spatiale allant de 0.25° x 0.25 (27 830m), Les données bathymétriques ont été extraites du modèle GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*), avec une résolution de 0.041° x 0.041° (4566 m), permettant une représentation détaillée des fonds marins. La Zone Économique Exclusive (ZEE) algérienne a été délimitée à partir des données officielles des frontières maritimes. Le traitement des données a été réalisé en langage Python, en extrayant la zone d'étude comprise entre 2°W et 9°E de longitude, et entre 35°N et 40°N de latitude. Une grille régulière a été générée, puis filtrée afin de ne conserver que les points situés en mer et à l'intérieur des limites de la ZEE, garantissant ainsi une analyse ciblée sur les zones offshore pertinentes pour l'évaluation du potentiel éolien.

II.1.2 Logiciels utilisés

L'environnement de développement principal utilisé est Anaconda, une distribution Python open-source intégrant un large éventail de bibliothèques scientifiques. Cet environnement a facilité l'installation et la gestion des packages nécessaires à l'analyse. Il comprend également Jupyter Notebook, qui a servi d'interface pour le codage interactif, l'exécution des scripts et la documentation des analyses (Rolon-Mérette *et al.*, 2016).

Le langage Python, utilisé via Jupyter Notebook, a permis le traitement des données, les analyses statistiques, la visualisation graphique, ainsi que l'automatisation des tâches de calcul sur l'ensemble des séries temporelles étudiées. Les bibliothèques (Tableau 1) ont été mobilisées pour manipuler les données climatiques sous format NetCDF, un format couramment utilisé en climatologie pour stocker des données multidimensionnelles (temps, latitude, longitude, etc.).

II.1.3 Outils utilisé

L'étude a été réalisée sur un (ordinateur portable) performant, équipé d'un processeur Intel Core i5, de 8 Go de (mémoire RAM) et d'un (disque SSD) de 1To. Cette configuration a permis une exécution fluide des scripts Python et la manipulation efficace de fichiers volumineux au format NetCDF. Une (connexion Internet) haut débit a été indispensable pour l'accès aux données via la plateforme CDS. Par ailleurs, un disque dur externe a été utilisé pour la sauvegarde régulière des données et la sécurisation des fichiers de travail.

Ce dispositif technique a permis d'assurer la rigueur, la traçabilité et la fiabilité des résultats produits tout au long de l'étude.

II.2 Couverture temporelle

Dans le cadre de cette étude, qui vise à caractériser de manière temporelle les régimes de vent dans le bassin algérien, nous avons choisi d'Analyser une période étendue allant de 1940 à 2024. Ce choix n'est pas anodin : il s'agit d'une fenêtre temporelle large, couvrant 84 années, ce qu'il couvre plusieurs cycles climatiques, et offre une base solide pour conduire une analyse approfondie. Une période aussi longue permet de mieux comprendre les tendances à long terme, les variabilités interannuelles et les changements possibles dans les dynamiques éoliennes affectant cette région.

Par ailleurs, afin de faciliter l'interprétation des évolutions temporelles, la période d'étude a été segmentée en sous-périodes de 30 ans [(1940-1969), (1970-1999), (2000-2024)]. Cependant, l'analyse des différentes périodes n'a pas révélé de différences marquées dans les régimes de vent, suggérant une relative stabilité, C'est pourquoi nous avons finalement choisi de conserver l'ensemble de la période 1940-2024 pour l'analyse globale.

II.3 Zone d'études

Le bassin algérien, qui fait partie du bassin ouest-méditerranéen, est caractérisé par une zone économique exclusive (ZEE) qui s'étend sur plus de 1600 km de côtes (Claus *et al.*, 2014). Le bassin algérien, également connu sous le nom de bassin Algéro-Provençal. Il s'étend entre 35°N et 40°N de latitude, et entre 2°W et 8,7°E de longitude. Il est délimité à l'est par le sous-bassin d'Alboran, à l'ouest par la Sardaigne, au sud par l'Algérie, et au nord par les îles Baléares (Sassi and Bourouba, 2022) (la figure 6).

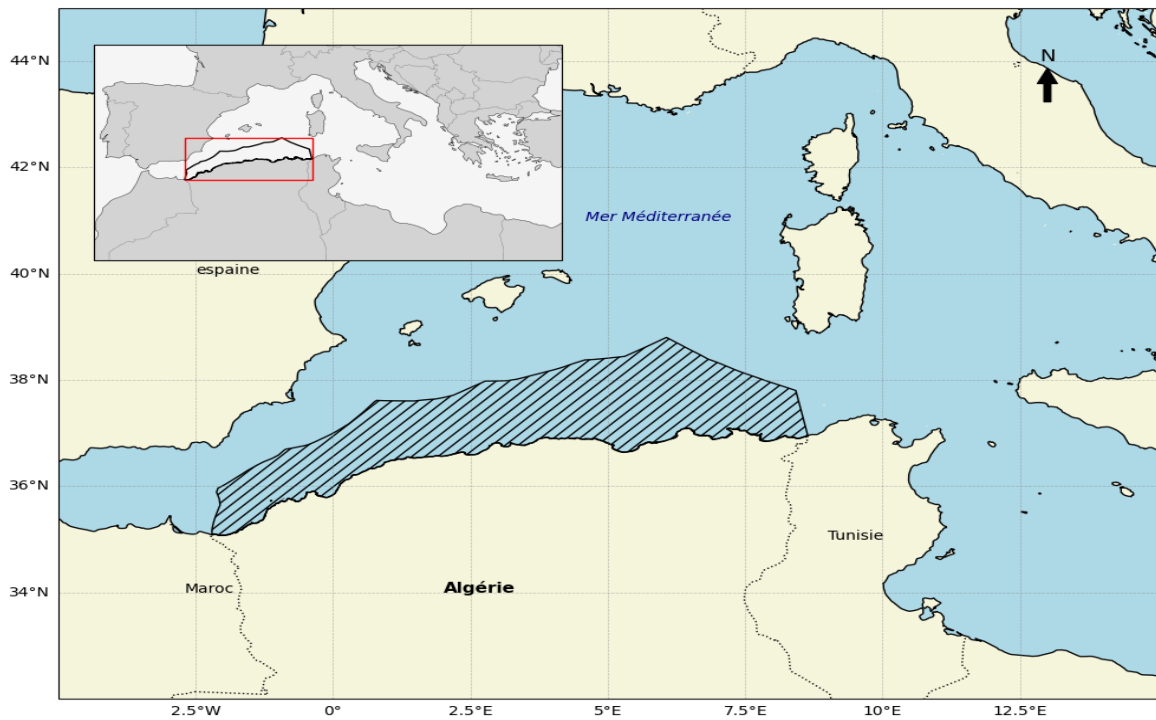


Figure 6: Situation géographique de la zone d'étude (ZEE)

II.2 Méthodologie

II.2.1 Analyse statistique descriptive

Une première analyse statistique descriptive a été réalisée afin de caractériser les régimes de vent. Des indicateurs comme la moyenne, l'écart-type, les valeurs maximales et minimales ont été calculés pour mieux comprendre la variabilité du vent. Cette étape permet de fournir un aperçu général des conditions éoliennes dans la région, d'identifier les périodes les plus ventées, et de détecter d'éventuelles irrégularités dans les données. La direction dominante du vent a également été analysée à l'aide de roses des vents, permettant de visualiser les orientations les plus fréquentes selon la période d'étude. Des histogrammes de vitesses et de directions ont été générés afin de mieux comprendre la distribution statistique des observations et d'identifier les régimes dominants.

II.2.2 Analyse spatio-temporelle

II.2.2.1 L'analyse des anomalies

L'analyse des anomalies spatio-temporelles a permis de détecter les écarts de vitesse du vent par rapport à la moyenne climatologique. Ces anomalies ont été représentées sous forme de cartes pour visualiser les zones où le vent était plus fort ou plus faible que la normale. Cela aide à comprendre la dynamique du vent sur le long terme et à mettre en évidence des événements climatiques particuliers.

La formule:

$$Anomalie_{vent} = V_{observé} - V_{climatique} \text{ (Trenberth and Shea, 2005)}$$

II.2.2.2 Empirical Orthogonal Functions (EOF)

Empirical Orthogonal Functions(EOF) a été utilisée pour identifier les modes dominants de variabilité dans les données de vent. Cette méthode permet de réduire la complexité des données tout en mettant en évidence les structures spatiales principales. Les premiers modes EOF montrent les régions qui varient de manière synchronisée, ce qui aide à comprendre les grandes tendances et les schémas de circulation atmosphérique.

II.2.2.3 Le test de Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall est un test statistique non paramétrique utilisé pour détecter une tendance monotone (croissante ou décroissante) au sein d'une série temporelle. Son principal avantage est de ne faire aucune hypothèse sur la distribution des données, ce qui le rend particulièrement adapté aux séries vitesse du vent. Ce test permet de vérifier si la tendance observée est statistiquement significative. En Python, le test peut être facilement appliqué en utilisant la bibliothèque **pymannkendall**. L'appel de la fonction se fait simplement par :

Résulte = mk. Original test(wind_speed)

II.2.2.1 Analyse temporelle

L'analyse temporelle a porté sur les variations de la vitesse du vent à différentes échelles mensuelle, saisonnière et interannuelle. Cette approche permet de suivre l'évolution du vent au cours 84 ans, de détecter les tendances générales (hausse ou baisse), et d'identifier les périodes de fortes ou faibles vitesses.

Elle est essentielle pour repérer les périodes de l'année où les conditions de vent sont les plus favorables ou, au contraire, les plus défavorables pour certaines activités humaines ou industrielles. Par exemple, pour la production d'énergie éolienne, il est essentiel de connaître les mois où les vitesses moyennes du vent sont les plus élevées afin d'optimiser la performance des turbines et la planification de la maintenance. Inversement, pour des secteurs comme la navigation, les travaux en mer, la pêche ou le tourisme côtier, il est tout aussi important d'identifier les périodes de vents forts ou turbulents qui peuvent représenter un risque ou une contrainte opérationnelle. Une analyse saisonnière détaillée permet donc d'adapter les activités aux régimes de vent, en tenant compte de la variabilité intra-annuelle.

II.2.2.2 Analyse spatiale

L'analyse spatiale a été réalisée pour cartographier la distribution géographique des vitesses du vent dans la zone d'étude. Elle permet de distinguer les zones homogènes, où les conditions sont similaires, des zones hétérogènes présentant une forte variabilité. Cette étape est importante pour identifier les régions les plus exposées au vent, ce qui peut être utile pour des applications comme l'implantation de parcs éoliens offshore ou l'évaluation des risques côtiers.

II.2.3 Parc éolienne offshore

La méthodologie mise en œuvre dans cette étude repose sur une approche intégrée combinant traitement de données climatiques, analyse spatio-temporelle et simulation énergétique, afin d'identifier les zones marines les plus adaptées à l'implantation d'éoliennes offshore dans la zone d'étude. Dans un premier temps, les composantes zonale (u_{10}) et méridienne (v_{10}) du vent ont été utilisées pour calculer la vitesse moyenne du vent via la formule :

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \text{ (Pryor and Barthelmie, 2010)}$$

En parallèle, la profondeur absolue a été extraite à partir des données bathymétriques, et la distance à la côte a été estimée par calcul de la distance minimale entre chaque point en mer et la ligne côtière. Les trois variables (vitesse, profondeur et distance) ont ensuite été combinées à travers un score composite défini par la formule :

$$\text{score} = V - (0,01 \times \text{profondeur}) - (0,01 \times \text{distance à la côte})$$

(Zergane, Smaili and Masson, 2018)

Cette formule accorde un poids principal à la vitesse du vent tout en pénalisant les zones trop profondes ou trop éloignées de la côte, afin de maximiser à la fois la production énergétique et la faisabilité technique. Les points situés à l'intérieur de la ZEE ont été filtrés, et seuls ceux appartenant au 10^e percentile des scores ont été retenus. Parmi eux, les trois emplacements présentant les scores les plus élevés ont été sélectionnés pour une analyse plus approfondie. Pour chacun de ces sites, une simulation de production a été réalisée en modélisant un parc de 20 éoliennes d'une puissance nominale de 15 MW. La production a été estimée selon la formule de puissance :

$$P = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times A \times v^3 \text{ (Yildiz, 2023)}$$

- C_p : coefficient de puissance (0.45)
- ρ : densité de l'air (rhoao)
- A : surface balayée
- v : vitesse du vent

Une fonction de type "Courbe de puissance" a ensuite été utilisée pour moduler la production réelle en fonction des vitesses caractéristiques :

- Vitesse de démarrage (3 m/s),
- Vitesse nominale (12 m/s)
- Vitesse d'arrêt (25 m/s).

L'estimation de la puissance éolienne disponible dépend fortement des caractéristiques techniques de la turbine, notamment le diamètre du rotor, la hauteur du mât, et le coefficient de puissance (C_p). Dans cette étude, nous considérons comme référence une éolienne offshore typique de dernière génération, dotée de pales de 100 mètres, et d'un coefficient de puissance de 0,45. Ce type de turbine correspond à une machine de puissance nominale de 15 MW, couramment utilisée dans les projets offshores européens récents. Ces paramètres ont été utilisés pour estimer la production éolienne à partir des vitesses de vent moyennes, La production a été simulée pour chaque heure sur la période 2000–2024, permettant de générer des séries temporelles représentatives et d'évaluer les performances énergétiques des trois sites retenus.

CHAPITRE III :
Résultats Et Discussion

III. Les Résultats

III.1 Analyses Statistique descriptive

Les statistiques descriptives jouent un rôle essentiel dans notre étude sur la caractérisation spatio-temporelle des régimes de vents dans le bassin algérien. Cette approche permet de quantifier, d'analyser et synthétiser les principales variables météorologiques liées aux vents, offrent ainsi une compréhension claire de leur distribution, de leur variabilité saisonnière et de leurs tendances spatiales. Elle fournit également des informations précieuses sur les relations entre les différentes composantes du vent (vitesse, direction) et leur évolution au fil du temps.

Tableau 2: Statistiques descriptifs de la vitesse de vent de toute la période

Statistique	Valeurs
Moyenne	5.59 m/s
Minimum	$3,28 \times 10^{-3}$ m/s
Maximum	24.16 m/s
Écart type	3.10 m/s
la médiane	5.22 m/s
Coefficient de variation	55.58%

Ce tableau présente les principaux paramètres statistiques permettant de caractériser la variabilité du régime du vent sur l'ensemble de la période analysée. La vitesse moyenne du vent sur la zone d'étude est de 5,59 m/s, traduisant des conditions de vent globalement modérées. La vitesse minimale enregistrée est extrêmement faible, à $3,28 \times 10^{-3}$ m/s, ce qui correspond à des périodes quasi calmes d'activité éolienne. En revanche, les vitesses maximales peuvent atteindre 24,16 m/s, témoignant de la survenue ponctuelle de vents très forts. Le coefficient de variation, relativement élevé (55,58 %), confirme cette grande dispersion des vitesses autour de la moyenne, illustrant un régime du vent très variable avec

Un écart type de 3,11 m/s, signalant une certaine instabilité du régime de vent durant la période analysée. La médiane, calculée est de 5,22 m/s, légèrement inférieure à la moyenne, suggère une distribution asymétrique vers les basses valeurs.

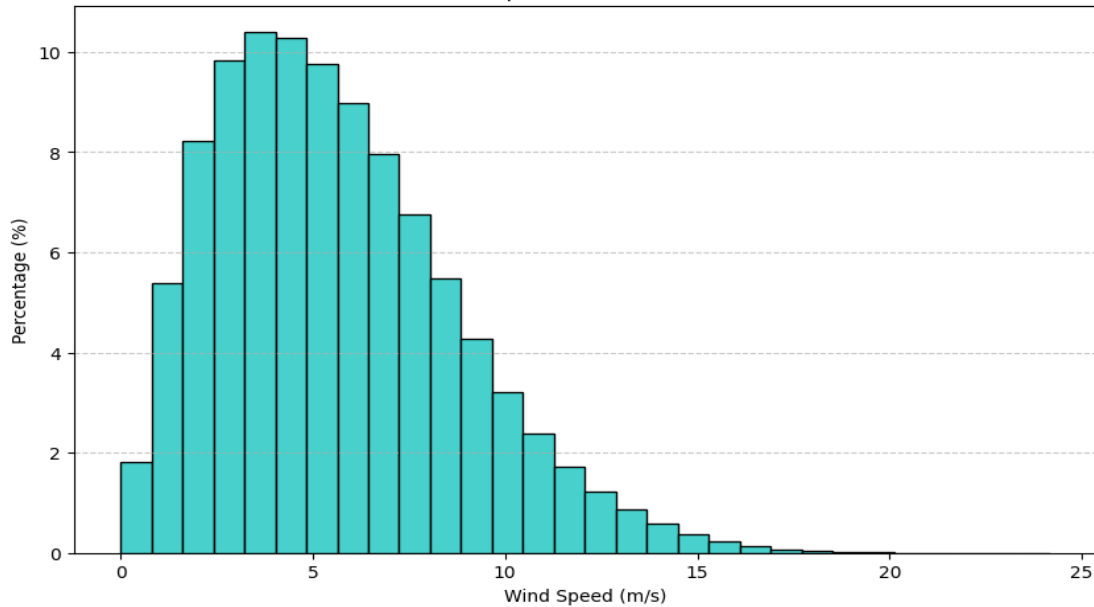


Figure 7: Distribution Fréquentielle des Vitesses du Vent (%)

L'analyse de l'histogramme de la distribution de la vitesse du vent montre une répartition asymétrique à droite, caractéristique d'un phénomène naturel soumis à de fortes variabilités. La majorité des observations se concentrent entre 3 et 7 m/s, avec une fréquence maximale autour de 4 à 5 m/s, représentant plus de 10 % du total (Figure 7). Cette distribution suggère que les régimes de vent faibles à modérés prédominent sur l'ensemble de la période étudiée. La diminution rapide de la fréquence au-delà de 10 m/s indique que les vitesses élevées sont rares.

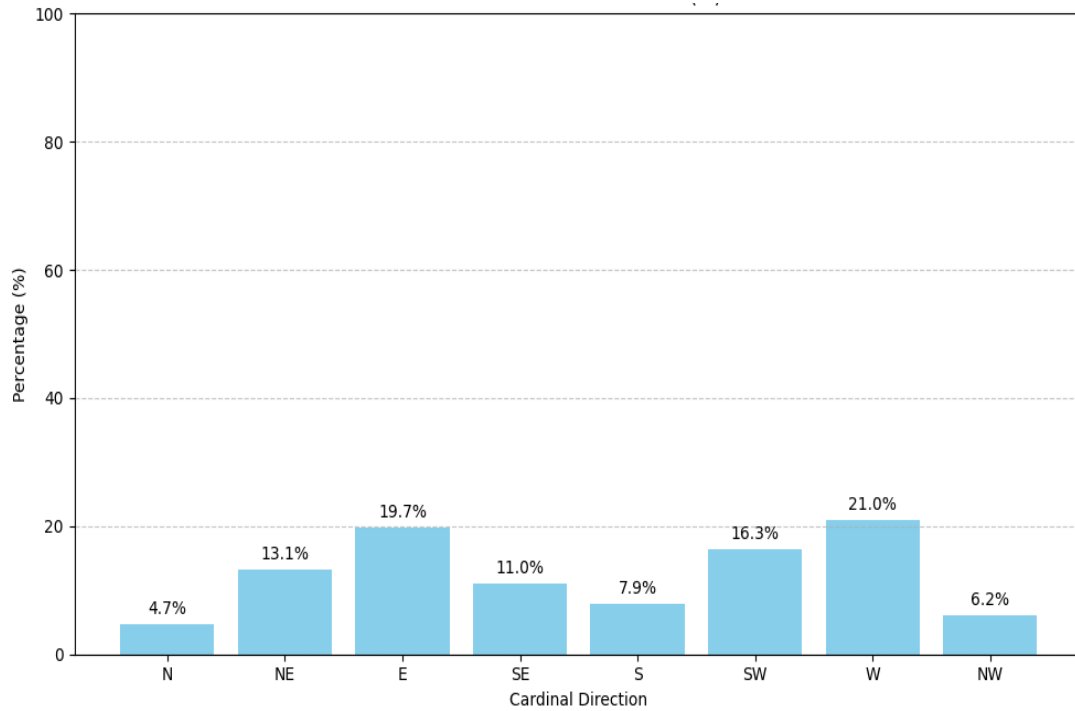


Figure 8: Répartition directionnelle du vent (%) selon les points cardinaux

Le graphique de la distribution des directions du vent montre une dominance marquée des vents provenant de l'Ouest (W) et de l'Est (E), représentant respectivement 21,0 % et 19,7 % des occurrences. Ces deux directions principales indiquent un régime de vent bimodal, Les vents provenant du Sud-Ouest (SW) et du Nord-Est (NE) sont également relativement fréquents, avec des pourcentages de 16,3 % et 13,1 %. En revanche, les vents issus du Nord (N) et du Nord-Ouest (NW) sont les moins fréquents (Figure 8).

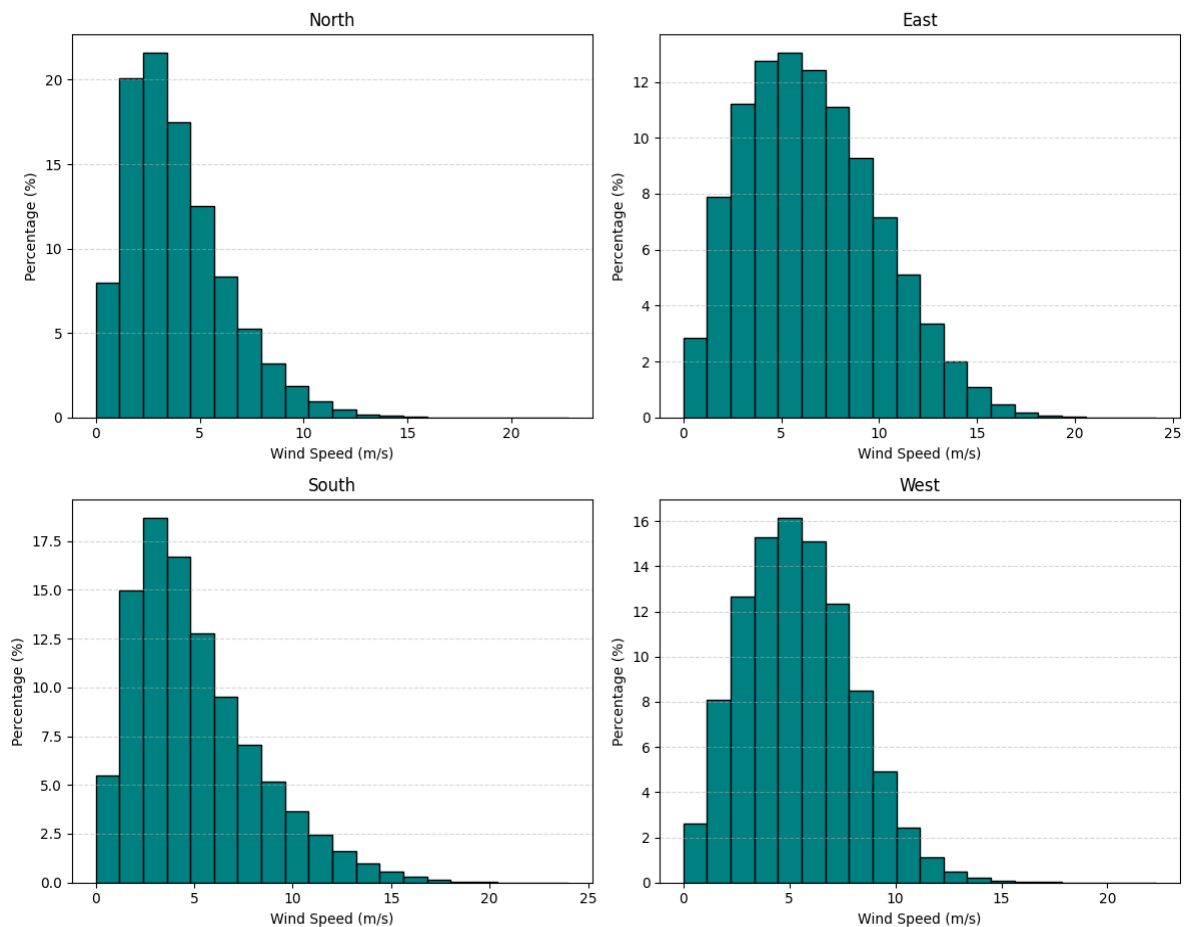


Figure 9: Distribution des vitesses de vent (%) selon les directions cardinales principales

Le graphique présente la distribution des vitesses de vent selon les principales directions cardinale (Nord, Est, Sud et Ouest), permettant une analyse fine des caractéristiques directionnelles du régime de vent. On remarque que les vents d'origine nordique ont des vitesses relativement faibles, majoritairement comprise entre 1 et 6 m/s, avec un pic marqué à environ 3 m/s, ce qui indique un flux plutôt calme. En revanche, les vents de l'Est présentent des vitesses plus soutenues entre (4 et 10 m/s) et les vitesses de vents de l'ouest comprise entre (2 et 8 m/s) et mieux réparties, ce qui confirme leur rôle dominant observé dans la distribution directionnelle global. Les vents du Sud montrent un profil similaire à celui du Nord avec des vitesses entre (1 à 6 m/s) un pic marqué à environ 5 m/s, (Figure 9).



Figure 10: Évolution des Vitesses Moyennes Mensuelles du Vent (1940-2024)

Le graphique présente l'évolution mensuelle de la vitesse moyenne du vent, sur la période de 1940 à 2024. On observe une variation saisonnière marquée les vitesses sont les plus élevées en hiver, notamment en janvier et décembre, atteignant environ 6,5 m/s. À partir du printemps, la vitesse du vent diminue progressivement pour atteindre son minimum durant l'été, en juillet et août, avec une valeur avoisinante 4,8 m/s. Ensuite, la vitesse augmente de nouveau en automne, particulièrement à partir d'octobre. Les vents sont plus forts en hiver en raison des contrastes thermiques importants et plus faibles en été, période caractérisée par une atmosphère plus stable (Figure 10).

CHAPITRE III Résultats Et Discussion

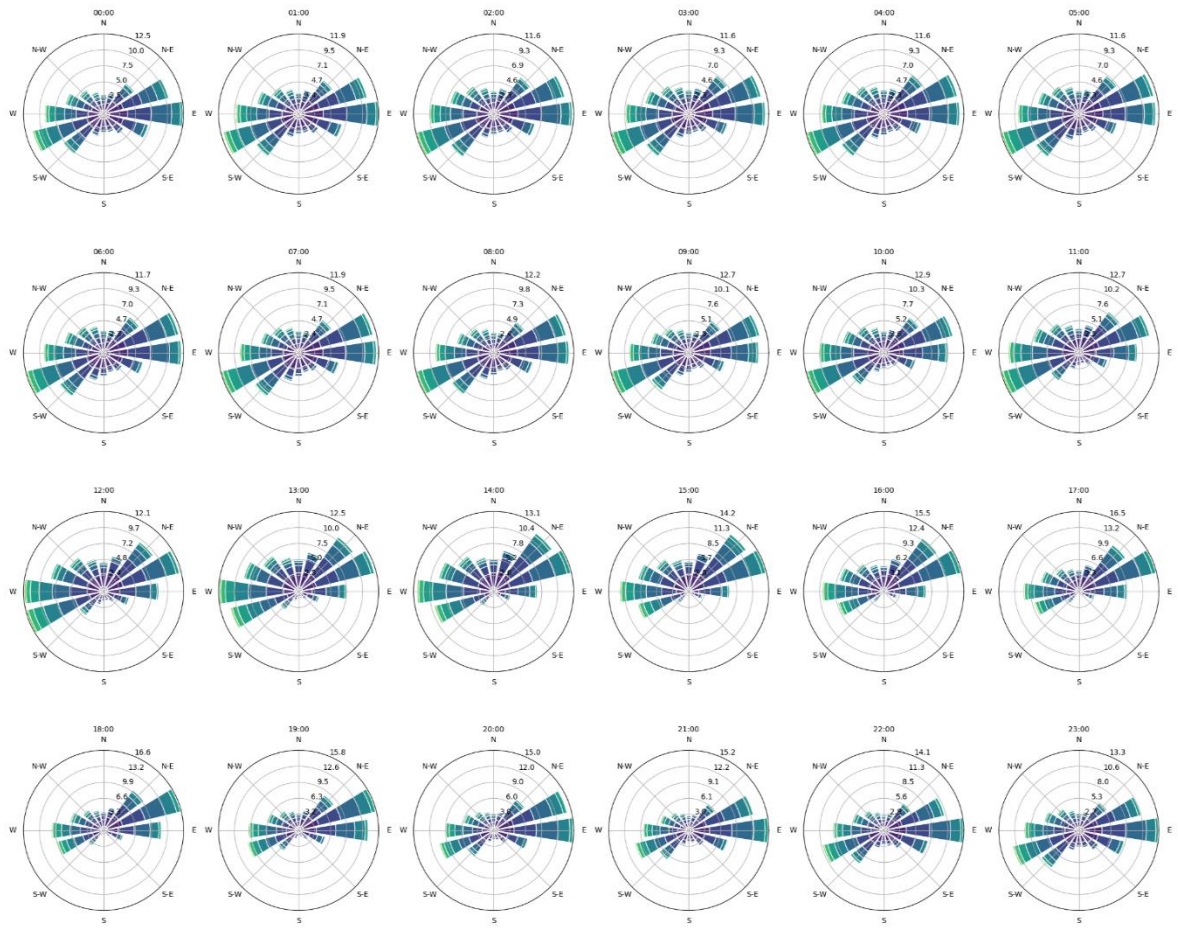


Figure 11: Variation Horaire de la Direction et de la Vitesse du Vent

La (figure 11) en forme de roses des vents horaires illustre la variation de la direction et de la vitesse du vent au cours 84ans. On observe une prédominance des vents venant de l'Est à Nord Est tout au long de la période de la journée, ce qui reflète un régime de vent dominant et stable dans cette direction. La vitesse du vent est relativement faible durant la nuit et les premières heures du matin, notamment entre 01 :00 am et 07 :00 am, puis elle augmente progressivement à partir de 08 :00 am pour atteindre un maximum entre 15 :00 pm et 18 :00 pm. En soirée, le vent perd progressivement de sa force avec la baisse des températures. Ces rose de vent met en évidence un cycle journalier bien marqué du vent.

III.2 Analyse Spatio-temporelle

III.2.1 Variation Saisonnière

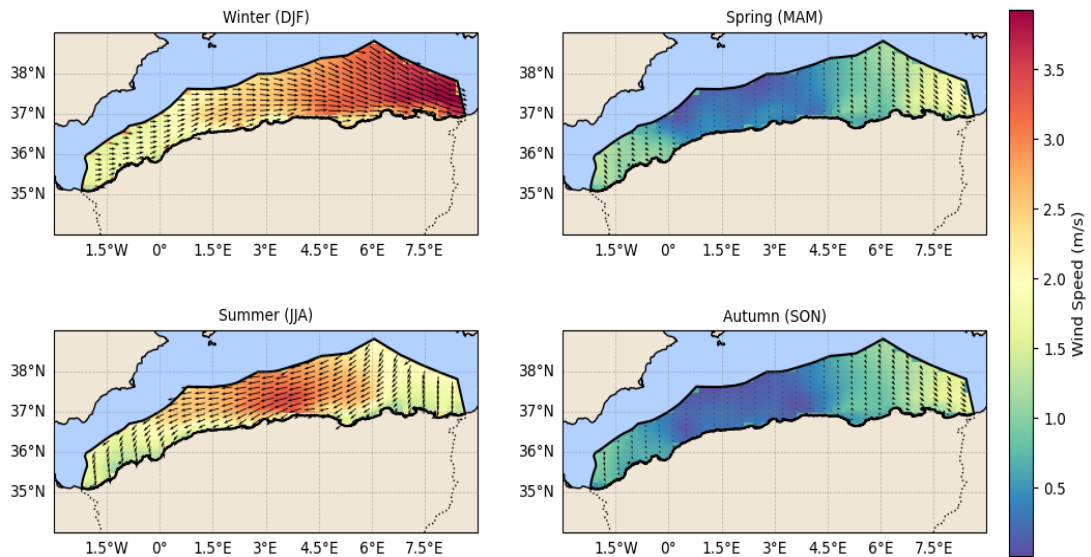


Figure 12: Variation Saisonnière de la Vitesse moyenne du Vent sur la Période 1940–2024

La carte illustre la vitesse moyenne saisonnière du vent dans le bassin algérien sur une période 1940-2024. Une variabilité spatio-temporelle marquée du régime vent y est clairement observable. En hiver (DJF), les vitesses de vent sont les plus élevées, dépassant les 3,5 m/s dans la partie entre (5°E à 9°E) du bassin, avec une direction dominante de sud-Ouest et Ouest (voir annexe A.2). En été (JJA), les vitesses élevées se concentrent au centre du bassin avec une vitesses entre 3 à 3,5 m/s, dans une zone comprise approximativement entre 1,5°E et 5°E, avec une direction dominante de Nord Est et Est (annexe A.2). Le printemps (MAM) et l'automne (SON) se caractérisent quant à eux par des vents globalement plus faibles, avec des vitesses quasi nulles au centre et légèrement plus importantes aux extrémités, oscillant entre 1,5 et 2 m/s.

III.2.1 Variation Mensuelle

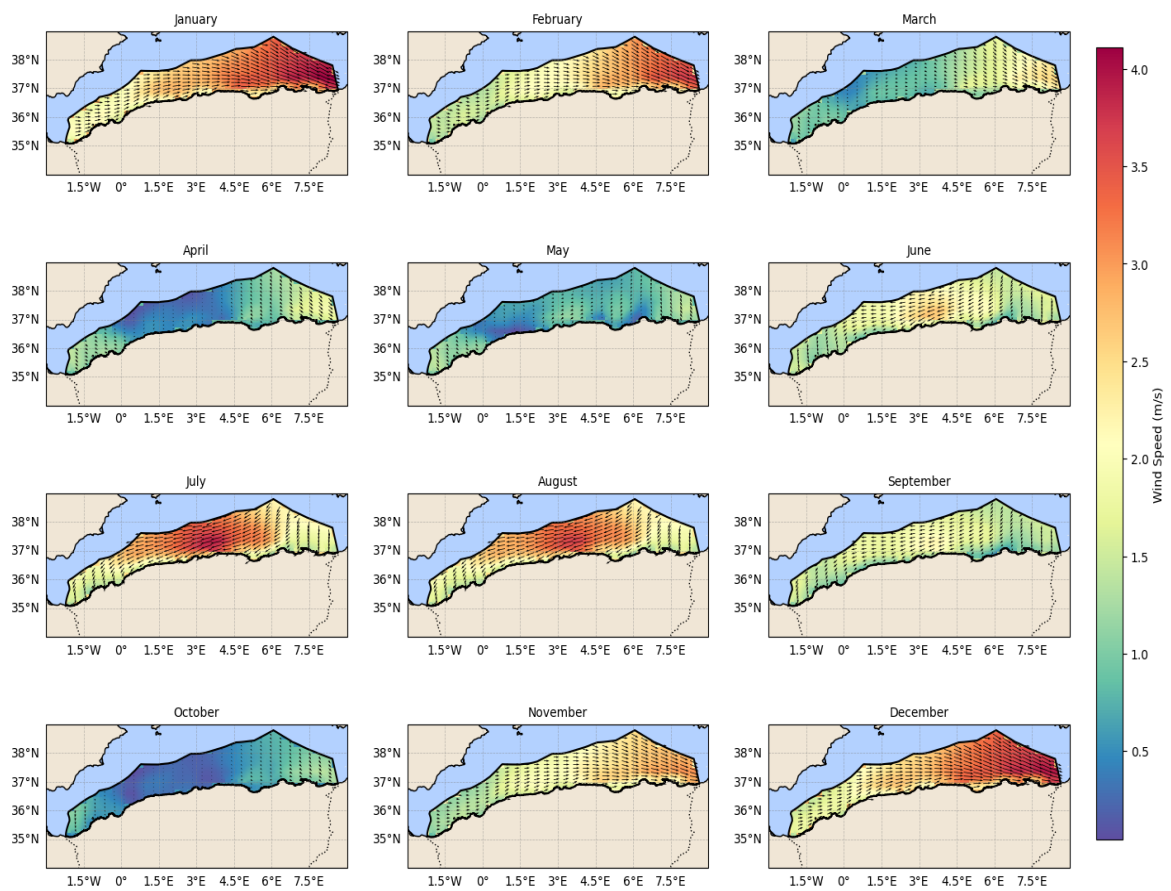


Figure 13: Distribution Mensuelle de la Vitesse moyenne du Vent

La figure au-dessus (figure 13) montre évolution spatiale et mensuelle de la vitesse moyenne du vent sur la zone d'étude de 1940 à 2024. On observe des vitesses particulièrement élevées en hiver, notamment en décembre, janvier, février. Ces mois affichent des vitesses supérieures à 3,5 m/s dans les régions situées entre 6° et 9°E (Figure 13). durant cette période les vents soufflent majoritairement du Sud-Ouest et d'Ouest (ANNEXE A.3), en été, plus précisément en juillet et août, ou les vitesses peuvent dépasser les 2,5 m/s dans la zone centrale (entre 0,5° et 4,5°E) avec une direction de de Nord-Est et d'Est (ANNEXE A.3), pendant les mois mars avril mai la vitesse est plus faible presque nulle au centre proche de 0,5 m/s, en automne septembre, octobre, novembre les vitesse restent faible ,mais nul en octobre, avec des valeur autour de (autour de 1 à 2 m/s) la direction nord-ouest a sud-est (ANNEXE A.3).

III.2.1 Variation annuelle

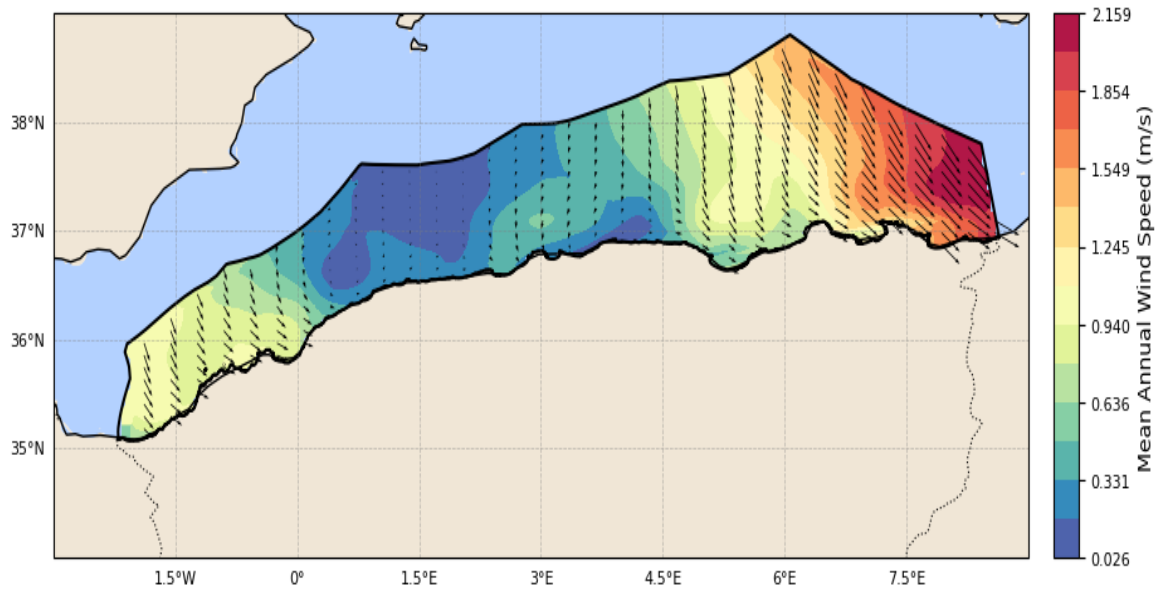


Figure 14: Distribution de la moyenne annuelle de la vitesse du vent (1940–2024)

La (Figure 14), présente l'évaluation de la vitesse moyenne annuelle du vent au niveau de la zone économique exclusive (ZEE) du bassin algérien, sur une période allant de 1940 à 2024. Une augmentation progressive de la vitesse du vent est observée en allant du centre vers l'ouest et surtout vers l'est, notamment entre 6,5°E et 9°E, où les vitesses moyennes atteignent environ 2,16 m/s, avec une direction dominante de nord-est et de Sud-Ouest (Annexe A.1). Au centre de la zone d'étude, entre 3°E et 5°E, les vitesses moyennes sont quasi nulles, avoisinant 0,03 m/s. Entre 1,5°W et 0°E, le régime de vent d'Ouest, avec une vitesse moyenne demeure relativement faible, oscillant entre 0,63 et 1,25 m/s, avec une orientation générale similaire, nord-est et de Sud-Ouest (Figure 14).

III.2.1 : la décomposition STL (Seasonal-Trend décomposition using Loess)

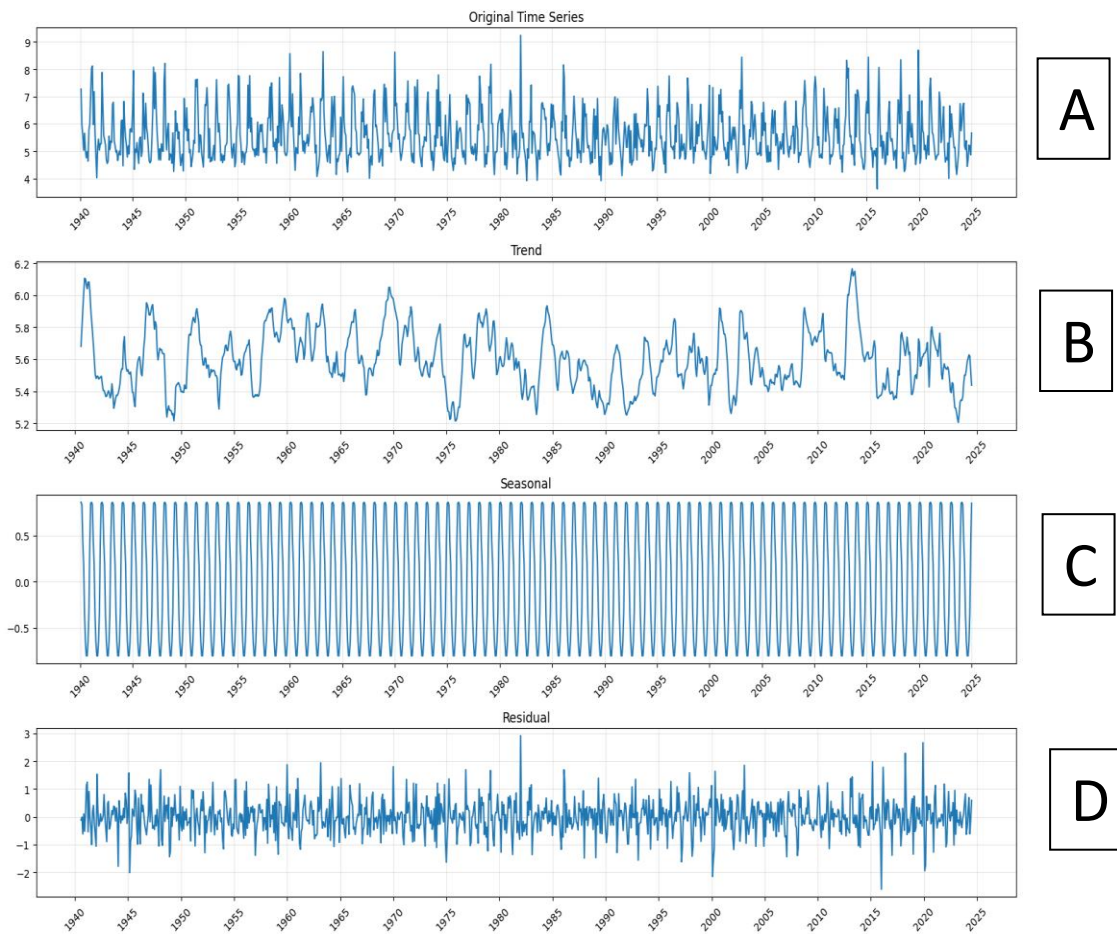


Figure 15: la décomposition STL (Seasonal-Trend décomposition using Loess)

de la vitesse du vent moyenne dans le bassin algérien

Les quatre graphes présentés correspondent à la décomposition STL (Seasonal-Trend décomposition using Loess) de la vitesse du vent moyenne dans le bassin algérien, et permettent d’analyser ses composantes principales. Le graphique **C** illustre la composante saisonnière, qui montre une périodicité régulière avec une forte variabilité intra-annuelle, indiquant des cycles saisonniers bien marqués du vent. Le graphique **A**, représentant la série originale (vitesse moyenne du vent), met en évidence la combinaison des variations saisonnières, tendanciennes et irrégulières, confirmant une dynamique complexe du régime du vent au fil des décennies. Le graphique **B** montre la composante de tendance, où l’on observe une fluctuation à long terme avec une légère baisse vers les années récentes, suggérant un affaiblissement progressif du vent moyen à l’échelle pluriannuelle. Enfin, le

graphique D représente les résidus, c'est-à-dire les variations non expliquées par les composantes saisonnières ou tendancielle (Figure 15).

III.2.2 Tests de tendance de Mann-Kendall

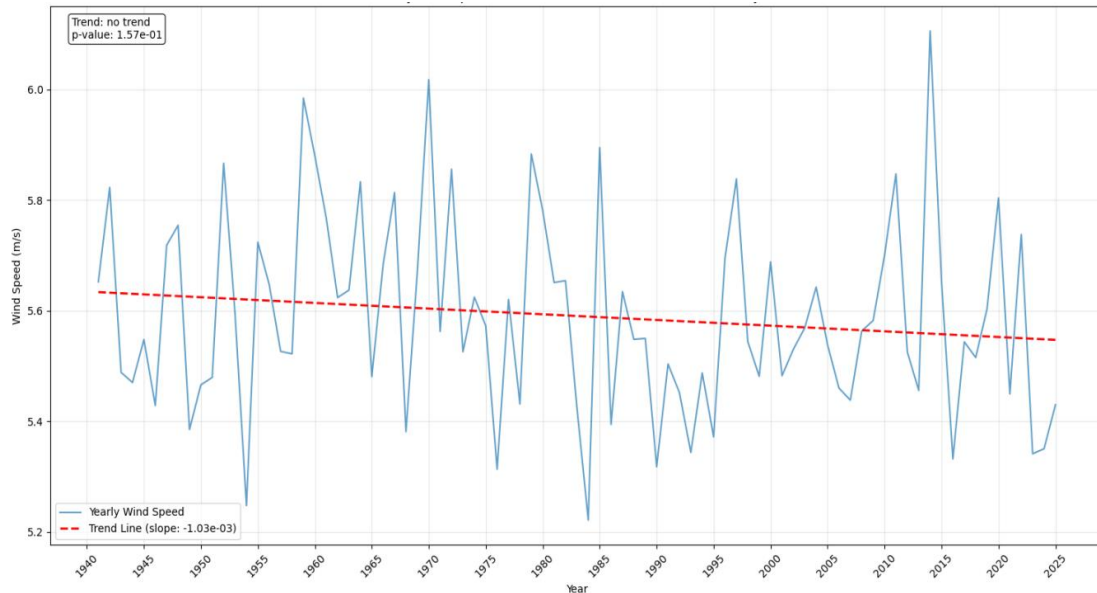


Figure 16: Évolution annuelle de la vitesse du vent (1940–2024) avec test de tendance de Mann-Kendall

La figure 16 représente l'évolution de la vitesse moyenne annuelle du vent entre 1940 et 2024, accompagnée d'une analyse de tendance utilisant le test non paramétrique de Mann-Kendall. Bien que la courbe montre une certaine variabilité interannuelle, le test statistique indique l'absence de tendance significative sur la période étudiée. En effet, la valeur p value est de 0.157, soit supérieure au seuil de signification usuel de 0.05, ce qui signifie qu'on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de tendance. Le paramètre Tau de Kendall est négatif (0.10), suggérant une légère tendance à la baisse, mais cette dernière n'est pas statistiquement significative. La pente de la ligne de tendance (estimée à -1.03×10^{-3} m/s par an) confirme une très faible décroissance moyenne, insuffisante pour conclure à une évolution marquée du régime de vent annuel (Figure 16).

En résumé, aucune tendance significative ne peut être détectée dans la vitesse moyenne annuelle du vent au cours des 84 dernières années dans le bassin considéré.

III.2.3 L'analyse en fonctions orthogonales empiriques (FOE)

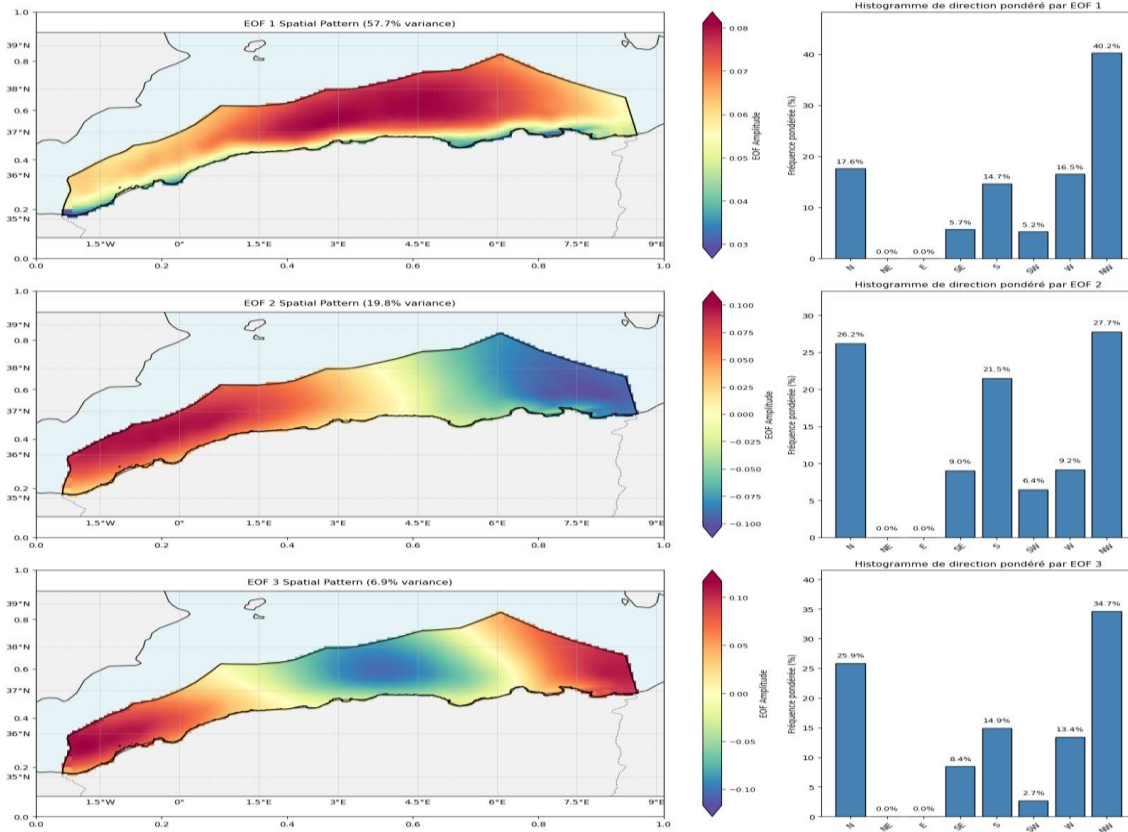


Figure 17: Fonctions orthogonales empiriques (FOE) appliquée à la vitesse du vent dans la zone économique exclusive

L'analyse en fonctions orthogonales empiriques (FOE) appliquée aux vitesses de vent dans la zone économique exclusive (ZEE) algérienne a permis d'identifier les principaux modes de variabilité spatiale. Le premier mode FOE (FOE 1), qui explique à lui seul 57,7 % de la variance totale, révèle un gradient Est-Ouest marqué, avec une intensité plus élevée dans la partie orientale du bassin. Ce mode dominant est associé à des vents provenant majoritairement du nord-ouest (40,7 %), ce qui indique que les régimes de vents du NW jouent un rôle prépondérant dans la dynamique éolienne régionale. Le deuxième mode (FOE 2), représentant 19,8 % de la variance, met en évidence une opposition entre le sud-ouest et le nord-est de la zone, Les directions de vent associées à ce mode sont plus diversifiées, dominées par les secteurs NW (27,7 %) et N (26,2 %) et S (21,5 %). Enfin, le troisième mode (FOE 3), qui représente 6,9 % de la variance, montre une structure centrée avec une intensité modérée, associée principalement aux vents de nord et de nord-ouest. L'ensemble de ces résultats souligne la dominance des régimes de vents nord-ouest et met en évidence des contrastes spatiaux importants le long du littoral algérien. (Figure 17).

III.2.4 Les anomalies

III.2.4.1 Anomalies saisonnières

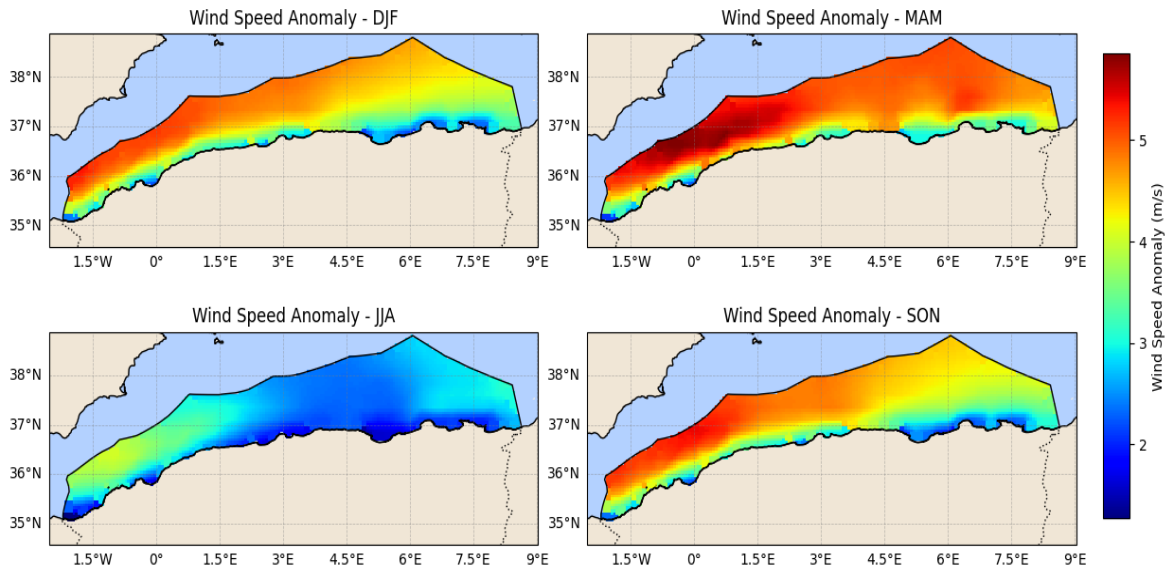


Figure 18 : Anomalies saisonnières de la vitesse du vent (1940–2024)

Ce graphique présente l’anomalie de la vitesse du vent (en m/s) sur la zone d’étude pendant la période de 1940-2024, on remarque en hiver DJF l’anomalie est positive dans le nord de l’Algérie, surtout dans la moitié ouest autour (entre 1,5°W et 1,5°E) Cela signifie que les vitesses de vent hivernales ont augmenté par rapport à la moyenne saisonnière, en printemps MAM Forte augmentation de la vitesse du vent sur presque toute la côte, particulièrement marquée à ouest entre (0,5°W et 1,5°E). Cette saison montre les plus fortes anomalies positives, pouvant dépasser +5 m/s, À l’inverse en été JJA, on observe une anomalie négative (bleu), indiquant une diminution des vents La diminution est la plus forte au centre-ouest de la côte (entre 2°E et 6°E), Et pour l’automne SON Les anomalies sont modérément positives sur l’ensemble de la zone, surtout vers l’ouest (entre 1,5°W et 1,5°E), Cela indique un renforcement des vents en automne, mais moins intense qu’au printemps (Figure 18).

III.2.4.2 Anomalies Mensuelles

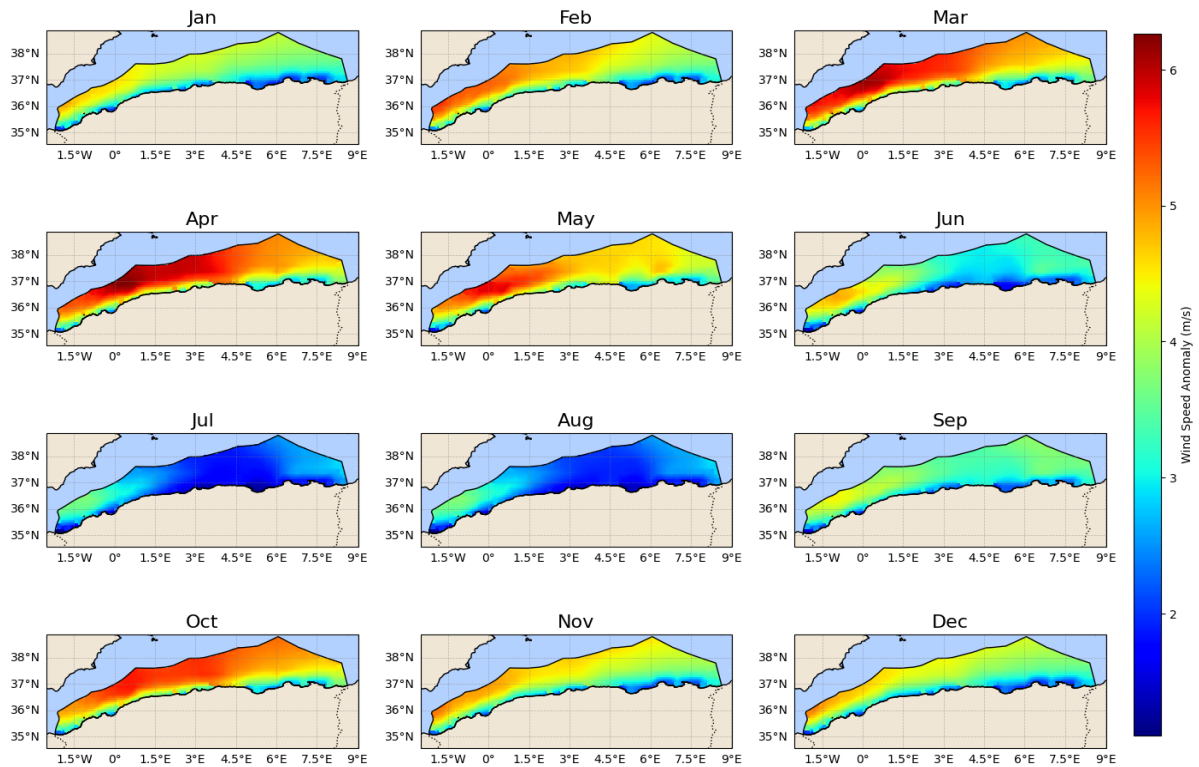


Figure 19: Anomalies Mensuelles de la vitesse du vent (1940–2024)

Les cartes au-dessus (figure 19) montrent les anomalies mensuelles de la vitesse du vent (m/s) dans le bassin algérien, durant la période d'étude (1940-2024), Janvier à Avril hiver Février, mars et avril montrent des anomalies positives très marquées (surtout mars avril), atteignant jusqu'à +6 m/s sur la partie ouest de la côte. Cela indique une force importante des vents pendant ces mois, Mai Encore des anomalies positives, mais un peu moins fortes qu'en avril, Toujours une zone à fortes vitesses du vents anormale sur la côte ouest, dans Juin les Anomalies négatives généralisées le vent est nettement plus faible que la normale, Juillet et août montrent les valeurs les plus basses, ce qui suggère un affaiblissement marqué des vents d'été, Septembre, Encore des anomalies négatives, mais plus modérées, Octobre et Novembre Retour des anomalies positives, Octobre est particulièrement marqué à l'ouest, en Décembre les Anomalies modérée à positive sur la majeure partie de la côte .

III.2.4.3 Anomalie annuelle

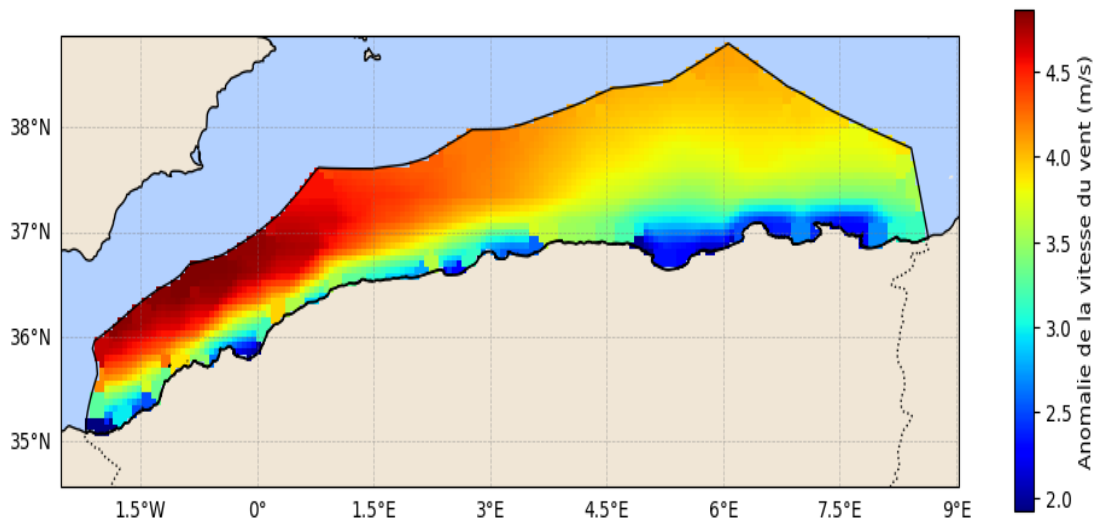


Figure 20: Anomalie annuelle de la vitesse moyenne du vent dans le bassin algérien (1940-2024)

La Figure 20 représente l’anomalie annuelle de la vitesse moyenne du vent le long du bassin algérien pendant la période 1940-2024. On observe une nette variation longitudinale de l’intensité du vent. Les vitesses les plus élevées (supérieures à 4,5 m/s) se concentrent dans la partie ouest du bassin, notamment entre 1,5°W et 1,5°E, où les vents sont significativement plus forts. À l’inverse, la partie Est, notamment au-delà de 6°E, présente des valeurs plus faibles, avoisinant les 2 à 3 m/s. Cette distribution suggère un gradient ouest-est bien marqué (figure 20).

III.3 Parc éolien offshore

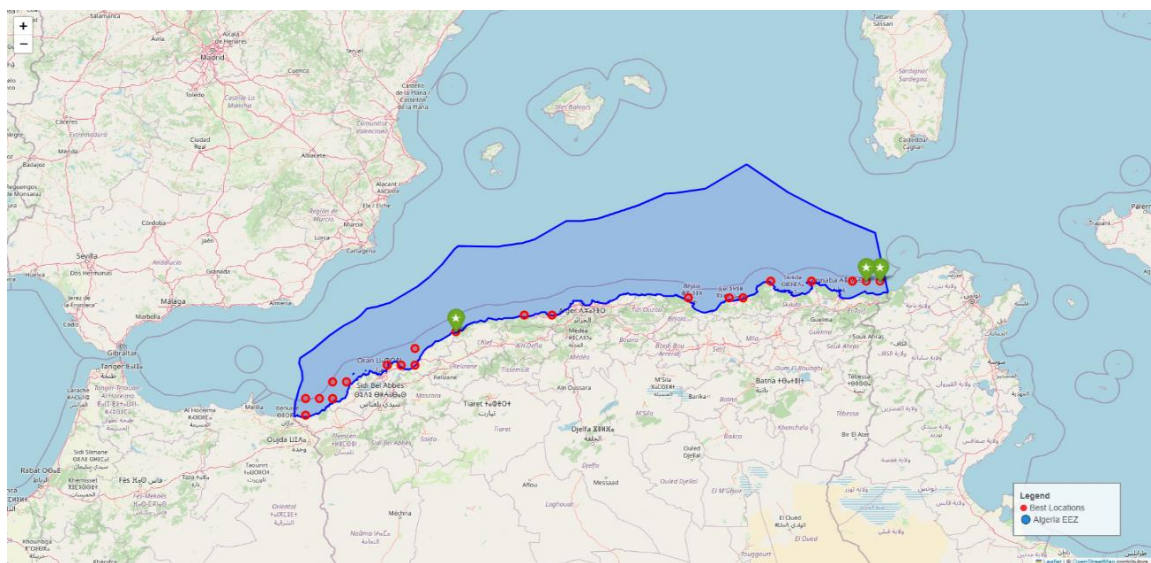


Figure 21: Localisation des sites favorables à l’énergie éolienne en mer dans la zone économique exclusive algérienne.

Les sites les plus prometteurs pour l'implantation d'éoliennes offshore ont été identifiés à l'aide d'un algorithme multicritère combinant plusieurs paramètres techniques et environnementaux. L'analyse a pris en compte la vitesse moyenne du vent à 10 mètres d'altitude, la distance au littoral, ainsi que la bathymétrie. Seuls les points présentant une vitesse de vent suffisante et relativement constante ont été retenus. Les sites situés trop près du rivage, dans des zones sensibles, ou trop éloignés (engendrant des coûts d'installation élevés) ont été écartés, tout comme ceux présentant une bathymétrie trop importante.

Un score d'aptitude a été attribué à chaque point en combinant ces critères, puis les emplacements ont été classés en fonction de ce score. Seuls les 10 % les mieux notés (correspondant au 90^e percentile) ont été sélectionnés comme sites techniquement favorables, soit 22 emplacements le long de la côte nord de l'Algérie (figure 21), représentés par des points rouges.

Après, trois sites optimaux, représentés par des étoiles vertes, ont été choisis parmi les meilleurs emplacements en raison de leur potentiel énergétique, et leur position géographique stratégique. Ces trois sites ont été retenus pour une analyse plus approfondie.

Tableau 3:Caractéristiques des trois meilleurs sites identifiés pour l'exploitation de l'énergie éolienne offshore en ZEE

Site	Coordonnées	Vent moyen (m/s)	Profondeur (m)	Distance à la côte (km)	Type de fondation
1	37.10°N, 8.50°E	6.63	- 141.25	21.12	Flottante
2	37.10°N, 8.25°E	6.48	- 149.00	16.98	Flottante
3	36.35°N, 0.75°E	4.25	-30.75	12.41	Fixe (posé)

Les coordonnées géographiques de ces 3 sites sélectionnés sont : (37.10°N, 8.50°E) ; (37.10°N, 8.25°E) ; (36.35°N, 0.75°E).

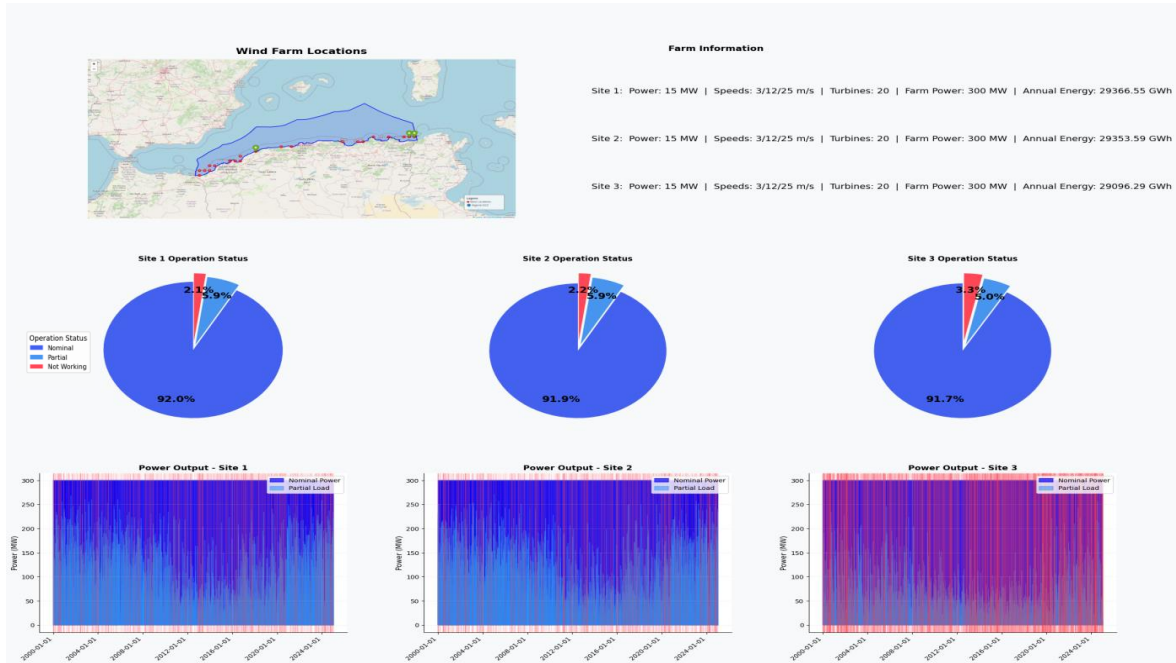


Figure 22: la Performance des Fermes Éoliennes Offshore

Comme illustré dans la figure 22, les trois fermes éoliennes étudiées sont situées le long de la côte nord de l'Algérie, réparties de manière stratégique afin d'exploiter au mieux le potentiel éolien de la région. Chaque site est conçu pour accueillir 20 turbines offshore, d'une puissance unitaire de 15 MW, soit une puissance installée totale de 300 MW par ferme.

Il est important de détailler plus explicitement les critères ayant conduit au choix de ces trois sites considérés comme les plus favorables. Ces critères comprennent notamment :

- Le potentiel énergétique des vents (vitesse moyenne annuelle et fréquence des vents favorables),
- La profondeur des eaux, qui conditionne la faisabilité technique des fondations,
- La distance par rapport à la côte et aux infrastructures électriques existantes,
- Ainsi que les contraintes environnementales et maritimes.

Ces choix doivent être confrontés aux résultats d'études similaires publiées sur la zone, en particulier celles qui concernent le site de « Ténès », qui présente un intérêt particulier en raison de sa combinaison de conditions de vent favorables, de faible profondeur et de proximité des infrastructures.

CHAPITRE III Résultats Et Discussion

Les vitesses de vent enregistrées sur ces sites varient entre 3 et 25 m/s, ce qui garantit des conditions de fonctionnement optimales et stables sur l'ensemble de la période d'observation. Ces vitesses de vent favorables permettent de maximiser la production énergétique tout en limitant les périodes d'arrêt ou de fonctionnement partiel.

Performance Opérationnelle

L'analyse des statistiques de fonctionnement des fermes (figure 22) met en évidence une excellente fiabilité technique. En effet, les résultats montrent que plus de 91 % du temps, les turbines opèrent à leur pleine puissance (mode nominal), avec seulement une faible part de fonctionnement en charge partielle (environ 5 %) et des arrêts très limités (moins de 3 % du temps).

Ces résultats confirment l'efficacité opérationnelle des installations et leur capacité à maintenir un haut niveau de disponibilité, même sur une période d'analyse étendue à 25 ans.

Production Énergétique

Les graphiques d'évolution de la puissance produite sur chaque site (figure 22) illustrent les fluctuations de production liées aux variations naturelles des conditions de vent. Malgré ces variations, la production globale reste stable et soutenue, ce qui témoigne du rendement élevé des fermes sur le long terme.

Les données d'énergie annuelle montrent une production d'environ 29 000 GWh par an pour chaque site, répartie comme suit :

Tableau 4: la production énergétique

Sites	Production énergétique (GWh/an)
Site 1	29 366,55
Site 2	29 353,59
Site 3	29 096,29

Ces chiffres soulignent la contribution significative de ces fermes au mix énergétique et à la production d'énergie renouvelable.

Tableau 5:Analyse Globale des Sites (Économie, Environnement, Société, Infrastructures)

Critère	Sites 1 et 2 (37.10°N, 8.50°E 8.25°E)	Site 3 (36.35°N, 0.75°E) – Prioritaire
Coûts d'installation	Élevés (technologie flottante coûteuse)	Faibles (solutions éprouvées et moins coûteuses)
Maintenance	Complexe et coûteuse (éloignement, accès difficile)	Simplifiée (proximité, accès rapide)
Impact biodiversité côtière	Faible (sites en mer éloignée)	Potentiel impact à surveiller (zones proches du littoral)
Impact sur la pêche / tourisme	Limité	Potentiellement plus marqué
Création d'emplois locaux	À moyen terme (technologies avancées à développer)	Immédiate (main-d'œuvre existante mobilisable)
Accès au port / logistique	Port limité à Annaba – infrastructures à construire	Accès direct au port de Ténès
Connexion au réseau électrique	Raccordements éloignés – extension nécessaire	Réseau proche déjà en place
Proximité de zones industrielles	Éloignée des centres de consommation	Proche (clients industriels immédiats possibles)
Stratégie recommandée	Phase 2 (expansion future / flotteurs)	Phase 1 (démarrage rapide, rentable et réaliste)

CHAPITRE III Résultats Et Discussion

L'analyse multicritère approfondie des trois sites identifiés pour l'implantation de parcs éoliens offshore met en évidence des différences significatives en termes de faisabilité technique, économique, logistique et environnementale. Les sites 1 et 2, localisés au nord-est du pays, présentent des vitesses de vent élevées, ainsi qu'une profondeur importante supérieure à 140 m, ce qui rend indispensable le recours à la technologie d'éoliennes flottantes. Or, cette technologie reste coûteuse, tant au niveau de l'installation que de la maintenance, notamment en raison de l'éloignement des côtes (entre 17 et 21 km) (Tableau 3), des conditions de mer potentiellement agitées, et de l'absence d'infrastructures portuaires adéquates dans la région. Leur éloignement par rapport aux centres de consommation et aux zones industrielles accroît aussi la complexité du raccordement au réseau électrique, impliquant des coûts supplémentaires et des délais d'aménagement importants. Cependant, leur position en mer profonde leur confère un avantage environnemental non négligeable, avec un impact limité sur les écosystèmes côtiers, la pêche artisanale ou encore les activités touristiques. Ces caractéristiques font des sites 1 et 2 des candidats potentiels pour une phase de développement à moyen ou long terme (Phase 2), après amélioration des capacités logistiques locales et stabilisation des coûts liés à la technologie flottante.

En revanche, le site 3, situé à proximité de Ténès, se distingue clairement comme le plus favorable pour un déploiement immédiat. Bien que la vitesse moyenne du vent y soit plus faible (4.25 m/s), la faible profondeur du site (30.75 m) permet l'usage de fondations fixes, une solution bien maîtrisée, plus économique et plus facile à installer. La distance réduite à la côte (12.41 km), l'accès direct au port existant de Ténès et la proximité immédiate du réseau électrique rendent ce site particulièrement attractif du point de vue logistique. En outre, la possibilité de mobiliser rapidement la main-d'œuvre locale pour les travaux d'installation et de maintenance favorise une création d'emplois directe et immédiate dans la région. Il convient néanmoins de souligner que la proximité du littoral implique une attention accrue aux impacts environnementaux potentiels, notamment sur la biodiversité côtière, la pêche et les activités touristiques. Néanmoins, les bénéfices économiques, l'intégration dans l'écosystème industriel local, la simplicité d'exploitation et le rendement énergétique globalement satisfaisant placent le site 3 comme une priorité stratégique pour une mise en œuvre rapide et rentable dans le cadre de la Phase 1 du développement de l'éolien offshore algérien. Ce phasage progressif entre le site 3 (immédiat) et les sites 1 et 2 (futur) permet d'optimiser les ressources tout en maximisant l'impact énergétique, économique et social du projet national.

IV. Discussion

Les résultats de notre étude mettent en lumière un régime de vent caractérisé par une vitesse moyenne de **5,59 m/s**, valeur qui s'inscrit dans la gamme des vitesses observées le long des côtes méditerranéennes. Ce résultat est proche des valeurs rapportées par (Meziane, 2023) et (Onea *et al.*, 2016), qui indiquent des vitesses variant de 2 à 4 m/s et de 3,8 à 8,2 m/s à 80 m de hauteur sur les côtes méditerranéennes, confirmant la cohérence de nos observations. Par ailleurs, (Kassem, Gökçekus and Çamur, 2018)(Kassem, Çamur and Aateg, 2020) ont documenté des vitesses moyennes mensuelles comprises entre 4,31 et 6,04 m/s le long des côtes libyennes, avec une moyenne annuelle de 4,35 m/s à 10 m de hauteur, ce qui corrobore nos résultats dans le contexte régional.

Les résultats obtenus dans notre étude mettent en évidence une variabilité saisonnière marquée de la vitesse moyenne du vent dans notre zone d'étude. En hiver (DJF), les vitesses de vent les plus élevées dépassant 3,5 m/s dans la partie centrale à l'Est du bassin, avec une direction dominante d'Ouest et le Sud-Ouest. D'après (Houta and Gadiyatov, 2023) les côtes d'Oran, Alger et Annaba sont dominées par des vents d'ouest et du nord-ouest, atteignant des vitesses modérées de 4 à 6 m/s et des fortes vitesses entre 6–8 m/s, le secteur est restant avec des vitesses similaires. En été (JJA), notre étude relève des vitesses moyennes entre 3 et 3.5 m/s au centre de la zone d'étude, avec des régimes du vent d'Est et nord Est. Ce régime est cohérent avec les observations de (Soukissian and Sotiriou, 2022) rapportent que, du mois de mai à septembre, durant la saison estival, les vitesses moyennes du vent chutent à environ 4,5 m/s sur l'ensemble du bassin Méditerranée, avec un creux marquant en août, ce qui confirme un régime estival relativement faible. En printemps (MAM) et l'automne (SON) présentent des vitesses plus faibles, avec des vents quasi-nuls au centre du bassin et légèrement plus marqués aux extrémités (1,5–2 m/s). Cette baisse généralisée durant les saisons de transition est typique des zones méditerranéennes, comme l'indiquent (Kassem, Gökçekus and Çamur, 2018) sur les côtes libyennes, où des conditions similaires ont été observées.

Les anomalies de la vitesse moyenne du vent dans le bassin algérien montrent que, dans l'ouest, le vent est particulièrement fort. On comparant ces résultats avec les résultats du travail de (Yildiz, 2023). Il a souligné que des vents relativement modérés et de courte durée caractérisent la région est de la méditerranée, avec des vents forts et extrêmes moins fréquents qu'en Méditerranée occidentale. Cette modération des vitesses rend ainsi compte des anomalies plus faibles observées dans cette zone.

L'analyse en composantes empiriques (EOF) appliquée à la vitesse du vent dans la zone économique exclusive algérienne met en évidence les principaux modes de variabilité spatiale du champ éolien. Le premier mode EOF, qui explique 57,7 % de la variance totale, représente le régime dominant caractérisé par une intensité maximale du vent dans le long du bassin en particulier la partie centrale du littoral algérien, associé à des régimes de vent Nord, Sud-Est et Sud. Le deuxième mode (19,8 % de variance) révèle un contraste Est-Ouest, suggérant une alternance d'intensité entre les deux régions du bassin. Enfin, le troisième mode (6,9 %) met en évidence des variations localisées et complexes, avec des centres d'activité à l'ouest et à l'est. Ces résultats rejoignent ceux de (Soukissian and Sotiriou, 2022), qui soulignent l'importance des structures de variabilité régionale sur le champ de vent méditerranéen, L'analyse de tendance de la vitesse moyenne annuelle du vent basé sur le test de Mann-Kendall, n'indique aucune tendance statistiquement significative. Une faible tendance à la baisse. La pente de régression, estimée à -1.03×10^{-3} m/s par an, confirme l'absence d'évolution marquée du régime de vent annuel sur le bassin algérien durant les 84 dernières années.

Ces résultats sont cohérents avec plusieurs études antérieures menées en Méditerranée occidentale. (Serri *et al.*, 2024) ont montrés que les tendances des vitesses moyennes annuelles du vent en Méditerranée sont faibles et rarement significatives, en particulier sur le long terme. De même, (Stadtman *et al.*, 2023), dans leurs études sur les régimes de vent en Algérie, concluent également l'absence de tendance significative sur plusieurs décennies, avec des variations interannuelles dominées par la variabilité naturelle du climat plutôt que par des évolutions systématiques. Par ailleurs, (Costoya *et al.*, 2021) soulignent que les changements observés dans le climat du vent en Méditerranée sont souvent liés à des phénomènes climatiques à échelle interannuelle ou décennale (comme l'oscillation nord-atlantique NAO), ce qui rend l'identification de tendances linéaires longues plus délicate.

Ainsi, nos résultats confirment ces observations : malgré la variabilité interannuelle, aucune évolution significative à long terme de la vitesse moyenne du vent ne se dégage pour le bassin algérien. Ces constats renforcent la robustesse des conclusions obtenues à partir des données analysées.

L'analyse des contraintes techniques et environnementales a permis d'identifier 22 emplacements potentiels pour l'implantation d'éoliennes offshore le long de des côtes algériennes. Parmi ces sites, trois zones prioritaires ont été sélectionnées pour une analyse détaillée, en tenant compte du potentiel énergétique, des profondeurs marines et de la distance à la côte. Les sites 1 et 2, situés au nord-est de la zone d'étude se caractérisent par (Meziane, 2023) des vitesses moyennes de vent élevées, des profondeurs importantes (141 ; 149) , ainsi qu'un éloignement modéré de la côte . Ces paramètres les rendent particulièrement adaptés au déploiement de parcs éoliens flottants, comme le confirment les recommandations de (Drożdż and Mróz-Malik, 2020) et (Serri *et al.*, 2024), qui indiquent que les solutions flottantes deviennent économiquement viables au-delà de 50-60 m de profondeur.

En comparaison, le site 3 présente des conditions différentes : avec une vitesse moyenne de vent plus faible (4.25 m/s), mais une faible profondeur (30.75 m) et une distance relativement proche de la côte (12.41 km), ce site est adapté à l'installation d'éoliennes à fondations fixes (jacket ou monopieu), conformément aux standards établis par (Myhr *et al.*, 2014) et (Soukissian *et al.*, 2017) pour les zones côtières méditerranéennes. La hiérarchisation des sites identifiés est cohérente avec plusieurs travaux récents sur le potentiel éolien offshore en Méditerranée.(Costoya *et al.*, 2021) ,en analysant les données ERA5 pour le bassin méditerranéen, soulignent que les côtes nord-africaines, notamment en Algérie et en Tunisie, présentent des gisements éoliens localisés, avec des zones favorables au large des côtes Est et Nord-Est algériennes, en lien avec les circulations synoptiques régionales. De même, (Homayoun *et al.*, 2022) ont montré que le recours aux technologies flottantes permet d'exploiter des sites profonds en Méditerranée, notamment dans les zones comprises entre 100 m et 200 m de profondeur, ce qui conforte l'intérêt des sites 1 et 2 identifiés dans cette étude.

Le potentiel éolien offshore dans certaines zones côtières algériennes, notamment à proximité de Ténès (site 3), se révèle intéressant. Bien que cette valeur soit inférieure à celles des sites plus profonds situés à l'Est, ce site présente plusieurs avantages stratégiques faible

CONCLUSION

Profondeur (~ 30 m) et distance à la côte réduite (~ 12 km) qui rendent techniquement et économiquement viable l'usage de fondations fixes. Cette approche est en cohérence avec les conclusions de (Dehmas *et al.*, 2011) qui ont démontré la pertinence de valoriser le potentiel éolien local à Ténès pour alimenter des infrastructures critiques comme les usines de dessalement, en exploitant des solutions techniquement robustes et économiquement viables à proximité du littoral. Ces résultats sont en cohérence avec les observations du qui identifie des vitesses moyennes similaires ($\approx 4\text{--}4,5$ m/s) sur le littoral algérien, notamment à El Kala, En effet, selon cette même étude, le recours aux fondations flottantes reste plus complexe et onéreux, ce qui renforce l'attractivité des sites comme celui de Ténès pour une phase de démonstration technico-économique réaliste. Le déploiement par phases recommandé (Jansen *et al.*, 2022) correspond aux meilleures pratiques internationales et constitue une approche de démonstration technico-économique réaliste.

Les impacts environnementaux méritent une exploration approfondie : les zones profondes semblent limiter les perturbations écosystémiques (Wilhelmsson, Malm and Öhman, 2006), mais effet des systèmes flottants reste mal documenté (Boehlert and Gill, 2010).

La variabilité spatiale et temporelle de la vitesse du vent observée dans la ZEE algérienne peut être attribuée à plusieurs agents climatiques et géographiques. Parmi eux, l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) joue un rôle majeur, en modulant l'intensité et la direction des vents d'ouest sur la Méditerranée, particulièrement en hiver (Hurrell *et al.*, 2003). En phase positive, la NAO favorise des vents plus forts et plus constants, ce qui pourrait expliquer les vitesses élevées observées à l'Est du bassin. De plus, la topographie côtière influence localement la direction et la canalisation du vent, créant des couloirs aérologiques favorables à la production éolienne (Archer and Jacobson, 2005) En été, la diminution des vitesses de vent est cohérente avec la dominance de conditions anticycloniques et la stabilité atmosphérique accrue, limitant la turbulence et les échanges verticaux (Mederreg *et al.*, 2021). Ces éléments montrent que les régimes de vent ne dépendent pas uniquement de leur intensité statistique, mais également de dynamiques atmosphériques complexes à différentes échelles.

CONCLUSION

CONCLUSION

L'apport principal de ce travail réside dans la richesse de la période analysée, rare dans les études climatiques nationales sur le vent. L'analyse statistique, temporelle et spatiale, combinée aux outils modernes comme Python et les méthodes de décomposition STL ou d'analyse en composantes empiriques (EOF), a permis d'approcher le phénomène dans toute sa complexité. Ce travail de fin d'études a été consacré à l'analyse spatio-temporelle des régimes de vent dans le bassin algérien, une région à fort potentiel éolien mais encore peu explorée d'un point de vue climatologique à long terme. En mobilisant les données de réanalyse ERA5 sur une période de 84 années (1940–2024), nous avons pu dresser un portrait détaillé de la dynamique éolienne régionale, en mettant en évidence ses tendances, ses saisonnalités, ses zones de concentration ainsi que ses implications énergétiques.

D'un point de vue scientifique, cette étude a permis de confirmer la présence d'une variabilité importante des vitesses et directions du vent selon les saisons et les zones géographiques. Les résultats montrent une dominance hivernale des vents dans la partie Est du bassin, avec des vitesses supérieures à 3,5 m/s, et une direction dominante du Nord-Ouest. En été, les régimes du vent changent, avec une moyenne qui varie entre 3 à 3,5 m/s dans la partie centrale et en direction Est et Nord-Est. Les mois de printemps et d'automne se caractérisent, quant à eux, par des conditions généralement plus calmes. Ces constats sont d'une grande valeur pour l'aménagement du territoire, la planification énergétique, et la sécurité maritime.

Ce travail contribue à combler une lacune importante dans la compréhension des régimes de vent sur la zone d'étude, et fournit une base solide pour les études futures dans le domaine de l'éolien offshore. Il a mis également en lumière le potentiel de développement durable de l'Algérie. Le croisement des données climatiques avec les critères techniques d'implantation (profondeur, distance à la côte, accessibilité) a permis d'identifier des zones prioritaires pour le déploiement de parcs éoliens offshore. Trois sites ont été sélectionnés, dont deux nécessitant des technologies flottantes, et un troisième, plus accessible et prometteur à court terme, apte à recevoir des éoliennes à fondation fixe. Cette approche prospective offre à l'Algérie un véritable levier pour diversifier son mix énergétique et s'engager plus résolument dans la transition énergétique.

Enfin, ce projet de fin d'étude représente bien plus qu'une simple recherche académique. Il est le fruit d'un engagement continu, d'une curiosité pour les enjeux climatiques et énergétiques de notre pays, et d'une volonté de participer, à travers la science, à la construction d'un avenir plus résilient. Il a été une occasion d'apprentissage technique intense, mais aussi de réflexion sur le rôle que chacun de nous peut jouer dans la valorisation intelligente de nos ressources naturelles.

Notre intérêt, que ce travail pourra constituer une base solide pour les futures recherches, encourager de nouvelles explorations scientifiques, et apporter, même modestement, sa pierre à l'édifice d'un développement énergétique à la fois durable, et socialement responsable vis-à-vis de l'environnement

Limité d'étude

Cette étude présente plusieurs limites qu'il convient de souligner. Notamment, la résolution spatiale des données restreint la précision des résultats, en particulier dans les zones côtières. La disponibilité et la qualité des données d'observation utilisées à des fins de validation limitent également la fiabilité des résultats

Par ailleurs, les limitations informatiques, notamment les capacités de traitement des outils utilisés (ordinateurs), influencent l'efficacité globale et la précision de l'analyse.

Des défis spécifiques apparaissent dans les zones côtières, où la variabilité de la vitesse et de la direction du vent est régie par d'autres paramètres.

Pour renforcer la robustesse des études futures, il est nécessaire d'intégrer des variables supplémentaires influençant la distribution du vent, telles que, la dynamique atmosphérique, la pression et la densité.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Abderrahim, A. *et al.* (2019) ‘Wind Energy Resource Assessment in South Western of Algeria’, *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 6(2), pp. 157–162. Available at: <https://doi.org/10.18280/mmep.060201>.

Alizé, B. (2023) ‘La gestion des risques dans les contrats internationaux d ’ énergies marines renouvelables : exemple de l ’ éolien en mer Alizé Bonfils To cite this version : HAL Id : tel-03923137’. Available at: <https://theses.hal.science/tel-03923137v1>.

Archer, C.L. and Jacobson, M.Z. (2005) ‘Evaluation of global wind power’, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D12), pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/10.1029/2004JD005462>.

Ari, N. and Ustazhanov, M. (2014) ‘Matplotlib in python’, in *11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*. IEEE, pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997585>.

Bigelow, S.W. and Quaife, B. (2025) ‘Wind climate analysis for prescribed fire planning: case study of Tallahassee, Florida’, *Fire Ecology*, 21(1), p. 12. Available at: <https://doi.org/10.1186/s42408-025-00349-4>.

Boehlert, G. and Gill, A. (2010) ‘Environmental and Ecological Effects of Ocean Renewable Energy Development – A Current Synthesis’, *Oceanography*, 23(2), pp. 68–81. Available at: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.46>.

Boudia, S.M. *et al.* (2013) ‘Temporal assessment of wind energy resource at four locations in Algerian Sahara’, *Energy Conversion and Management*, 76, pp. 654–664. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.086>.

Caputo, A.C. *et al.* (2025) ‘Offshore Wind Farm Economic Evaluation Under Uncertainty and Market Risk Mitigation’, *Energies*, 18(9), p. 2362. Available at: <https://doi.org/10.3390/en18092362>.

Cheng, K.-S., Ho, C.-Y. and Teng, J.-H. (2022) ‘Wind and Sea Breeze Characteristics for the Offshore Wind Farms in the Central Coastal Area of Taiwan’, *Energies*, 15(3), p. 992. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15030992>.

Cherif, H. *et al.* (2022) ‘Modelling and Control of a Small Domestic Wind Turbine’,

BIBLIOGRAPHIE

ASEAN Journal of Science and Engineering, 3(2), pp. 115–122. Available at:

<https://doi.org/10.17509/ajse.v3i1.44725>.

Chong Ng and Li Ran (2016) *Offshore Wind Farms, Offshore Wind Farms: Technologies, Design and Operation*. Elsevier. Available at: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-00763-0>.

Claus, S. *et al.* (2014) ‘Marine Regions: Towards a Global Standard for Georeferenced Marine Names and Boundaries’, *Marine Geodesy*, 37(2), pp. 99–125. Available at: <https://doi.org/10.1080/01490419.2014.902881>.

Costoya, X. *et al.* (2021) ‘Climate change impacts on the future offshore wind energy resource in China’, *Renewable Energy*, 175, pp. 731–747. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.001>.

Dahoum, A. (2020) *Effet De La Turbulence Sur Une Eolienne, U Msila*.

Dehmas, D.A. *et al.* (2011) ‘On the use of wind energy to power reverse osmosis desalination plant: A case study from Ténès (Algeria)’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), pp. 956–963. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.004>.

Diaf, S. *et al.* (2007) ‘Assessment of wind energy resource in southern Algeria’, *Journal of Renewable Energies*, 10(3), pp. 321–333. Available at: <https://doi.org/10.54966/jreen.v10i3.765>.

Drożdż, W. and Mróz-Malik, O. (2020) ‘Challenges for the Polish energy policy in the field of offshore wind energy development’, *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 23(1), pp. 5–18. Available at: <https://doi.org/10.33223/epj/119071>.

Esteban, M.D. *et al.* (2011) ‘Why offshore wind energy?’, *Renewable Energy*, 36(2), pp. 444–450. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.009>.

Glaum, P., Neumann, F. and Brown, T. (2023) ‘Offshore Wind Integration in the North Sea: The Benefits of an Offshore Grid and Floating Wind’, in *2023 19th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. IEEE, pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.1109/EEM58374.2023.10161875>.

Haddad, M. *et al.* (2020) *Analyse spatio- temporelle de l ’ évolution de la surface de la mer Méditerranée Spatio-temporal analysis of the evolution of the Mediterranean Sea surface*,

BIBLIOGRAPHIE

Rev. Sci. Technol., Synthèse.

Harris, C.R. *et al.* (2020) 'Array programming with NumPy', *Nature*, 585(7825), pp. 357–362.

Homayoun, E. *et al.* (2022) 'Power absorption of combined wind turbine and wave energy converter mounted on braceless floating platform', *Ocean Engineering*, 266, p. 113027. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113027>.

Houta, D. and Gadiyatov, V.G. (2023) 'Climatic Factors of the Algerian Coast', in *Springer Geology*. Springer, pp. 93–105. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16575-7_10.

Hoyer, S. and Hamman, J. (2017) 'xarray: N-D labeled Arrays and Datasets in Python', *Journal of Open Research Software*, 5(1), p. 10. Available at: <https://doi.org/10.5334/jors.148>.

Hurrell, J.W. *et al.* (2003) 'An overview of the North Atlantic Oscillation', in *Geophysical Monograph Series*. AGU AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, pp. 1–35. Available at: <https://doi.org/10.1029/134GM01>.

Jansen, M. *et al.* (2022) 'Policy choices and outcomes for offshore wind auctions globally', *Energy Policy*, 167, p. 113000. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113000>.

Jensen, D.D. *et al.* (2017) 'Coastal Wind and Turbulence Observations during the Morning and Evening Transitions over Tropical Terrain', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(12), pp. 3167–3185. Available at: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0077.1>.

Kassem, Y., Çamur, H. and Aateg, R.A.F. (2020) 'Exploring Solar and Wind Energy as a Power Generation Source for Solving the Electricity Crisis in Libya', *Energies*, 13(14), p. 3708. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13143708>.

Kassem, Y., Gökçekus, H. and Çamur, H. (2018) 'Economic assessment of renewable power generation based on wind speed and solar radiation in urban regions', *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(4), pp. 465–482. Available at: <https://doi.org/10.22034/gjesm.2018.04.007>.

BIBLIOGRAPHIE

Lionello, P., Conte, D. and Reale, M. (2019) 'The effect of cyclones crossing the Mediterranean region on sea level anomalies on the Mediterranean Sea coast', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(7), pp. 1541–1564. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1541-2019>.

M.Esteban (2011) 'Methodology for the design of offshore wind farms', *Journal of Coastal Research*, (SPEC. ISSUE 64), pp. 496–500.

McKenna, R. *et al.* (2021) 'Reviewing methods and assumptions for high-resolution large-scale onshore wind energy potential assessments', *arXiv preprint arXiv:2103.09781* [Preprint]. Available at: <http://arxiv.org/abs/2103.09781>.

Mederreg, D. *et al.* (2021) 'Assessment of the Resources of Wind Energy in Various Regions of Algeria', *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 16(4), pp. 641–650. Available at: <https://doi.org/10.18280/ijstdp.160404>.

Meziane, F. (2023) *Eoliennes Offshore & Hydrogène Vert en Algérie : Un Horizon Énergétique Durable !*

Miller, S.T.K. *et al.* (2003) 'Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts', *Reviews of geophysics*, 41(3). Available at: <https://doi.org/2003RG000124>.

Myhr, A. *et al.* (2014) 'Levelised cost of energy for offshore floating wind turbines in a life cycle perspective', *Renewable Energy*, 66, pp. 714–728. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.017>.

Onea, F. *et al.* (2016) 'Evaluation of the wind energy potential along the Mediterranean Sea coasts', *Energy Exploration & Exploitation*, 34(5), pp. 766–792. Available at: <https://doi.org/10.1177/0144598716659592>.

Orlić, M. *et al.* (2025) 'Wind-driven upwelling in the Adriatic Sea: Coastal vs. open-sea processes', *Progress in Oceanography*, 234, p. 103470. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2025.103470>.

Pan, Y. *et al.* (2019) 'High accuracy and miniature 2-D wind sensor for boundary layer meteorological observation', *Sensors (Switzerland)*, 19(5), p. 1194. Available at: <https://doi.org/10.3390/s19051194>.

BIBLIOGRAPHIE

- Perveen, R., Kishor, N. and Mohanty, S.R. (2014) 'Off-shore wind farm development: Present status and challenges', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, pp. 780–792. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.108>.
- Pryor, S.C. and Barthelmie, R.J. (2010) 'Climate change impacts on wind energy: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), pp. 430–437. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.028>.
- Ragone, F. *et al.* (2019) 'Ocean Surface Anomalies after Strong Winds in the Western Mediterranean Sea', *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), p. 182. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse7060182>.
- Rolon-Mérette, D. *et al.* (2016) 'Introduction to Anaconda and Python: Installation and setup', *Quant. Methods Psychol*, 16(5), pp. S3–S11.
- Sassi, S. and Bourouba, S. (2022) 'La zone économique exclusive algérienne: entre enjeux énergétiques et environnementaux et risque de différends maritimes', *مجلة الدراسات الحقوقية*, 9(1), pp. 869–897. Available at: <https://asjp.cerist.dz/en/article/191346>.
- Serri, L. *et al.* (2024) 'Technical and economic challenges for floating offshore wind deployment in Italy and in the Mediterranean Sea', *WIREs Energy and Environment*, 13(4), p. e533. Available at: <https://doi.org/10.1002/wene.533>.
- Soukissian, T. *et al.* (2017) 'Marine Renewable Energy in the Mediterranean Sea: Status and Perspectives', *Energies*, 10(10), p. 1512. Available at: <https://doi.org/10.3390/en10101512>.
- Soukissian, T. and Sotiriou, M.-A. (2022) 'Long-Term Variability of Wind Speed and Direction in the Mediterranean Basin', *Wind*, 2(3), pp. 513–534. Available at: <https://doi.org/10.3390/wind2030028>.
- Stadtmann, F. *et al.* (2023) 'Digital Twins in Wind Energy: Emerging Technologies and Industry-Informed Future Directions', *IEEE Access*, 11, pp. 110762–110795. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3321320>.
- Trenberth, K.E. and Shea, D.J. (2005) 'Relationships between precipitation and surface temperature', *Geophysical Research Letters*, 32(14), pp. 1–4. Available at:

BIBLIOGRAPHIE

<https://doi.org/10.1029/2005GL022760>.

Tumse, S. *et al.* (2024) ‘Comparative Analysis of Global Onshore and Offshore Wind Energy Characteristics and Potentials’, *Sustainability*, 16(15), p. 6614. Available at: <https://doi.org/10.3390/su16156614>.

Ucar, A. and Balo, F. (2010) ‘Assessment of wind power potential for turbine installation in coastal areas of Turkey’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), pp. 1901–1912. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.021>.

Wilhelmsson, D., Malm, T. and Öhman, M.C. (2006) ‘The influence of offshore windpower on demersal fish’, *ICES Journal of Marine Science*, 63(5), pp. 775–784. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2006.02.001>.

Wilks, D.S. (2019) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Fourth Edition*. Elsevier. Available at: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03921-6>.

Yildiz, S.S. (2023) ‘Determining Wind Energy Potential Using Geographic Information System Functions: A Case Study in Balıkesir, Turkey’, *Applied Sciences*, 13(16), p. 9183. Available at: <https://doi.org/10.3390/app13169183>.

Yves Desnoës, S. (2003) *Météorologie maritime*. Edited by M. France. SHOM.

Zergane, S., Smaili, A. and Masson, C. (2018) ‘Optimization of wind turbine placement in a wind farm using a new pseudo-random number generation method’, *Renewable Energy*, 125, pp. 166–171. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.082>.

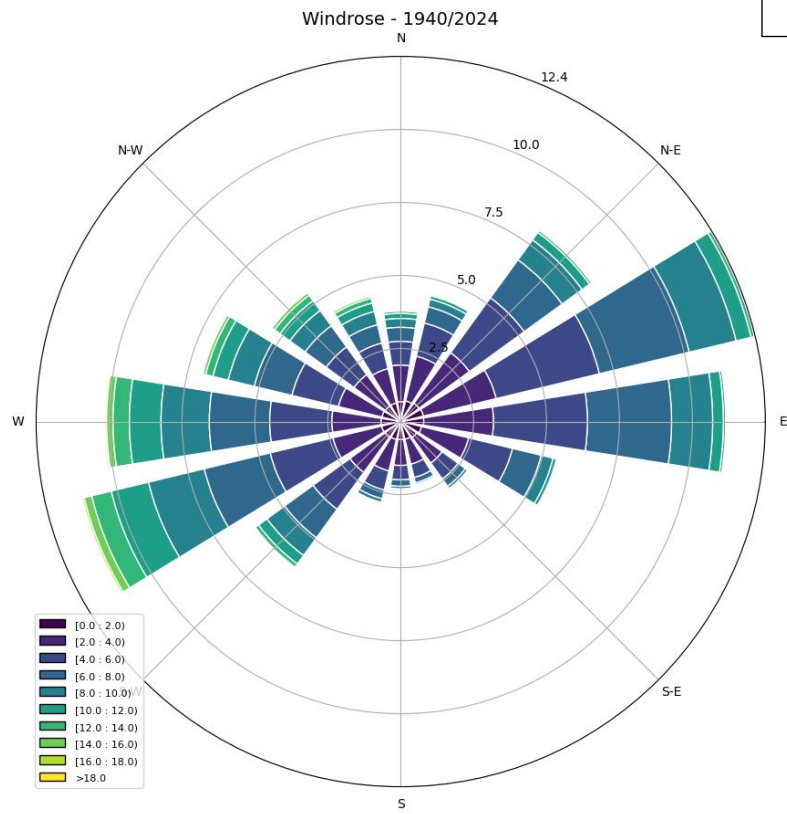
Zhang, Lidong *et al.* (2018) ‘An Investigation of Wind Direction and Speed in a Featured Wind Farm Using Joint Probability Distribution Methods’, *Sustainability*, 10(12), p. 4338. Available at: <https://doi.org/10.3390/su10124338>.

Zhao, L. *et al.* (2024) ‘Research on the characteristics of wind speed, wind direction, and wind profile based on ERA5 reanalysis data’, *Aerospace Traffic and Safety*, 1(2–4), pp. 131–140. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aets.2024.12.007>.

BIBLIOGRAPHIE

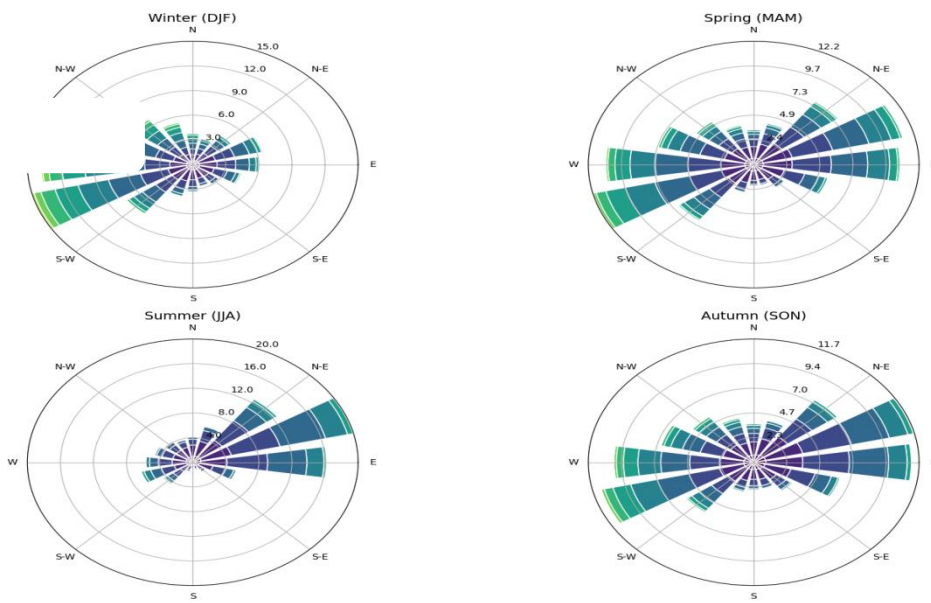
ANNEXES

A.1

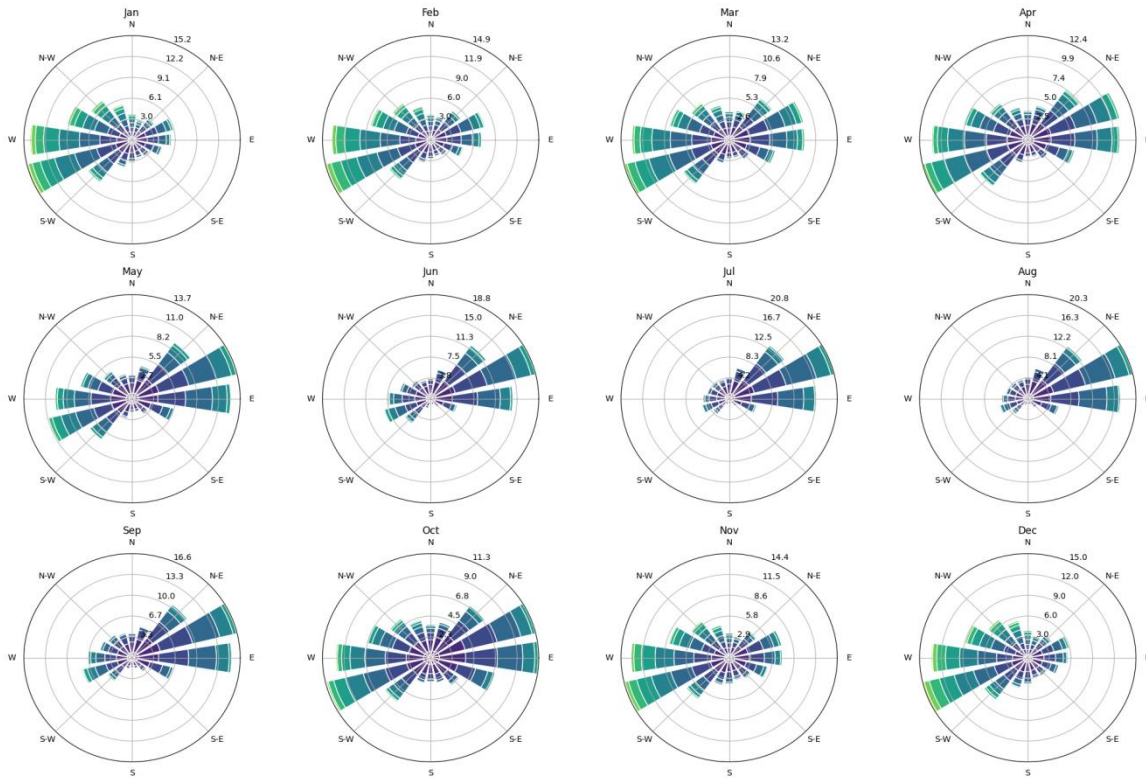


Seasonal Wind Rose (1940-2024)

A.2



Monthly Wind Rose (1940-2024)



A.3

