

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 لعلوم البحر وتهيئة الساحل

École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme

D'Ingénieur en Sciences de la Mer

Option : Génie Côtiers et l'Aménagement du Littoral

Thème :

**Production de l'hydrogène vert à partir des énergies renouvelables
offshores en Algérie : identification du potentiel énergétique et exploitation**

Présenté par :

BELMAMOUN Alâa

BRIKI Sahar

Soutenu le **01/07/2026**, devant le jury composé de :

Mme.Fezza Nassima	Professeur	ENSSMAL	Présidente
M. Mezouar Khoudir	Professeur	ENSSMAL	Promoteur
M. Khamallah Youcef	Doctorant	ENSSMAL	Co-Promoteur
Mme. Salem Cherif Youssra	MCA	ENSSMAL	Examinatrice

Année universitaire : 2025- 2026

Remerciement

Nous remercions en premier lieu le Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la volonté et la foi nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à **Monsieur MEZOUAR** pour sa bienveillance, son encadrement attentif et le soutien constant qu'il nous a apporté tout au long de ce projet.

Nous adressons également nos sincères remerciements à **Monsieur KHAMALLAH** pour sa disponibilité, ses conseils avisés et sa précieuse contribution à l'élaboration de ce mémoire.

Notre reconnaissance s'adresse tout particulièrement aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. Nous tenons à exprimer notre grand respect à **Madame FEZAA**, Présidente du jury, ainsi qu'à Madame **SALEM CHERIF**, Examinatrice, pour le temps, l'attention et l'intérêt qu'elles ont accordés à l'examen de notre recherche.

Nos vifs remerciements aussi à **Madame MAOUEL** et l'ensemble des formateurs et des coachs pour Leur encadrement à travers l'incubateur **BlueStart**.

Dédicace

To Whom My Heart Belongs

I dedicate this work first and foremost to God Almighty, who has been my constant companion and guide, granting me the strength and patience to see this journey through to its end.

To my parents, who shaped the woman I am today: to my beloved father, for being the anchor of my hope and the voice that never let me give up; and to my mother, my heart's sanctuary, whose presence heals me before I even speak. My love for you both is infinite.

To my siblings: to Khawla, my sister and lifelong confidante, who has walked every path with me through the laughter and the tears and who believed in me when I couldn't believe in myself. To my big brother, for his strength and support; and to my little sisters, my rays of light, whose sweetness has brightened my darkest days.

To Alaa, my dearest friend. We have shared every step of this climb the heavy doubts, the tireless efforts, the shared laughter, and the final victories. You were the mirror to my perseverance and the strength I leaned on when the road felt long. More than a partner in work, you are a companion of the heart, and I am deeply grateful for the beautiful bond we have forged through it all.

To my dear friends, who are the vibrant threads woven into the tapestry of my life: to Ahlam, the gorgeous and the funny one, whose radiant spirit and infectious humor always light up the room; to Amel, with her beautiful, generous, and tender heart, a true embodiment of kindness; to Wissal, the playful, attentive listener and unwavering cheerleader, whose encouragement always lifts me higher. With all of you, I have shared a treasure trove of memories laughter, happiness, adventures, and of course, the sadness we navigated together. I truly love you all.

And finally, to myself. For the fire, the resilience, and the quiet strength I brought to this labor. For standing firm and never folding, honoring the philosophy that carries me through life:

Vivi, Ama, Ridi.
(Live, Love, Laugh.)

Dédicace

C'est avec une profonde gratitude que je dédie ce travail de fin d'études :

À la mémoire de mon cher papa, absent de corps mais éternellement présent dans mon cœur. De là où tu es, j'espère que ce travail te rend fier de moi.

À ma maman chérie, la prunelle de mes yeux. Les mots me manquent pour te remercier d'avoir porté le rôle de deux parents à la fois, guidant nos pas avec tendresse pour illuminer notre avenir.

À mes deux princesses, Meissa et Doha, précieux cadeaux de mes parents. Merci pour votre amour.

À mon petit frère unique, pour sa présence et son soutien précieux malgré son jeune âge.

À ma seconde famille, mes chers tonton Mourad et tata Saliha, pour leur bienveillance constante et leur soutien indéfectible. Je vous aime de tout mon cœur.

À mes sœurs de cœur, Raymouch et Roffaida, ainsi qu'aux petits poussins qui illuminent mes week-ends de bonheur.

À Razzik, pour son soutien inestimable et sa présence.

À ma grand-mère, mes oncles, tantes et cousins, qui forment ma plus grande fierté.

À ma chère Sahar, mon binôme et bien plus encore : ma sœur. Merci de m'avoir accompagnée tout au long de cette aventure académique. Dans les moments de doute comme dans les moments de joie, tu as été mon pilier. Ce projet n'est pas seulement le fruit de notre travail, il est le symbole de notre complicité et de notre résilience. Je te souhaite tout le bonheur du monde.

À mes amies, Ahlem et Maroua, pour leur douce complicité.

À ma personne préférée, simplement merci d'embellir ma vie au quotidien.

À moi-même, Merci d'avoir tenu bon dans les moments de tempête, d'avoir cru en tes rêves et de n'avoir jamais abandonné. Tu as honoré chaque promesse.

Au-delà des mots, vous êtes ma plus grande réussite.

Table des matières

Liste des figures	i
Liste des tableaux.....	iii
Liste des abréviations.....	iv
Introduction générale	1
1. Énergies renouvelables	4
1.1. Énergie éolienne offshore.....	4
1.1.1. Fondations des éoliennes offshore	5
2.1.1. Avantages et limites des technologies offshore	6
1.2. Énergie houlomotrice	7
1.2.1. Grandes familles technologiques	7
1.2.2. Avantages et limites des technologies d'énergie houlomotrice offshore.....	10
1.3. Potentiel de l'énergie éolienne offshore mondiale et méditerranéenne	10
1.4. Potentiel de l'énergie houlomotrice offshore mondiale et méditerranéenne	11
1.5. Potentiel de l'énergie offshore en Algérie.....	11
2. Dessalement de l'eau de mer : un levier stratégique pour l'Algérie.....	12
2.1. Consommation énergétique du dessalement	12
2.2. Possibilités de couplage avec les énergies offshore	13
3. Production d'hydrogène vert.....	14
3.1. Méthodes de production d'hydrogène vert	14
3.1.1. Électrolyse.....	14
3.1.2. Scission thermochimique de l'eau	15
3.2. Stockage et transport de l'hydrogène vert : technologies, logistique et contraintes	16
3.2.2. Méthodes de stockage de l'hydrogène	16

3.2.3. Options de transport et articulation transport-stockage	17
4. Couplage éolien offshore – houlomoteur – dessalement – électrolyse : relations, efficacité, intérêts.....	18
4.1. Pourquoi un couplage : offshore renouvelables → eau dessalée → H ₂	18
4.2. Synergie “éolien offshore + vagues”	19
5. Enjeux économiques et environnementaux	19
5.1. Économie : CAPEX, facteur d’utilisation, corridors d’export	19
5.2. Environnement : saumures, biodiversité, occupation de l’espace.....	20
6. Cadre réglementaire proposé	20
6.1. Stratégie algérienne concernant les énergies renouvelables et l'hydrogène vert.....	20
6.2. Cadre Législatif.....	20
6.3. Le MACF : une contrainte qui devient opportunité stratégique pour l'Algérie	22
6.4. Normes Techniques Applicables :	22
6.5. Critères de Localisation des Zones Offshore :	23
6.6. Evaluation Environnementale Strategique (EES)	23
6.7. Impacts Identifiés et Mesures d'Atténuation	24
1. Zone d’étude	25
2. Méthodologie	27
2.1. Collecte des données	29
2.2. Traitement des données	29
2.3. Analyse des données	30
2.3.1. Analyse du Vent	30
2.3.2. Analyse des Vagues.....	37
2.3.3. Mesures de variabilité	40
2.3.4. Potentiel énergétique des vagues	42

Introduction.....	43
1. Sélection des dispositifs énergétiques pour l'analyse des performances.....	43
1.1. Sélection de l'éolienne :.....	43
1.2. Sélection de convertisseur :.....	47
Conclusion	51
Introduction.....	52
1. Identification des sites pilotes optimaux pour le projet hybride éolien-houlomoteur	52
1.1 Performance énergétique.....	52
1.2 Bathymetrie	52
1.3 Simulation hydrodynamique	55
1.4 Contraintes environnementales et réglementaires.....	63
2. Estimation des émissions de Gaz à effet de serre évitées	63
Conclusion	64
Introduction Ce dernier chapitre scelle la convergence de nos travaux en assemblant les différentes composantes technologiques dans une architecture système complète et optimisée. En opérant la synergie entre l'éolien offshore (150 MW) et l'énergie houlomotrice (9 MW), nous consolidons une puissance hybride de 159 MW dédiée à la production massive d'hydrogène vert. Cette configuration illustre concrètement la capacité des ressources marines à porter une infrastructure énergétique de grande envergure.....	
1. Production d'hydrogène vert	64
2. Dessalement de l'eau de mer	65
3. Électrolyse.....	68
4. Analyse technico-économique du système hybride offshore.....	68
4.1. Bloc électrique : puissances, CAPEX, OPEX et LCOE	68
4.2. Bloc hydrogène : électrolyseur PEM, dégradation, overhaul et production nette.....	69
Conclusion	71

Conclusion générale.....	70
Références.....	72
Introduction.....	1
I. Présentation du Projet	1
I.1. Idée du projet (solution proposée).....	1
I.2 Les valeurs suggérées	2
I.3 L'équipe (Les Étudiants).....	2
I.4 Les activités clés.....	3
I.5 Planning de réalisation du projet (PFE).....	5
II. Nature des innovations.....	6
III. Analyse stratégique du marché	6
III.1 Le segment du marché	6
III.2 Mesure de l'intensité de la concurrence.....	8
III.3 La Stratégie Marketing	9
IV. Plan de production et d'organisation	14
IV.1 Le processus de production (Ingénierie et Livrables)	14
IV.1.1 Acquisition et centralisation des données de référence.....	14
IV.1.2 Traitement numérique et analyse statistique (Le Cœur du Procédé).....	14
IV.1.3 Modélisation hydrodynamique et études maritimes standards	15
IV.1.4 Ingénierie de procédés et couplage du Nexus Énergie-Eau-Hydrogène	15
IV.1.5 Conditionnement, emballage et livraison des livrables.....	16
IV.2 L'approvisionnement.....	16
IV.2.1 Politique d'achat.....	16
IV.2.2 Les fournisseurs	17
IV.2.3 Politique de paiement et délai de réception.....	17

IV.3 Main d'œuvre	18
IV.4 Les principaux partenaires	18
V. Plan financier	20
VI. Faisabilité Technique et Modèle Pilote (Avant-Projet).....	22
VI.1 Objectif du Modèle Pilote.....	23
VI.2 Préparation et Structure de la Méthodologie	23
VI.3 Limites du Projet et Perspectives du Futur Bureau d'Études.....	23
VII. Canva Bmc	25

Liste des figures

Figure 1. Types d'énergies renouvelables	4
Figure 2. Les fondations des éoliennes offshore.....	5
Figure 3. Schéma de la colonne d'eau oscillante.....	8
Figure 4. Schéma de convertisseurs à corps oscillant.....	9
Figure 5. Schéma de dispositifs à surverse.....	9
Figure 6. Délimitation de la zone d'étude et répartition des sites étudiés.....	26
Figure 7. Démarche méthodologique pour l'analyse du potentiel énergétique (éolien et houlomoteur) du littoral algérien.....	28
Figure 8. Présentation des données brutes issues de WaveClimate	29
Figure 9. Roses des vents à 150 m (au-dessus du niveau moyen de la mer) des sites étudiés.....	32
Figure 10. Distribution de Weibull à 150 m (au-dessus du niveau moyen de la mer) des sites étudiés.....	35
Figure 11. Cartographie à l'échelle annuelle du potentiel moyen énergétique éolien offshore moyen à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG).....	37
Figure 12. Roses des vagues des 20 sites étudiés.....	39
Figure 13. Distribution des indices de variabilité (CoV), de mensualité (MV) et de saisonnalité (SV) de la ressource houlomotrice pour les 20 sites étudiés.....	41
Figure 14. Flux de la puissance moyenne des vagues FPH (kW/m) aux sites étudiés.....	43
Figure 15. Technologie éolienne offshore Vestas V236-15 MW.....	43
Figure 16. Les caractéristiques de l'éolienne Vestas V236.....	45
Figure 17. Convertisseur d'énergie des vagues CorPower Ocean	48
Figure 18. Matrice de puissance du HiWave-5 (fournie par CorPower dans le cadre du projet).....	49
Figure 19. Matrices de distribution des états de mer (Hs, Te) pour les 20 sites étudiés.....	50
Figure 20. Bathymétrie de la zone de Boumerdès.....	53
Figure 21. Bathymétrie de la zone de Skikda/Annaba.....	54
Figure 22. Maillages triangulaires utilisés pour la modélisation hydrodynamique des sites de Boumerdès (Site 12) et d'Annaba (Site 18).....	55
Figure 23. Les cartes de la vitesse des courants issues du module MIKE 21 HD – Zone de Boumerdès. (Hs=5,65 m, Tp=12 s).....	56

Figure 24. Les cartes de la période de pic (T_p) – Zone de Boumerdès ($H_s = 5,65$ m, $T_p = 12$ s) issues de la simulation spectrale des vagues (SW).	57
Figure 25 . Les cartes de la hauteur significative des vagues (H_s) – Zone de Boumerdès ($H_s = 5,65$ m, $T_p = 12$ s) issues de la simulation spectrale des vagues (SW).	58
Figure 26. Les cartes de la puissance de la houle (Wave Power) – Zone de Boumerdès ($H_s = 5,65$ m, $T_p = 12$ s) issues de la simulation spectrale des vagues (SW).	59
Figure 27. Les cartes de la vitesse des courants –Zone de Skikda/Annaba issues du module MIKE 21 HD ($H_s=8,66$ m, $T_p=13$ s).....	60
Figure 28. Les cartes de la période de pic (T_p) – Zone de Skikda/Annaba issues de la simulation spectrale des vagues (SW) ($H_s=8,66$ m, $T_p=13$ s).....	61
Figure 29. Les cartes de la hauteur significative des vagues (H_s) – Zone de Skikda/Annaba issues de la simulation spectrale des vagues (SW) ($H_s=8,66$ m, $T_p=13$ s).	62
Figure 31. L'architecture globale du système hybride offshore retenu pour ce projet.	65
Figure 32. Répartition géographique et état d'avancement des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie (Données technologiques incluses).	66
Figure 33. Localisation des sites pilotes hybrides et leurs connexion énergétique aux stations de dessalement.	67

Liste des tableaux

Tableau 1. Types et caractéristiques des flotteurs pour éoliennes offshore flottantes	6
Tableau 2. Comparaison des technologies de dessalement selon les besoins énergétiques.....	13
Tableau 3. Technologies des électrolyseurs (avantage et inconvénients)	14
Tableau 4. Synthèse comparative des principales technologies de stockage de l'hydrogène.....	18
Tableau 5. Localisation des 20 sites.....	26
Tableau 6. Les caractéristiques de l'éolienne Vestas. (V236-15.0 MWTM, no date)	44
Tableau 7. Résultats de l'évaluation du potentiel éolien offshore par site.	47
Tableau 8. Paramètres houlomoteurs calculés par site.....	50
Tableau 9. Comparaison des performances des deux sites pilotes en termes de production annuelle d'énergie et de réduction des émissions carbone.	64
Tableau 10. Indicateurs technico-économiques : LCOE et LCOH des sites pilotes.....	70

Liste des abréviations

AEP	Annual Energy Production (Production Annuelle d'Énergie)
CAPEX	Capital Expenditure (dépenses d'investissement)
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism (voir MACF)
CDER	Centre de Développement des Énergies Renouvelables
CREG	Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz
CRF	Capital Recovery Factor (facteur de récupération du capital)
DHI	Danish Hydraulic Institute (éditeur du logiciel MIKE 21)
DPE	Densité de Puissance Éolienne
EES	Évaluation Environnementale Stratégique
EIE	Étude d'Impact Environnemental
GES	Gaz à Effet de Serre
H₂	Hydrogène (dihydrogène)
Hs	Hauteur significative des vagues
IEA	International Energy Agency (Agence Internationale de l'Énergie)
IEC	International Electrotechnical Commission (Commission Électrotechnique Internationale)

ISO	International Organization for Standardization (Organisation Internationale de Normalisation)
JREEN	Journal of Renewable Energy and Environment
LCOE	Levelized Cost of Energy (coût actualisé/nivelé de l'énergie)
LCOH	Levelized Cost of Hydrogen (coût actualisé/nivelé de l'hydrogène)
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier (vecteur organique liquide d'hydrogène)
MACF	Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières
MSF	Multi-Stage Flash (distillation à détente étagées)
MUSD	Million(s) de Dollars Américains
MV	Variabilité Mensuelle
MW	Mégawatt
NH₃	Ammoniac
NNW / NNE	Nord-Nord-Ouest / Nord-Nord-Est
OPEX	Operational Expenditure (dépenses opérationnelles)
OSPAR	Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est
PEM	Proton Exchange Membrane (membrane échangeuse de protons)

RO	Reverse Osmosis (osmose inverse)
RSER	Renewable and Sustainable Energy Reviews (revue scientifique)
SIG	Système d'Information Géographique
SV	Variabilité Saisonnière
SVI	Saisonnière (indice de) Variabilité
SWRO	SeaWater Reverse Osmosis (osmose inverse d'eau de mer)
TLP	Tension Leg Platform (plateforme à lignes tendues)
UHS	Underground Hydrogen Storage (stockage souterrain d'hydrogène)
WEC	Wave Energy Converter (convertisseur d'énergie des vagues)
WP	Wave Power (puissance de la houle)
ZEE	Zone Économique Exclusive

Introduction générale

Introduction générale

La transition énergétique mondiale vers des sources d'énergie propres et durables s'est imposée comme une priorité stratégique face à l'urgence climatique et à l'épuisement progressif des combustibles fossiles. Dans ce contexte, les énergies marines renouvelables, en particulier l'énergie éolienne offshore et l'énergie houlomotrice, suscitent un intérêt croissant en raison de leur densité énergétique élevée, de leur complémentarité naturelle et de leur potentiel considérable pour alimenter des filières de production d'hydrogène vert et de dessalement de l'eau de mer à grande échelle.

L'Algérie, pays à façade méditerranéenne de 2148 km, dispose d'un gisement énergétique marin encore largement sous-exploité. Sur le plan éolien offshore, les données de la Banque mondiale indiquent un potentiel technique national estimé à 18 GW, localisé majoritairement en eaux profondes (> 50 m), ce qui oriente naturellement le choix technologique vers les éoliennes flottantes [1]. Les premiers travaux de caractérisation du vent en Algérie remontent à Hammouche (1991) [2], qui ont établi le premier atlas éolien national à partir de données issues de 37 stations météorologiques couvrant la période 1980–1990, posant ainsi les bases de la connaissance du gisement éolien algérien. Par la suite, Himri et al. (2020) [3] ont approfondi cette évaluation en recourant au logiciel WAsP, permettant une estimation plus fine de la viabilité de la production éolienne à l'échelle du territoire. Des études régionales ont progressivement complété ce panorama : Boudia et Guerri ont analysé le potentiel éolien dans la région d'Oran au Nord-Ouest, Himri et al. (2020) [3] ont investigué la viabilité économique de l'énergie éolienne dans le Sud-Ouest algérien, et Meziane et al. (2025) [4] ont simulé l'écoulement du vent sur la région de Hassi R'mel via WAsP, fournissant des données essentielles pour la planification énergétique locale.

Sur le plan houlomoteur, les côtes algériennes présentent l'un des potentiels les plus remarquables de toute la Méditerranée. Amarouche et al. (2021) [5] ont démontré que la côte Est de l'Algérie recèle une énergie annuelle dépassant 100 MWh/m à moins de 15 km du rivage, avec une probabilité d'état de mer calme inférieure à 18 %, faisant de cette région une zone prioritaire pour le déploiement de systèmes houlomoteurs. Ces résultats ont été confirmés et enrichis par des analyses climatologiques à long terme sur l'ensemble du littoral, révélant une variabilité spatiale significative entre les zones occidentale, centrales et orientales, avec une concentration du potentiel énergétique des vagues sur la façade Est du pays [6]

Introduction générale

Dans le domaine du dessalement, l'Algérie s'est positionnée comme un leader régional avec 21 usines de dessalement par osmose inverse (SWRO) construites en moins de deux décennies, visant une capacité de 5,61 millions de m³/jour d'ici 2027 [7,8]. La création de l'Agence Nationale de Dessalement (ANDE) en 2023 et la localisation côtière de la quasi-totalité de ces stations créent des synergies naturelles avec les ressources énergétiques marines offshore, ouvrant la voie à des couplages énergétiques innovants. Concernant l'hydrogène vert, l'Algérie dispose d'atouts considérables pour s'imposer comme producteur et exportateur compétitif vers l'Europe, dans le cadre du Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF) qui valorise les productions bas-carbone. La technologie d'électrolyse Membrane Echangeuse de Protons (PEM), retenue dans la présente étude avec une consommation spécifique de 56,42 kWh/kg H₂ [9], constitue la voie la plus adaptée au couplage avec des sources renouvelables variables telles que l'éolien et le houlomoteur offshore.

Sur le plan réglementaire, l'Algérie dispose d'un cadre législatif progressivement structuré autour des énergies renouvelables et de la transition bas-carbone. Ce cadre, bien qu'encore en cours de consolidation pour l'offshore et l'hydrogène vert, offre une base juridique suffisante pour l'initiation de projets pilotes.

Malgré ce contexte scientifique, industriel et réglementaire favorable, le potentiel des systèmes hybrides éolien-houlomoteur offshore en Algérie demeure largement inexploré dans la littérature. Les études existantes se concentrent principalement sur des ressources terrestres ou des technologies isolées, sans intégrer l'hybridation des ressources marines dans une perspective technico-économique complète orientée vers la production d'hydrogène vert. Ce déficit analytique constitue le principal gap que la présente étude se propose de combler.

La présente étude vise ainsi à proposer une évaluation intégrée et spatialement résolue du potentiel hybride éolien-houlomoteur offshore le long du littoral algérien, couvrant 20 sites côtiers répartis de l'Ouest à l'Est du pays, sur la base d'une série climatologique de 30 ans (1992–2022). Le cadre méthodologique combine une analyse statistique avancée sous Python, des simulations hydrodynamiques couplées réalisées avec MIKE 21 HD-SW, et une analyse spatiale conduite sous ArcGIS Pro. Deux sites pilotes S12 et S18 ont été sélectionnés pour accueillir un système hybride de 159 MW associant des éoliennes Vestas V236-15 MW et des convertisseurs houlomoteurs CorPower C4, dont la production est intégralement destinée à l'hydrogène vert, en lien direct avec les stations de dessalement de Cap Djinet et de Skikda.

Introduction générale

Le présent mémoire est organisé en cinq chapitres :

Chapitre I : Généralités.

Chapitre II : Zone d'étude et évaluation du potentiel énergétique.

Chapitre III : Sélection et dimensionnement des technologies de conversion.

Chapitre IV : Sélection et optimisation des sites d'implantation du système hybride.

Chapitre V : Production de l'hydrogène vert et analyse technico-économiques du projet.

Chapitre I

Généralité

1. Énergies renouvelables

L'épuisement des combustibles fossiles et la nécessité urgente de protéger l'environnement ont conduit à s'intéresser de plus en plus aux sources d'énergie renouvelables dans la recherche d'une énergie propre. Faisant partie de la gamme remarquable de sources d'énergie renouvelables et constituant une alternative viable aux combustibles fossiles [10].

Les différentes filières des énergies renouvelables ainsi que leurs sources respectives sont illustrées dans **(Figure 1)** ci-dessous.

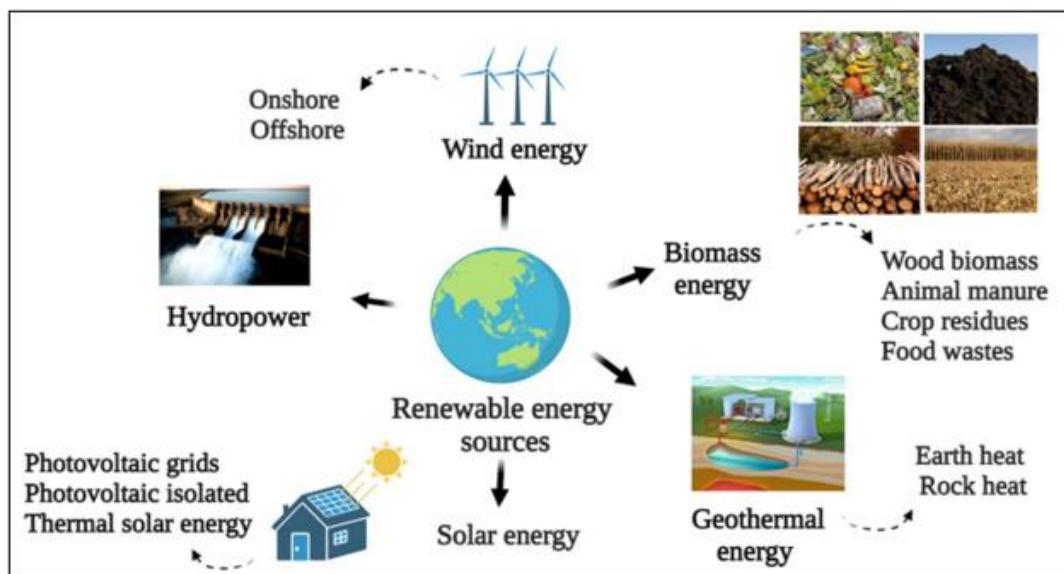


Figure 1. Types d'énergies renouvelables[11] .

Les énergies renouvelables océaniques telles que l'énergie éolienne offshore et l'énergie des vagues offrent une solution convaincante pour relever les défis énergétiques et environnementaux [10].

1.1. Énergie éolienne offshore

L'énergie éolienne offshore peut être définie comme l'énergie produite à partir du vent en mer , le vent est produit par le réchauffement inégal de la surface terrestre par le soleil.

Une éolienne peut convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou électrique qui peut être exploitée à des fins pratiques : le vent souffle sur les pales du rotor, les faisant tourner et entraînant un arbre relié au moyeu du rotor [12].

Deux principales technologies de générateurs dominent les éoliennes offshore :

- les générateurs synchrones à aimants permanents à **entraînement direct** .
- les générateurs synchrones à aimants permanents à **entraînement semi-direct**.

Le système direct drive offre une production annuelle d'énergie plus élevée, tandis que le système semi-direct présente un coût par kilowattheure plus faible. Ainsi, le choix technologique repose sur un compromis entre performance énergétique et coût [13] .

1.1.1. Fondations des éoliennes offshore

Comparées aux éoliennes terrestres, les structures de fondation des éoliennes offshore sont nettement plus complexes. Cette complexité s'explique principalement par la sévérité de l'environnement marin, où les éoliennes doivent résister à des charges de vent plus importantes, ainsi qu'aux efforts générés par les vagues et les courants marins [14].

Les éoliennes offshore reposent sur différents types de fondations, dont le choix dépend essentiellement de la profondeur d'eau, des caractéristiques géotechniques du site et de la puissance de la turbine installée[15]. **Figure 2** illustre les différents types de fondations utilisées pour les éoliennes offshore et **Tableau 1** Tableau 1. Types et caractéristiques des flotteurs pour éoliennes offshore flottantes [17]. présente une comparaison des concepts de plateformes flottantes pour applications offshore.

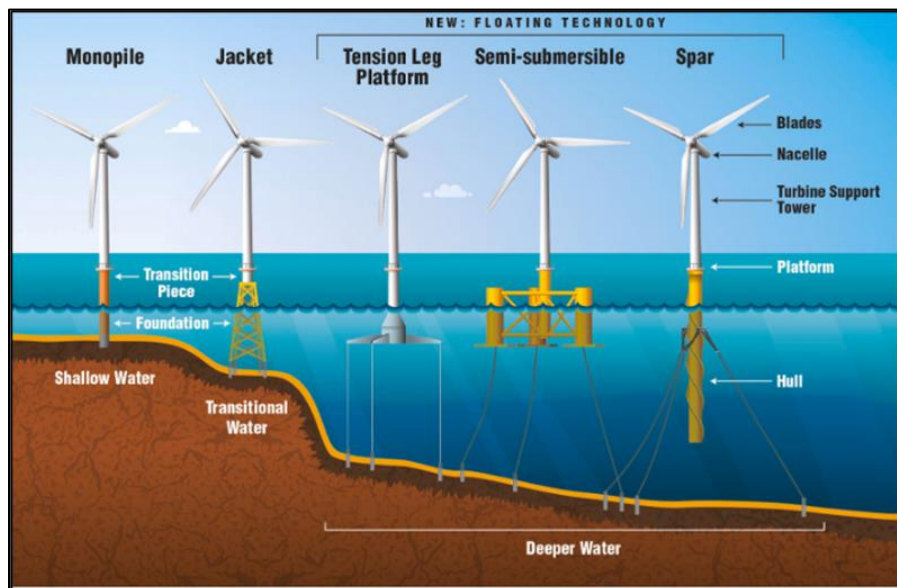


Figure 2. Les fondations des éoliennes offshore [16].

Tableau 1. Types et caractéristiques des flotteurs pour éoliennes offshore flottantes [17].

Critère	Barge	Semi-submersible	Spar	TLP
Stabilité	Hydrostatique	Hydrostatique	Ballast	Tension des amarres
Remorquabilité	Très bonne	Excellente	Bonne	Faible
Installation	Simple	Simple	Simple mais limitée	Complexe
Profondeur d'eau	> 30 m	> 30–60 m	> 50–100 m	40–60 m
Application	Quelques-unes	Très répandue	Très répandue	Peu d'unités

2.1.1. Avantages et limites des technologies offshore

2.1.1.1. Avantages de l'éolien offshore

L'éolien offshore est une énergie renouvelable propre à fort potentiel, favorisant la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la sécurité énergétique à long terme [18].

- Ressource éolienne plus abondante et plus stable

Les sites offshore présentent des vents plus élevés et réguliers que sur terre, augmentant le facteur de charge et la production, avec un espace en mer plus vaste facilitant l'installation de parcs de grande puissance sans contraintes foncières [19].

- Réduction des impacts environnementaux et sociaux locaux

L'éloignement des parcs offshore des zones densément peuplées réduit les nuisances visuelles et sonores, par rapport aux installations terrestres. Cette caractéristique améliore l'acceptabilité sociale des projets [19].

- Potentiel important en eaux profondes

Les éoliennes flottantes permettent d'exploiter des zones en eaux profondes (> 50–60 m), où le potentiel éolien est élevé. Les technologies flottantes (spar, semi-submersible, TLP) issues de l'industrie pétrolière et gazière ouvrent ainsi la voie à l'exploitation de nouveaux gisements énergétiques en mer [20].

- Développement technologique et montée en puissance

L'augmentation continue de la capacité unitaire des turbines offshore permet d'améliorer le rendement des parcs et de réduire le coût actualisé de l'électricité (LCOE). Les recherches récentes portent sur l'optimisation des fondations (monopieux, jackets, caissons à succion, ancrages pour structures flottantes), l'analyse numérique avancée sol-structure et l'amélioration de la fiabilité structurelle [21].

2.1.1.2. Limites et contraintes de l'éolien offshore

L'éolien offshore présente des coûts d'investissement élevés (2 à 3 fois l'éolien terrestre)[18]. avec une part importante des fondations (20 à 30 %) et jusqu'à 36,2 % pour les plateformes flottantes [21]. Sur le plan technique, les éoliennes sont soumises à des chargements environnementaux sévères et combinés, avec des interactions sol-structure non linéaires et un comportement des monopieux encore imparfaitement maîtrisé [20][22] .

La complexité géotechnique et les limites des courbes de pression du sol en fonction du déplacement (p-y) nécessitent des modèles numériques avancés [19]. L'affouillement (scour) peut réduire la capacité portante et modifier la réponse dynamique [21].

Enfin, la fatigue structurelle et les incertitudes sur les systèmes d'amarrage des éoliennes flottantes exigent des analyses dynamiques couplées, ce qui limite leur déploiement à grande échelle [20][23] .

1.2. Énergie houlomotrice

L'énergie des vagues est générée par le vent soufflant sur la surface de la mer, lui-même issu du réchauffement différentiel de la surface terrestre dû à l'énergie solaire. L'énergie houlomotrice présente plusieurs avantages dans le mix électrique, notamment une **densité de puissance élevée (23 kW/m)** supérieure à celle du vent et du solaire, une **faible variabilité et une meilleure prévisibilité**, ainsi que la capacité des vagues à parcourir de longues distances avec de faibles pertes et interférences environnementales [24] [25].

1.2.1. Grandes familles technologiques

Une classification largement utilisée distingue trois catégories principales [26] :

- **Colonnes d'eau oscillantes (Oscillating Water Columns, OWC)** : une chambre semi-immergée piège une poche d'air au-dessus d'une colonne d'eau ; le va-et-vient de la houle comprime/détend l'air et entraîne une turbine à air couplée à un générateur (**Figure 3. Schéma de la colonne d'eau oscillante.**).

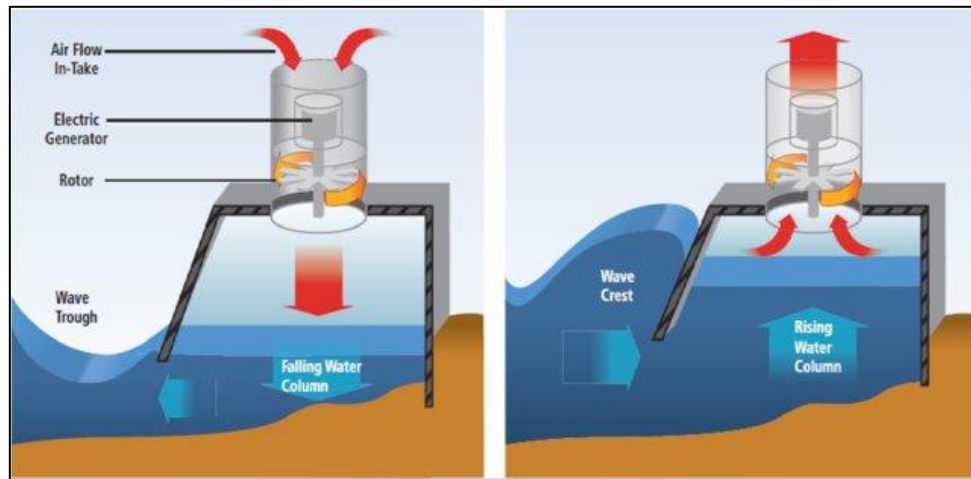


Figure 3. Schéma de la colonne d'eau oscillante.

- **Convertisseurs à corps oscillant (Oscillating Body Converters)** : dispositifs flottants ou immergés (**Figure 4. Schéma de convertisseurs à corps oscillant.**) exploitant les mouvements de la houle (translation/rotation) via des prises de force (PTO) le plus souvent hydrauliques ou en entraînement direct (linéaire).

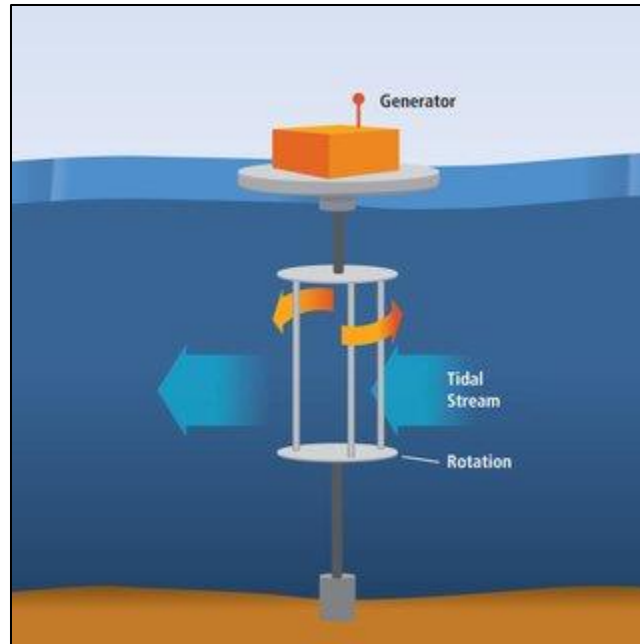


Figure 4. Schéma de convertisseurs à corps oscillant.

- **Dispositifs à surverse (Overtopping converters / terminators)** : les vagues franchissent une rampe et remplissent un réservoir surélevé; l'eau stockée s'écoule ensuite à travers des turbines « basse chute », analogues à celles des micro-centrales hydroélectriques (**Figure 5. Schéma de dispositifs à surverse.**).

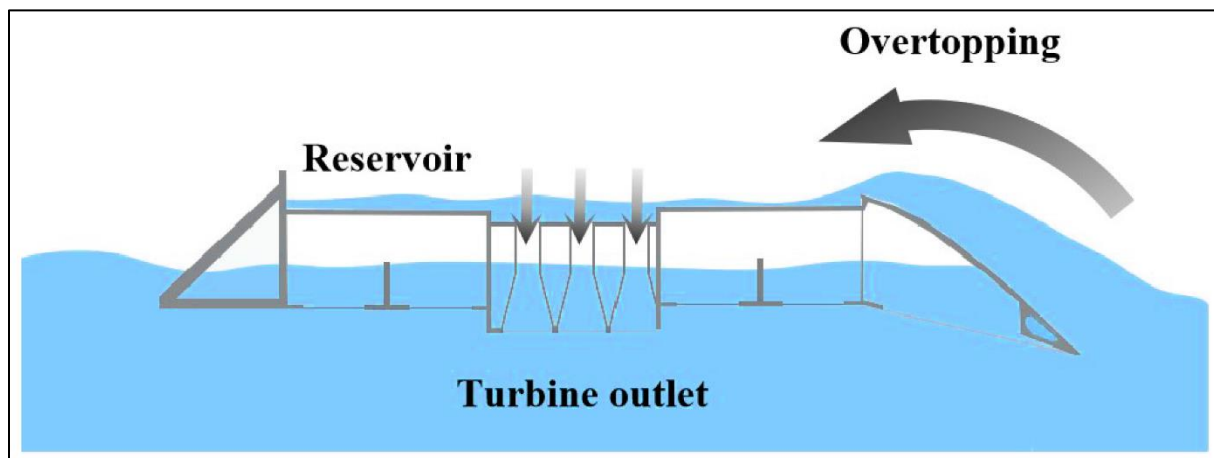


Figure 5. Schéma de dispositifs à surverse.

1.2.1.1. Sous-catégorisation selon l'interaction vague-dispositif

Une autre manière de classer les WEC consiste à considérer le mode d'extraction en fonction des mouvements dominants de la houle [27]:

- **Point absorbers** : souvent en « heave », mouvement vertical.
- **Terminators / convertisseurs de « surge »** : mouvement horizontal avant-arrière.
- **Attenuators** : exploitation du mouvement relatif le long de l'onde, typiquement par articulation/rotation.

À titre indicatif, plus de la moitié des concepts développés sont des point absorbers, suivis des terminators puis des attenuators [27].

1.2.2. Avantages et limites des technologies d'énergie houlomotrice offshore

1.2.2.1. Avantages des technologies d'énergie houlomotrice

Les technologies houlomotrices offshore exploitent une ressource abondante et prévisible (10–40 kW/m) avec une faible variabilité, assurant une production stable et complémentaire à l'éolien (25–40 %). Elles permettent une réduction des émissions CO₂ > 90 %, avec des OPEX faibles (2–4 % CAPEX/an) et un LCOE < 100 €/MWh d'ici 2040 grâce aux systèmes hybrides [28].

1.2.2.2. Limites des technologies d'énergie houlomotrice

Malgré cela, elles présentent des CAPEX élevés (5–10 M€/MW) et un LCOE de 150–400 €/MWh, limitant leur compétitivité. Les contraintes incluent la survivabilité en mer, le bio-encrassement, l'intermittence et la faible scalabilité (<100 MW), ainsi que des impacts environnementaux nécessitant des études approfondies [29].

1.3. Potentiel de l'énergie éolienne offshore mondiale et méditerranéenne

L'énergie éolienne offshore dispose d'un potentiel technique supérieur à 71 000 GW, avec 20 000 GW en eaux peu profondes (LCOE ~50–70 \$/MWh) et le reste en eaux profondes (LCOE 80–120 \$/MWh). La capacité mondiale atteint 83 GW en 2024 et pourrait atteindre 2 000 GW d'ici 2050 (7 000 à 8 000 TWh/an) [30,31].

Les principales zones sont la mer du Nord, les États-Unis et l'Asie-Pacifique, avec un fort potentiel pour l'hydrogène vert (2–3 \$/kg) [32]. En Méditerranée, le potentiel est de 782 GW, avec un LCOE < 90 €/MWh dans la majorité des sites et un fort potentiel en Algérie et en Afrique du Nord [4,33].

Ce potentiel pourrait couvrir jusqu'à 50–70 % de la demande régionale, soutenu par des systèmes hybrides.

1.4. Potentiel de l'énergie houlomotrice offshore mondiale et méditerranéenne

Le potentiel brut de l'énergie houlomotrice est estimé entre 90 000 et 132 000 TWh/an, avec un potentiel exploitable de 2 000 à 4 500 TWh/an et un LCOE de 150 à 300 \$/MWh. Les projections atteignent 29 500 TWh/an d'ici 2100 et 300 GW d'ici 2050 [34].

Les principaux hotspots incluent l'océan Austral, les États-Unis, le Royaume-Uni et l'Australie, avec un déploiement encore faible (<100 MW) mais un coût pouvant atteindre la parité (~50 \$/MWh) d'ici 2040.

En Méditerranée, le potentiel est de 200 à 500 TWh/an (50 à 100 TWh/an exploitables), surtout en Algérie et en Afrique du Nord, avec un LCOE pouvant descendre à 100 €/MWh d'ici 2040 [35,36].

1.5. Potentiel de l'énergie offshore en Algérie

Les conclusions montrent que les côtes algériennes présentent un potentiel énergétique des vagues considérable, avec une zone « hotspot » importante sur les côtes orientales. Une variabilité significative des caractéristiques énergétiques des vagues a été observée selon les zones. La côte Est de l'Algérie possède l'un des plus forts potentiels énergétiques de la Méditerranée, avec une énergie annuelle totale dépassant 100 MWh/m à moins de 15 km de la côte et une probabilité d'état de mer calme inférieure à 18 % [37].

Par ailleurs, le potentiel des énergies marines ne se limite pas uniquement à l'énergie houlomotrice. Concernant l'éolien offshore, les données fournies par la Banque mondiale montrent que l'Algérie a un potentiel technique de 18 gigawatts (GW) localisé sur des profondeurs supérieures à 50 mètres, orientant le choix technique vers des éoliennes flottantes.

[1] .

L'évaluation des publications scientifiques sur les énergies renouvelables (solaire, éolienne, biomasse, géothermie) et les nouvelles technologies (nucléaire avancé, hydrogène, stockage d'énergie, internet de l'énergie) montre une croissance accélérée de la recherche dans le domaine

des nouvelles énergies. Parmi celles-ci, l'Hydrogène vert qui pourrait être produit à partir d'un processus propre consistant à séparer les molécules d'eau (H_2O) en hydrogène (H_2) et oxygène (O_2) grâce à l'électricité issue de sources renouvelables [38].

L'hydrogène vert ainsi produit est propre, sans émissions et durable, constituant une alternative aux énergies fossiles. Son importance réside dans son rôle face aux défis énergétiques mondiaux et à la lutte contre le changement climatique, car il ne génère pas de CO_2 lors de sa production, contribuant ainsi à la neutralité carbone et au développement durable. Il offre également une solution clé pour le stockage et l'intégration des énergies renouvelables, en réduisant le problème d'intermittence énergétique [39].

2. Dessalement de l'eau de mer : un levier stratégique pour l'Algérie

L'Algérie est devenue un leader régional du dessalement de l'eau de mer, avec 21 usines construites en moins de deux décennies et une augmentation significative des investissements dans le dessalement de l'eau de mer par l'osmose inverse (SWRO) depuis 2000 [7]. En conséquence, le pays est souvent cité comme le premier en Afrique et le deuxième dans le monde arabe (après l'Arabie saoudite) en termes de capacité installée de production d'eau dessalée [40].

Le programme national de dessalement est structuré en plusieurs phases, portant progressivement la capacité à **5,61 millions de m^3 /jour d'ici 2027** et augmentant fortement la part de l'eau dessalée dans l'approvisionnement national [8].

Enfin, la création de l'Agence nationale de dessalement (**ANDE**) en 2023 a renforcé la gestion et l'exploitation des infrastructures de dessalement [41].

2.1. Consommation énergétique du dessalement

La consommation énergétique du dessalement dépend de la **salinité, la température, le taux de récupération et le prétraitement (Tableau 2)**, avec une consommation électrique des stations d'osmose inverse généralement de **3,5-5,0 kWh/ m^3** [42].

L'énergie minimale théorique pour le dessalement de l'eau de mer (~ 35 g/L, 50 % de récupération) est d'environ **1,06 kWh/m³**, ce qui met en évidence les pertes liées aux irréversibilités et contraintes de procédé [43].

Tableau 2. Comparaison des technologies de dessalement selon les besoins énergétiques. [44–46]

Procédé	Température (°C)	Énergie Électrique (Kwh/M ³)	Énergie Thermique (Kwh/M ³)	Énergie Totale (Kwh/M ³)
MED	< 70	1,5–2	4–7	5,5–9
MSF	120	2,5–4	7,5–12	10–16
RO	< 50	3–4	—	3–4

2.2. Possibilités de couplage avec les énergies offshore

La majorité des usines de dessalement se situe sur le littoral, ce qui rend naturelles les synergies avec des ressources offshore : éolien en mer, énergie des vagues, courants de marée.

Éolien offshore vers dessalement : Le couplage éolien-dessalement est largement étudié (topologies réseau ou autonomes). Les enjeux techniques sont surtout : intermittence, qualité de puissance, et dimensionnement du stockage/pilotage pour protéger l'unité RO [47].

Énergie des vagues vers dessalement : Deux approches existent [48,49]

- Couplage électrique (vagues → électricité → RO)
- Couplage mécanique/hydraulique direct (vagues → pressurisation/pompage → RO) : qui peut réduire les conversions intermédiaires. Des travaux expérimentaux et de modélisation montrent la faisabilité de systèmes RO directement alimentés par convertisseurs houlomoteurs, et proposent des indicateurs de “couverture” énergétique d'une usine par une ferme houlomotrice.

Hybrides offshore (éolien + vagues) : Des études montrent l'intérêt de combiner plusieurs ressources marines pour augmenter la stabilité de production et améliorer la part de couverture de la demande électrique d'une usine côtière [50].

3. Production d'hydrogène vert

3.1. Méthodes de production d'hydrogène vert

La production d'hydrogène vert est encore à ses débuts et nécessite d'importants efforts de recherche et développement. Dans cette partie, nous aborderons les méthodes de production d'hydrogène vert et leur état d'avancement actuel.

3.1.1. Électrolyse

L'électrolyse de l'eau est un procédé utilisant un courant électrique pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de l'eau. Elle constitue une voie prometteuse pour la production d'hydrogène vert à partir d'une électricité renouvelable.

Le procédé repose sur les réactions suivantes [51]:

À l'anode (électrode positive) : $2\text{H}_2\text{O (l)} \rightarrow \text{O}_2 \text{ (g)} + 4\text{H}^+ \text{ (aq)} + 4\text{e}^-$

Cette réaction libère du dioxygène et génère des ions hydrogène (protons) dans l'électrolyte.

À la cathode (électrode négative) : $4\text{H}^+ \text{ (aq)} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2 \text{ (g)}$

Cette réaction consomme les ions hydrogène et les électrons produits à l'anode, et forme du dihydrogène.

Réaction globale : $2\text{H}_2\text{O (l)} \rightarrow 2\text{H}_2 \text{ (g)} + \text{O}_2 \text{ (g)}$

Le procédé nécessite une source d'énergie externe, généralement sous forme d'électricité, afin de piloter les réactions électrochimiques aux électrodes. L'énergie requise pour l'électrolyse peut être fournie par différentes sources, incluant les énergies renouvelables ainsi que des sources conventionnelles telles que les combustibles fossiles et le nucléaire .

État actuel de la technologie

L'électrolyse de l'eau progresse rapidement grâce aux améliorations en rendement, mise à l'échelle et réduction des coûts. Trois technologies (**Tableau 3**) dominent aujourd'hui [52]:

Tableau 3. Technologies des électrolyseurs (avantage et inconvénients)[53].

Technologie d'électrolyse	Avantages	Inconvénients
AWE (Électrolyse Alcaline)	Faible coût d'investissement, bien adaptée aux applications à petite échelle, bon rendement à faible puissance d'entrée.	Scalabilité (montée en puissance) limitée, nécessite une grande surface, durabilité plus faible, rendement réduit à forte puissance.
PEM (Membrane Echangeuse De Protons)	Rendement élevé à faible puissance, plus facilement extensible et mieux adaptée aux applications de grande échelle, fonctionne à des températures et pressions plus faibles, plus durable.	Coût d'investissement plus élevé, ingénierie plus complexe, sensibilité aux impuretés de la source d'eau.
SOEC (Electrolyse A Oxyde Solide)	Rendement élevé à haute température, capable de produire de l'hydrogène de haute pureté.	Scalabilité limitée, nécessite des températures élevées et peut être coûteuse à exploiter, pas encore commercialement viable.

3.1.2. Scission thermochimique de l'eau

La scission thermochimique de l'eau consiste à utiliser une chaleur à très haute température pour dissocier l'eau en hydrogène et oxygène, l'hydrogène étant ensuite récupéré et stocké comme carburant. Cette voie est considérée comme prometteuse pour produire de l'hydrogène vert, car elle peut être alimentée par des sources de chaleur bas-carbone (solaire thermodynamique à concentration, nucléaire, chaleur industrielle) sans nécessiter d'électricité comme intrant principal [54].

État actuel de la technologie

Les procédés thermochimiques solaires restent majoritairement au stade recherche et développement, avec une faisabilité démontrée en laboratoire mais des verrous techniques et économiques à lever avant commercialisation .

Le principe repose sur des **cycles redox d'oxydes métalliques**, avec une étape de réduction endothermique à haute température (800–1200 °C) suivie d'une réoxydation exothermique, l'oxyde jouant un rôle de catalyseur sans être consommé (Lin et al., 2015).

Réactions représentatives (cycle à base d'oxyde métallique)

- **Étape 1** (réduction, endothermique) : $\text{MO} + \text{énergie} \rightarrow \text{M} + 1/2 \text{O}_2$
- **Étape 2** (oxydation par la vapeur / production d' H_2) : $\text{M} + \text{H}_2\text{O (vapeur)} \rightarrow \text{MO} + \text{H}_2$
- Bilan global : $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ [55] .

Plusieurs matériaux sont étudiés pour ces cycles, notamment la cérie (CeO_2), les ferrites (MFe_2O_4 avec $\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}$ ou Cu) et les pérovskites (ABO_3), le choix influençant fortement les rendements, la stabilité et les conditions opératoires [55].

3.2. Stockage et transport de l'hydrogène vert : technologies, logistique et contraintes

Le développement d'une économie de l'hydrogène repose sur quatre piliers : production, stockage, transport et utilisation. Le stockage constitue un **goulet d'étranglement**, en raison de la **faible densité énergétique volumique de l'hydrogène (9,8 kJ/L)** comparée à l'essence (15,8 MJ/L) et au méthanol (31,7 MJ/L).

Cette contrainte impose de **comprimer, liquéfier ou convertir l'hydrogène en vecteurs chimiques (NH_3 , LOHC)** pour faciliter le stockage et la distribution à grande échelle [56,57].

3.2.2. Méthodes de stockage de l'hydrogène

Stockage gazeux comprimé (CG- H_2)

Le stockage en gaz comprimé utilise des réservoirs (acier, aluminium, composites) entre **15 et 70 MPa**, avec des **densités limitées** même à haute pression [58] .

Le remplissage rapide entraîne une élévation de température affectant la sécurité et la densité stockée, nécessitant des matériaux résistants [59].. Les réservoirs **Type I à V** sont utilisés, avec les **Type IV (liner polymère + composite)** largement adoptés, et les **Type V** en développement [60] [61].

Stockage liquide (LH_2) et cryo-comprimé

La liquéfaction à **-253 °C** est très énergivore (>30 % de l'énergie de l'H₂) . L'hydrogène liquifié (LH₂) offre une densité élevée mais reste limité par les pertes boil-off et la complexité. Le **cryo-comprimé (CcH₂)** combine basse température et pression, avec de bonnes performances mais des risques liés à la montée en température [62].

Stockage via vecteurs (NH₃, LOHC)

L'**ammoniac (NH₃)** possède une densité de **10,5 MJ/L**, permettant le stockage et le transport, mais présente des contraintes de toxicité et de décomposition [63]. Les **LOHC** (méthylcyclohexane, toluène, N-éthylcarbazole) permettent un stockage réversible (5-6 wt%) mais nécessitent une énergie élevée et présentent une dégradation à long terme [64] [65].

Stockage massif : stockage souterrain (UHS)

Le stockage souterrain exploite des formations naturelles avec des **capacités élevées et un coût réduit**, mais dépend fortement des conditions géologiques et de contraintes techniques et réglementaires .Un défi majeur reste le maintien de la **pureté de l'hydrogène**, affectée par les interactions géologiques et biologiques [66].

3.2.3. Options de transport et articulation transport-stockage

Le choix du mode de transport repose sur un compromis entre **distance, débit, usage final et infrastructures** [60–63,66]:

- **Gaz comprimé** : adapté aux usages locaux, mais limité par la haute pression, les risques de fuite et une faible efficacité volumique.
- **Hydrogène liquide** : pertinent pour le long-courrier et grands flux, mais pénalisé par la liquéfaction énergivore, le boil-off et les coûts élevés.
- **Cryo-comprimé (Cc)** : bonne dormance et remplissage rapide, mais enjeux de sécurité liés à la montée en température.
- **Vecteurs (NH₃, LOHC)** : avantage logistique (transport liquide), mais conversion en H₂ avec pénalités énergétiques et contraintes de pureté.

- **UHS** : stockage longue durée à grande capacité et coût faible potentiel, mais dépend du site et de la pureté.

Tableau 4 montre que le gaz comprimé est mature, le LH₂ offre de fortes densités mais coûteuses, le CcH₂ est performant mais sensible, et l'UHS présente un fort potentiel avec contraintes de site [55,67,68].

Tableau 4. Synthèse comparative des principales technologies de stockage de l'hydrogène.

Technologie	Atouts clés	Limites clés	Usages typiques
H₂ comprimé	Mature, simple, ravitaillement rapide	Haute pression, faible densité volumique, fuites/risques	Stockage local, mobilité, stationnaire
H₂ liquéfié	Densité volumique élevée, utile longue distance	Liquéfaction énergivore, cryogénie, boil-off	Transport longue distance, spatial
H₂ cryo-comprimé	Bon compromis densité/dormance, remplissage rapide	Échauffement au remplissage, coût/sécurité	Véhicules lourds, backup stationnaire
Stockage solide	Sûr, basse pression, bon potentiel volumique	Peu mature, cinétiques lentes, contraintes T°, coût matériaux	Petite échelle, FCEV, stationnaire
Stockage souterrain (UHS)	Très grande capacité, coût potentiel faible	Dépend du site, pureté à maintenir	Stockage massif, longue durée

4. Couplage éolien offshore – houlomoteur – dessalement – électrolyse : relations, efficacité, intérêts

4.1. Pourquoi un couplage : offshore renouvelables → eau dessalée → H₂

L'éolien offshore offre des facteurs de charge souvent plus élevés et une ressource plus régulière que l'éolien terrestre ; il est aujourd'hui fortement étudié comme "pilier" de production d'H₂ (onshore ou offshore). Les revues récentes détaillent plusieurs architectures : électrolyse à terre alimentée par câble, électrolyse en mer sur plateforme, ou solutions hybrides avec stockage [69].

Le houlomoteur (énergie des vagues) est particulièrement intéressant en complément : la mer contient une énergie plus “persistante” et parfois décalée par rapport au vent. Des travaux de synthèse sur le dessalement RO alimenté par vagues distinguent [70]:

- **Couplage indirect** : vagues → électricité → RO “classique”
- **Couplage direct** : vagues → énergie mécanique/hydraulique → pressurisation RO (potentiellement moins de conversions, donc moins de pertes)

4.2. Synergie “éolien offshore + vagues”

Un défi majeur du système (dessalement + électrolyse) est le facteur d’utilisation des équipements : les électrolyseurs coûtent cher, et leur rentabilité dépend fortement du nombre d’heures à charge utile. Les études sur l’éolien offshore-H₂ soulignent l’importance du pilotage énergétique et des stockages (batteries, H₂ tampon, etc.) pour lisser la puissance et éviter des arrêts fréquents [69].

L’intérêt du tandem éolien plus houle est donc double [70]:

- Réduire la variabilité de la production totale (et les contraintes de ramping pour l’électrolyse).
- Augmenter le “profil de base” disponible pour faire tourner dessalement et électrolyse plus régulièrement. (Interprétation logique à partir des analyses de couplage offshore-H₂ et vagues-RO.)

5. Enjeux économiques et environnementaux

5.1. Économie : CAPEX, facteur d’utilisation, corridors d’export

Les coûts dépendent du CAPEX offshore (fondations flottantes, câbles, ports, navires) et des contraintes logistiques, avec un besoin de gouvernance et d’infrastructures adaptées. Le LCOE et le potentiel de l’éolien flottant en Méditerranée servent de référence pour les choix offshore. Le coût de l’électrolyse est dominé par le prix de l’électricité et les heures de fonctionnement, d’où l’intérêt des systèmes hybrides (vent + houle) et du stockage [33,69,71].

5.2. Environnement : saumures, biodiversité, occupation de l'espace

Le dessalement pose des enjeux liés aux rejets de saumures et aux impacts locaux [72]. L'éolien offshore en Méditerranée implique des interactions avec la pêche, le trafic maritime et les écosystèmes, nécessitant une planification spatiale adaptée [71]. L'énergie houlomotrice présente des impacts locaux (ancrages, dynamique littorale) à analyser au cas par cas [70].

6. Cadre réglementaire proposé

6.1. Stratégie algérienne concernant les énergies renouvelables et l'hydrogène vert

L'Algérie s'est fixée des objectifs ambitieux en matière de transition énergétique. Le Programme National de Développement des Énergies Renouvelables prévoit 67 projets (solaire, hybride, éolien) pour atteindre 40 % de la production nationale d'électricité à partir de sources renouvelables à l'horizon 2030, ainsi qu'un objectif de 15 000 MW installés d'ici 2035 [73].

En 2023, L'Algérie a lancé une Stratégie Nationale de Développement de l'Hydrogène à l'horizon 2040, visant l'exportation de 40 TWh d'hydrogène vert et de ses dérivés. Cette stratégie prévoit un déploiement en trois phases : projets pilotes (2023-2030), montée en échelle industrielle (2030-2040), et industrialisation complète orientée vers l'exportation à l'horizon 2050 [74].

6.2. Cadre Législatif

Loi n° 02-01 du 5 Février 2002 : relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisations constitue le texte fondateur de la libéralisation du secteur énergétique algérien. Elle institue la **CREG** comme autorité de régulation et garantit l'accès au réseau national aux producteurs indépendants d'énergie, dont les producteurs d'énergies renouvelables. [75].

Loi n° 02-02 relative à la protection et à la valorisation du littoral : La présente loi a pour objet de fixer les dispositions particulières relatives à la protection et à la valorisation du littoral. Elle porte définition du littoral et, à son intérieur, de la zone côtière qui fait l'objet de mesures de protection et de valorisation spécifiques [76].

Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003 : relative à la protection de l'environnement impose la réalisation d'une **Étude d'Impact Environnemental (EIE)** préalable à tout projet susceptible d'affecter l'environnement, constituant une étape obligatoire pour tout projet d'énergie [76].

Loi 04-09 Modifiée : La loi existante devrait être modifiée pour inclure des dispositions spécifiques sur la production et l'utilisation de l'hydrogène vert. Un décret spécifique doit être adopté pour définir les critères techniques et environnementaux associés à la production d'hydrogène vert en Algérie [78].

Loi n° 16-09 du 3 août 2016 : relative à la promotion de l'investissement définit le cadre juridique général encourageant l'investissement national et étranger, en offrant des avantages fiscaux et douaniers aux projets d'investissement, y compris dans le secteur des énergies renouvelables [77].

La Convention de Barcelone pour la protection de la mer méditerranée contre la pollution, adoptée le 16 février 1976, adhésion de l'Algérie par décret n°80-14 du 26 janvier 1980 ; révisée en 1995 et ratifiée par décret présidentiel n°04-141 du 28 avril 2004 : engage l'Algérie à protéger le milieu marin méditerranéen, imposant des obligations environnementales strictes à tout projet offshore susceptible d'affecter les écosystèmes marins de la région [78] .

La Convention CNUDM (ratifiée en 1996) : confère à l'Algérie des droits souverains sur l'exploration et l'exploitation des ressources énergétiques dans sa ZEE et sur son plateau continental, constituant le fondement juridique international de tout projet d'énergie offshore. [79]

Le Décret n° 63-403 du 12 octobre 1963 : fixe la mer territoriale algérienne à **12 milles marins**, définissant la zone de pleine souveraineté de l'État algérien en mer [80] .

Le Décret exécutif n° 13-218 du 18 juin 2013 : Le Décret exécutif n° 13-218 du 18 juin 2013 est la pierre angulaire du cadre incitatif algérien pour la transition énergétique. Il définit les conditions d'octroi de primes visant à couvrir les coûts de diversification de la production d'électricité, en garantissant un tarif d'achat et un accès au réseau aux producteurs privés d'énergie solaire et éolienne [81] .

Le Décret présidentiel n° 18-96 du 20 mars 2018 : établit la **Zone Économique Exclusive (ZEE)** au large des côtes algériennes, conférant à l'Algérie des droits souverains sur l'exploration et l'exploitation des ressources énergétiques marines dans cette zone [82] .

L'Arrêté du 2 février 2014 : fixe les tarifs d'achat spécifiques à l'énergie éolienne, garantis sur une durée de **20 ans**, offrant ainsi la visibilité financière nécessaire pour encourager l'investissement dans les projets éoliens. [83] .

6.3. Le MACF : une contrainte qui devient opportunité stratégique pour l'Algérie

Dans un contexte où le CO₂ est devenu une nouvelle monnaie d'échange, le Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF, CBAM en anglais), entré en vigueur le 1^{er} janvier 2026, impose désormais aux exportateurs algériens une « douane climatique » qui intègre l'empreinte carbone dans le prix de revient des produits. Les secteurs les plus exposés — ciment, acier, aluminium, engrais et hydrogène — risquent un déclassement industriel face à des concurrents plus « verts » si aucune action n'est engagée. Face à cette urgence, trois impératifs s'imposent : la maîtrise du bilan carbone par le reporting, l'efficacité énergétique — chaque kilowattheure économisé constituant une réduction directe de la taxe carbone — et l'intégration des énergies renouvelables, notamment le solaire photovoltaïque, pour réduire drastiquement le poids carbone de chaque tonne produite. Sur le plan stratégique, le MACF ne doit pas être perçu comme une sanction mais comme un **accélérateur de la transition énergétique algérienne**, d'autant qu'une tarification carbone nationale permettrait de rapatrier cette ressource fiscale au profit de la transition locale plutôt que d'alimenter le budget européen. Avec l'hydrogène vert et le solaire, l'Algérie dispose d'un avantage comparatif réel pour devenir le partenaire privilégié d'une Europe en quête de solutions décarbonées — à condition d'agir maintenant [84].

6.4. Normes Techniques Applicables :

- **ISO 19880** : Infrastructure de ravitaillement en hydrogène gazeux [85].
- **IEC 62282** : Technologies des piles à combustible et électrolyseurs [86].
- **ISO 22734** : Systèmes de génération d'hydrogène par électrolyse de l'eau [87].
- **EN 17124 / EN 17177** : Qualité de l'hydrogène pour applications transport [88].
- **ISO 14687** : définit les exigences minimales de qualité du carburant hydrogène pour une utilisation dans un large éventail d'applications, notamment résidentielles, commerciales, industrielles, stationnaires ou pour les véhicules [89].
- **Règlement Délégué EU 2023/1184** : Critères de qualification de l'hydrogène renouvelable (référence pour l'export) [90].
- **IEC 61400-3** : Conception des éoliennes offshore - normes de performance et sécurité structurelle [91].

- **IEC 62600-2:** Technologies marines renouvelables – hydrolien [92] .
- **OSPAR Convention** : Obligations environnementales Méditerranée (référence Convention de Barcelone) [93] .

6.5. Critères de Localisation des Zones Offshore :

Les zones offshore éligibles doivent respecter les critères cumulatifs suivants :

- Exclusion des zones de servitude des gazoducs : TRANSMED (Algérie-Tunisie-Italie, Sonatrach/ENI, en service depuis 1983) et MEDGAZ (Beni Saf – Almeria) [94] .
- **Exclusion des corridors des câbles sous-marins de télécommunication** : ORVAL/ALVAL (Oran/Alger - Valence, 770 km, 40 Tb, depuis déc. 2019), MEDEX (Annaba, depuis 2019), SeaMeWe-4, et MEDUSA (en cours - prévu fin 2026) [95] .
- Exclusion des Aires Marines Protégées et des 71 sites d'intérêt écologique identifiés sur le littoral algérien [96] .
- Respect de la législation sur les trois zones de pêche maritime (Loi algérienne sur la pêche) [97] .

6.6. Evaluation Environnementale Stratégique (EES)

Conformément à la Loi n° 03-10/2003, une Evaluation Environnementale Stratégique (EES) est conduite préalablement à tout appel d'offres, puis une EIE détaillée est exigée pour chaque projet individuel. L'EIE maritime doit évaluer : [98]

- Les impacts sur les herbiers de Posidonie (espèce protégée en Méditerranée)
- Les effets acoustiques et vibratoires sur les mammifères marins et les poissons
- Les impacts des câbles électriques sous-marins (champs électromagnétiques, chaleur résiduelle)
- La compatibilité avec les activités de pêche réglementées
- Les modifications hydrodynamiques induites par les structures offshore

6.7. Impacts Identifiés et Mesures d'Atténuation

Le développement des énergies marines renouvelables entraîne des impacts identifiés par la littérature scientifique [99,100]:

- Câbles électriques sous-marins : dégradation des habitats, bruit, pollution chimique, chaleur résiduelle, champs électromagnétiques
- Eolien offshore : impacts sur les mammifères marins, poissons, communautés benthiques, oiseaux marins, modifications hydrodynamiques
- Exclusion des activités de pêche dans les zones des parcs
- L'Energie houlomotrice peut en revanche favoriser la biodiversité via la création d'habitats artificiels

Le promoteur devra appliquer la hiérarchie des mesures (éviter, réduire, compenser) et proposer un plan de suivi écologique conforme aux exigences de la Loi n° 03-10/2003 [101] .

Chapitre II

**Zone d'étude et évaluation du
potentiel énergétique.**

Introduction

Ce chapitre constitue le cœur analytique du mémoire. Il s'appuie sur une base de données conséquente, couvrant plusieurs décennies d'observations. Après un prétraitement rigoureux assurant la cohérence et la qualité statistique des séries temporelles, l'exploitation des données s'organise selon deux axes complémentaires : la première porte sur l'analyse du potentiel éolien offshore, et le second sur l'analyse du potentiel houlomoteur.

1. Zone d'étude

La zone d'étude correspond à l'unique façade maritime algérienne, qui s'étend sur un littoral d'environ 2148 km [102] dans le bassin sud-ouest de la mer Méditerranée. Elle couvre une région comprise entre 3° Ouest et 9° Est, et entre 35° et 40° Nord. Cette côte est principalement orientée vers le nord et se caractérise par un plateau continental très étroit. Ces caractéristiques rendent cette côte directement exposée aux houles provenant du nord, qui se dissipent rapidement vers le rivage dans les zones où le plateau continental est réduit. Selon l'Office National des Statistiques, le littoral algérien est réparti sur 14 wilayas côtières, où vivent plus de 40,7 % de la population totale [37,103]

Notre étude est basée sur la sélection de 20 sites répartis de l'Ouest à l'Est afin de couvrir le littoral algérien, comme illustré dans la **Figure 6.** , et sur la localisation des différents sites d'études (**Tableau 5**).

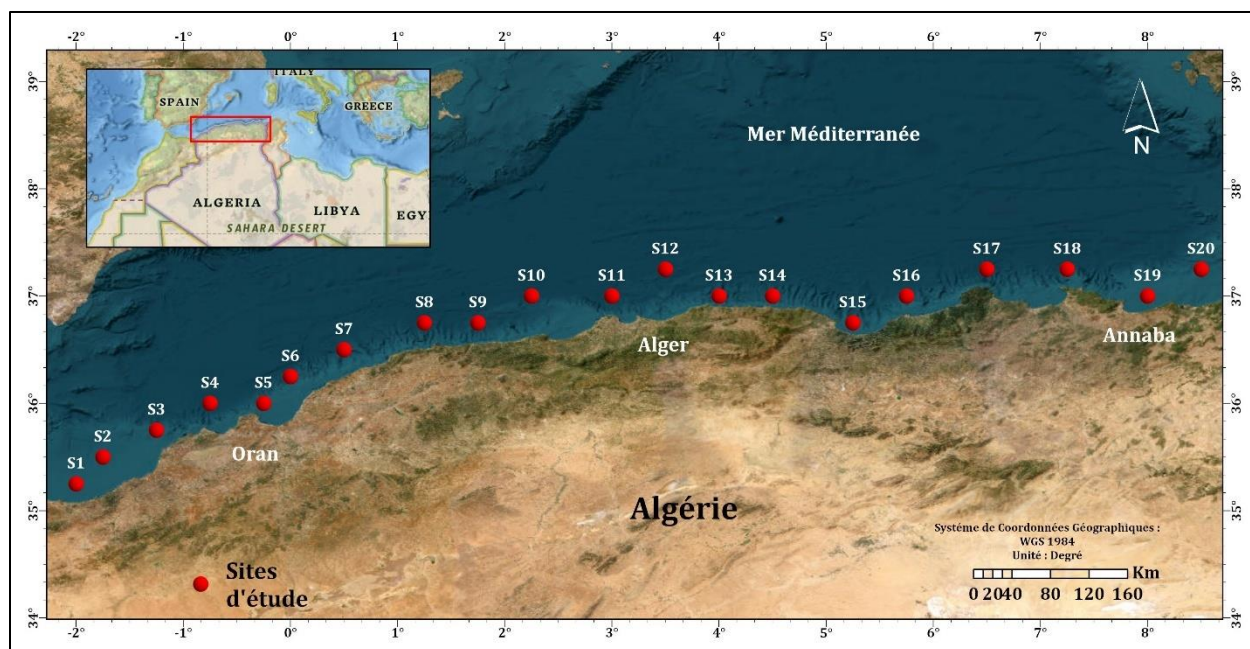


Figure 6. Délimitation de la zone d'étude et répartition des sites étudiés.

Tableau 5. Localisation des 20 sites.

Sites	Nombre de mesures (toutes les 3h)	Coordonnées géographiques	Distance entre le site et le trait de côte (km)
Site 1	90426	35.25° N, 2.00° W	18.19
Site 2	90474	35.50° N, 1.75° W	28.26
Site 3	90477	35.75° N, 1.25° W	17.16
Site 4	90517	36.00° N, 0.75° W	26.71
Site 5	90509	36.00° N, 0.25° W	16.13
Site 6	90544	36.25° N, 0.00°	22.39
Site 7	90567	36.50° N, 0.50° E	24.19
Site 8	90581	36.75° N, 1.25° E	22.06
Site 9	90580	36.75° N, 1.75° E	20.79
Site 10	90584	37.00° N, 2.25° E	40.24
Site 11	90584	37.00° N, 3.00° E	37.63
Site 12	90583	37.25° N, 3.50° E	16.90
Site 13	90584	37.00° N, 4.00° E	16.90
Site 14	90584	37.00° N, 4.50° E	51.92
Site 15	90557	36.75° N, 5.25° E	11.68
Site 16	90576	37.00° N, 5.75° E	11.73
Site 17	90579	37.25° N, 6.50° E	8.06

Sites	Nombre de mesures (toutes les 3h)	Coordonnées géographiques	Distance entre le site et le trait de côte (km)
Site 18	90580	37.25° N, 7.25 ° E	15.61
Site 19	90558	37.00° N, 8.00° E	15.71
Site 20	90576	37.25° N, 8. 50° E	35.05

2. Méthodologie

Cette étude s'inscrit dans une perspective de production d'hydrogène vert et d'analyse de faisabilité technico-économique, afin de déterminer sa viabilité commerciale à des coûts compétitifs. Notre méthodologie de recherche est structurée et résumée dans les schémas suivants (**Figure 7**) puis détaillée juste après :

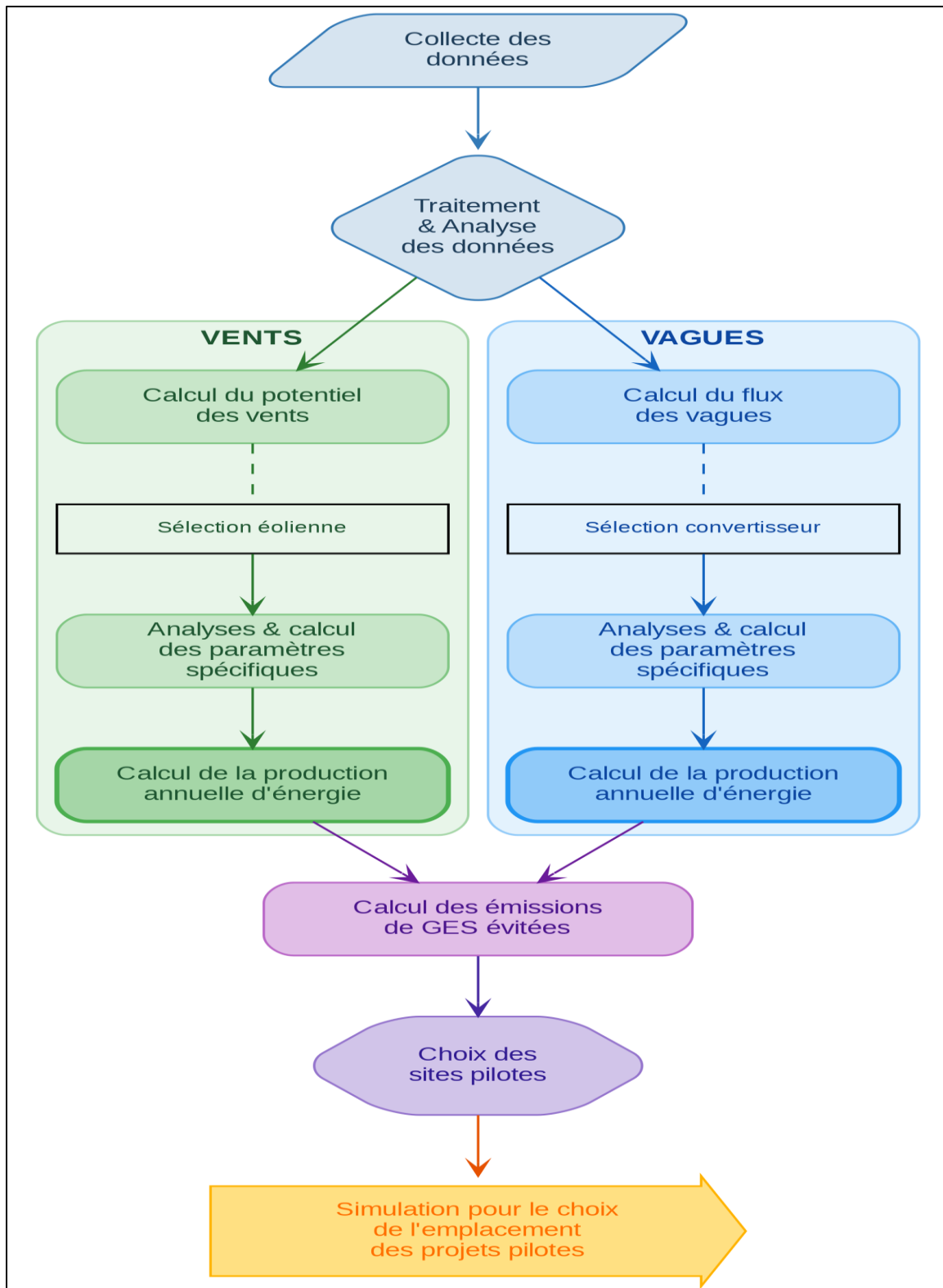


Figure 7. Démarche méthodologique pour l'analyse du potentiel énergétique (éolien et houlomoteur) du littoral algérien.

2.1. Collecte des données

Les données du vent et des vagues, couvrant la période du 1er janvier 1992 au 31 décembre 2022, ont été obtenues à partir du site **www.waveclimate.com**, service fourni par **InfoPlaza**. L'ensemble des données mobilisées pour les 20 sites d'étude comprend un total de 1 811 444 points de mesure voir **Tableau 5**.

Ces données ont été téléchargées au format CSV comprennent des mesures du vent et vagues (Vitesse et direction du vent à 10 m (u_{10} , u_{10d}) ; Hauteur significative et direction des vagues (H_s , H_{sd}), Périodes des vagues (T_z , T_m , T_p).

Enregistrées à intervalles réguliers de trois heures. **Figure 8** illustre l'organisation de ces métadonnées.

Year	Month	Day	Hour	u10	u10d	Hs	Hsd	Tz	Tm	Tp	Hs_sea	Hsd_sea	Tz_sea	Tm_sea	Tp_sea	Hs_swl	Hsd_swl	Tz_swl	Tm_swl	Tp_swl
1992	01	01	00	1.4	98	0.31	36	5.82	6.18	7.73	0.01	999	999	999	999	0.31	36	5.82	6.18	7.73
1992	01	01	03	0.8	96	0.28	36	5.78	6.11	7.07	0.01	999	999	999	999	0.28	36	5.78	6.11	7.07
1992	01	01	06	7.8	96	0.75	39	6.78	6.11	7.11	0.06	71	6.73	6.76	6.67	0.74	39	6.04	6.73	7.11

Figure 8. Présentation des données brutes issues de WaveClimate .

2.2. Traitement des données

Le prétraitement des données a été réalisé à l'aide de l'outil **Microsoft POWER QUERY** , permettant d'automatiser les opérations de nettoyage et de transformation pour des grand volumes de données.

Dans un premier temps, les variables non pertinentes pour l'analyse ont été supprimées

(T_z , Hs_sea , Hsd_sea , Tz_sea , Tm_sea , Tp_sea , Hsd_swl , Tz_swl , Tm_swl , Tp_swl).

Ensuite, un processus de filtrage a été appliqué afin éliminer toutes les lignes contenant des valeurs manquantes codées (999) pour avoir au final une base de données fiable et prête pour les analyses ultérieures.

2.3. Analyse des données

2.3.1. Analyse du Vent

2.3.1.1. Vitesse moyenne du vent (m/s) :

Étant donné que *waveclimate* fournit les données de vent uniquement à une hauteur de **10 m**, alors que la hauteur d'installation des éoliennes est toujours supérieure à cette hauteur.

Comme par ailleurs, la vitesse du vent augmente avec l'altitude du fait de l'existence de la couche limite atmosphérique [104], il est nécessaire d'estimer la vitesse du vent à la hauteur du moyeu de **150 m** pour notre étude.

En utilisant la **loi de puissance (Éq.1)**, la vitesse du vent est extrapolée à une hauteur de 150 m [107] :

$$V = u_{10} \cdot \left(\frac{z_{150}}{z_{10}} \right)^{\alpha} \quad (\text{Éq. 1})$$

où **u_{10}** est la vitesse du vent à la hauteur de référence de 10 m (**z_{10}**) et **α** est le coefficient de frottement, supposé égal à 0,1 en milieu marin (surface d'eau libre) [107,108].

À partir des vitesses extrapolées à 150 m, une analyse détaillée du régime éolien a été réalisée. D'une part, des roses des vents ont été établies à l'aide d'un script Python développé à cet effet, afin de visualiser la distribution directionnelle des vents et d'identifier les directions dominantes ainsi que leurs fréquences d'occurrence. Les roses des vents, construites à partir de l'analyse de la direction et de la fréquence du vent divisée en **16 secteurs de 22,5°** chacun, révèle une répartition hétérogène des régimes éoliens le long du littoral algérien (**Figure 9**).

La densité de la puissance éolienne, calculée à la base de la vitesse du vent à la hauteur de 150 m, affiche une répartition graduelle le long de la côte algérienne. En effet, la région ouest du littoral (S1 à S6) enregistre des vents de direction NNE–NE, avec des vitesses qui varient entre 2 m/s et 8 m/s, ce qui correspond à une DPE de 270 à 500 W/m². Les sites S3 et S4, proches d'Oran, se distinguent par une fréquence directionnelle de 16,6 % sur l'axe OSO–ENE, avec un secteur

dominant chargé en vents supérieurs à 8 m/s, faisant de cette zone les profils les plus énergétiques de la région ouest.

La zone centrale (S7 à S14) quant à elle affiche des vitesses de vent qui sont généralement plus fortes que celles de la région ouest. Elle est caractérisée par des vents de direction NE–ENE, avec des vitesses qui varient entre 4 m/s et 12 m/s, ce qui correspond à une DPE de 500 à 602 W/m². Le site S12 se démarque par un secteur ENE exceptionnellement allongé, le plus directif de l'ensemble du littoral, tandis que le site S8 est exposé à des rafales multidirectionnelles dépassant fréquemment 12 m/s.

La région est de la côte algérienne (S15 à S20) affiche une DPE qui varie entre 272 et 480 W/m². Les vents dans cette zone proviennent de la direction Ouest, avec des vitesses qui varient entre 3 m/s et 9 m/s. Les sites S17 et S18, à proximité d'Annaba, présentent les profils les mieux structurés avec une fréquence directionnelle atteignant 14,2 % pour S18, tandis que le site S15, avec une rose quasi-isotrope et une fréquence maximale de seulement 8,2 %, constitue le profil le moins favorable à une valorisation éolienne ciblée.

Ces résultats montrent que les sites S3, S4 et S12 ressortent comme les plus prometteurs de l'ensemble du littoral, réunissant les trois critères essentiels à une valorisation éolienne efficace : une direction dominante bien définie, une fréquence directionnelle élevée et une concentration énergétique significative dans les classes de vitesse supérieures. À l'opposé, les sites S13, S14 et S15, présentant des roses isotropes ou une dissociation entre direction dominante en fréquence et direction des vents les plus énergétiques, apparaissent moins adaptés.

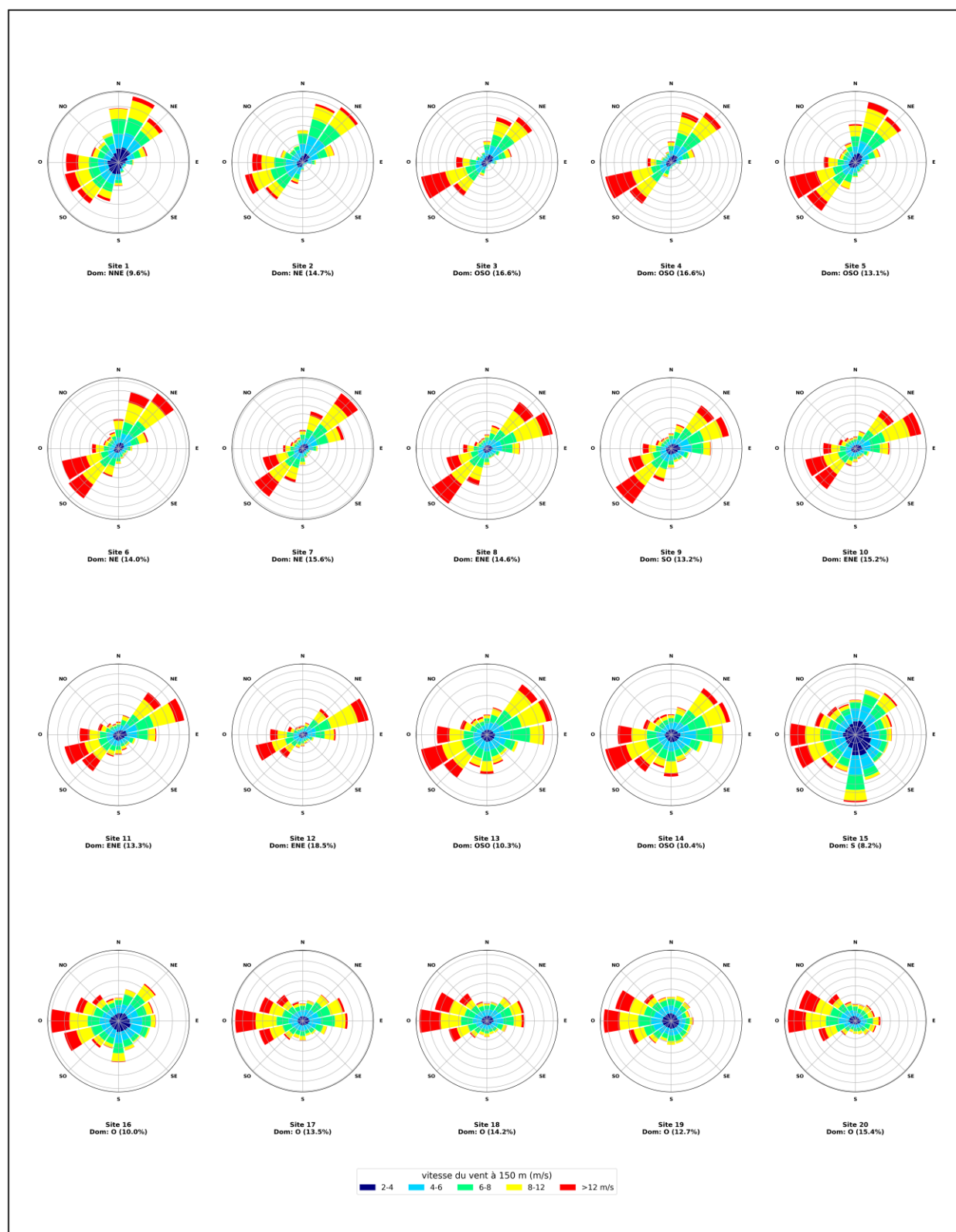


Figure 9. Roses des vents à 150 m (au-dessus du niveau moyen de la mer) des sites étudiés.

2.3.1.2. Fonction de Weibull

La distribution de Weibull, telle que présentée dans (Éq.2), a pour objectif de modéliser statistiquement la distribution des vitesses de vent sur un site donné. Grâce à sa flexibilité (paramètres de forme k et d'échelle c), elle s'adapte aux conditions locales et permet ainsi une évaluation fiable du potentiel éolien exploitable [109].

$$F(v) = \frac{KpV^{Kp-1}}{Cp^{Kp}} e^{-(\frac{v}{Cp})^{Kp}} \quad (\text{Éq. 2})$$

(v): la vitesse du vent, tandis que (F) correspond à la fonction de probabilité.

(Kp): (sans dimension) et (Cp) en (**m/s**) caractérisent respectivement la forme et l'échelle de la distribution.

Une augmentation du paramètre (Kp) rend la fonction (F) plus pointue, tandis qu'une diminution de (Kp) la rend plus aplatie.

Le paramètre (Cp), quant à lui, détermine les valeurs de la vitesse du vent correspondant aux points caractéristiques de la distribution (notamment les points d'inflexion), et est souvent appelé paramètre d'échelle.

Il existe plusieurs méthodes analytiques et empiriques pour les calculer [110,111].

Dans notre étude, nous appliquons la méthode de Justus (J.M) :

$$Kp = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1.086} \quad (\text{Éq. 3})$$

(σ) : l'écart type de la vitesse du vent ; (v) : la vitesse moyenne du vent.

$$Cp = \frac{v}{\Gamma\left(1+\frac{1}{Kp}\right)} \quad (\text{Éq. 4})$$

(Γ) : distribution et la fonction gamma.

Dans le cadre de cette étude, les paramètres de Weibull ont été calculés pour l'ensemble des 20 sites sélectionnés et regroupés dans le **Tableau 5**. Par ailleurs, la distribution de Weibull réalisée par un script sous Python est illustrée dans la **Figure 10**.

Les paramètres de la distribution de Weibull, calculés à la base des séries temporelles de vent à la hauteur de 150 m, affichent des valeurs contrastées le long de la côte algérienne.

En effet, la région ouest du littoral (S1 à S6) enregistre des facteurs d'échelle c qui varient entre 5,85 m/s (S1) et 8,82 m/s (S6), avec des facteurs de forme k compris entre 1,44 et 1,97, ce qui correspond à un potentiel éolien allant de faible à bon. La zone centrale (S7 à S14) quant à elle affiche des facteurs d'échelle c qui sont généralement plus élevés que ceux de la région ouest. Elle est caractérisée par des valeurs c comprises entre 8,04 m/s (S14) et 8,98 m/s (S8), avec des facteurs de forme k compris entre 1,80 et 2,14, ce qui correspond au potentiel éolien le plus élevé de l'ensemble du littoral. La région est du littoral algérien (S15 à S20) affiche des facteurs d'échelle c qui varient entre 5,99 m/s (S15) et 8,26 m/s (S18), avec des facteurs de forme k compris entre 1,53 et 1,99. Ces résultats montrent que la zone centrale du littoral algérien (S7 à S14) présente les meilleures opportunités d'exploitation de l'énergie éolienne offshore, avec les sites S8, S10 et S12 qui ressortent comme les plus prometteurs, réunissant à la fois un facteur d'échelle c élevé et un facteur de forme k proche de 2, traduisant une distribution du vent stable et favorable au fonctionnement optimal des turbines.

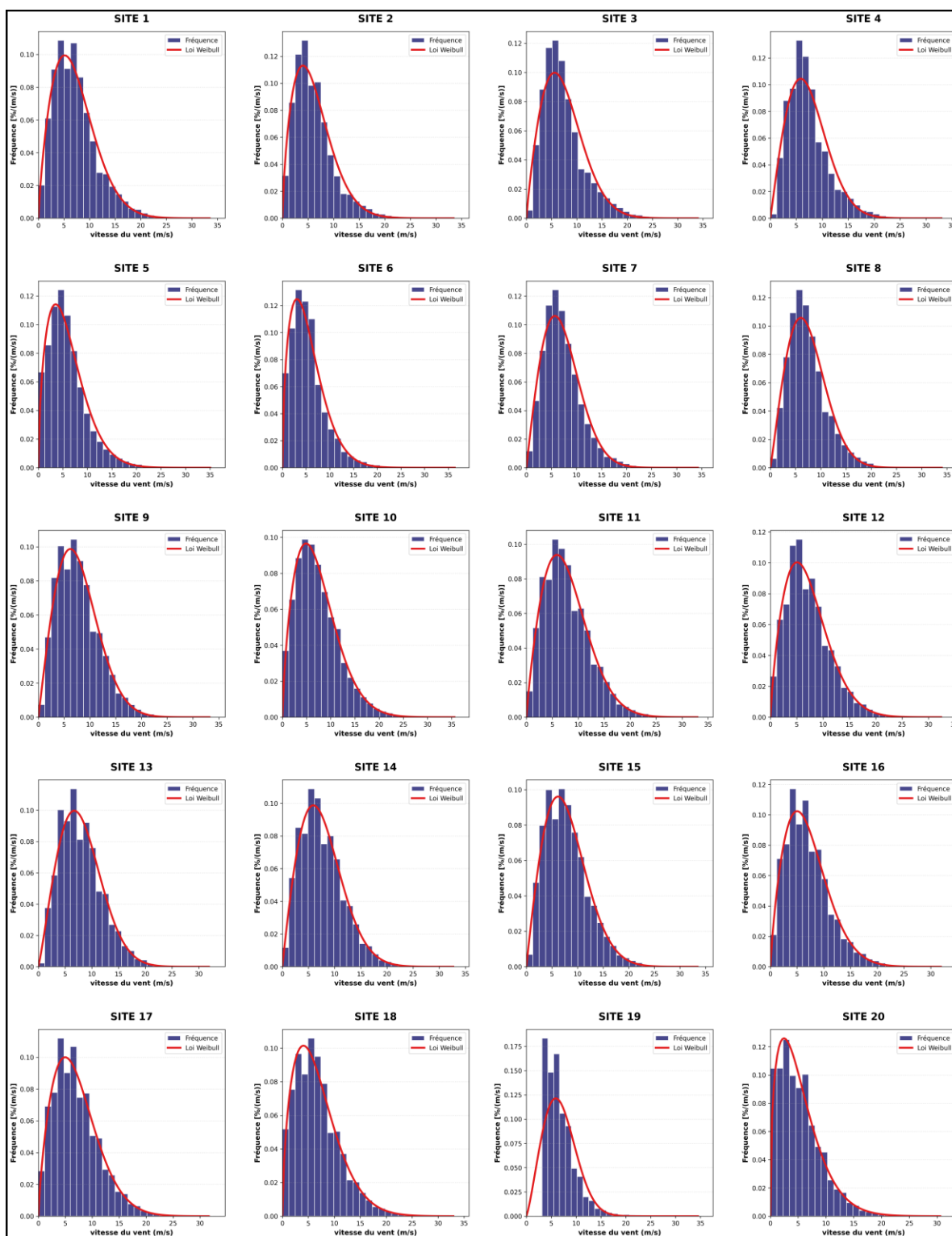


Figure 10. Distribution de Weibull à 150 m (au-dessus du niveau moyen de la mer) des sites étudiés.

2.3.1.3. La densité de puissance et du potentiel énergétique éolien (W/m²)

La technologie aérodynamique permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique via une éolienne. La performance d'un site est évaluée par la densité de puissance surfacique (PA). En utilisant la formule de la densité de puissance (**Éq. 5**), celle-ci est calculée en fonction de la densité de l'air ($\rho \approx 1,225 \text{ kg/m}^3$) et de la vitesse du vent (V). Sa formule est définie comme suit : [112]

$$P = \frac{1}{2} \rho a V^3 \quad (\text{Éq.5})$$

La répartition spatiale de la densité de puissance et du potentiel énergétique éolien pour l'ensemble des 20 sites a été cartographiée à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). Cette cartographie a été établie à l'échelle annuelle pour une vision globale du potentiel moyen

(Figure 11).

La densité de puissance éolienne (DPE en W/m²), calculée à partir des données de vent à 150 m de hauteur, présente une variabilité spatiale marquée le long du littoral algérien. La région ouest du littoral (S1 à S6) enregistre une DPE qui varie entre 270 et 500 W/m², avec un minimum local à l'extrême ouest (S1) avant une remontée progressive vers des valeurs plus élevées à mesure que l'on progresse vers l'Est en direction d'Oran. La zone centrale (S7 à S14) quant à elle affiche une DPE qui est généralement plus élevée que celle de la région ouest. Elle est caractérisée par les valeurs les plus fortes de l'ensemble du littoral, comprises entre 500 et 602 W/m², avec un pic intense bien marqué entre S8 et S10. La région est du littoral algérien (S15 à S20) affiche une DPE qui varie entre 272 et 480 W/m², avec un creux prononcé autour de S16 et S19, représentant les valeurs les plus faibles de l'ensemble du littoral. Ces résultats montrent que la zone centrale du littoral algérien (S7 à S14) présente les meilleures opportunités d'exploitation de l'énergie éolienne offshore, concentrant le potentiel éolien le plus élevé avec des densités de puissance atteignant 602 W/m².

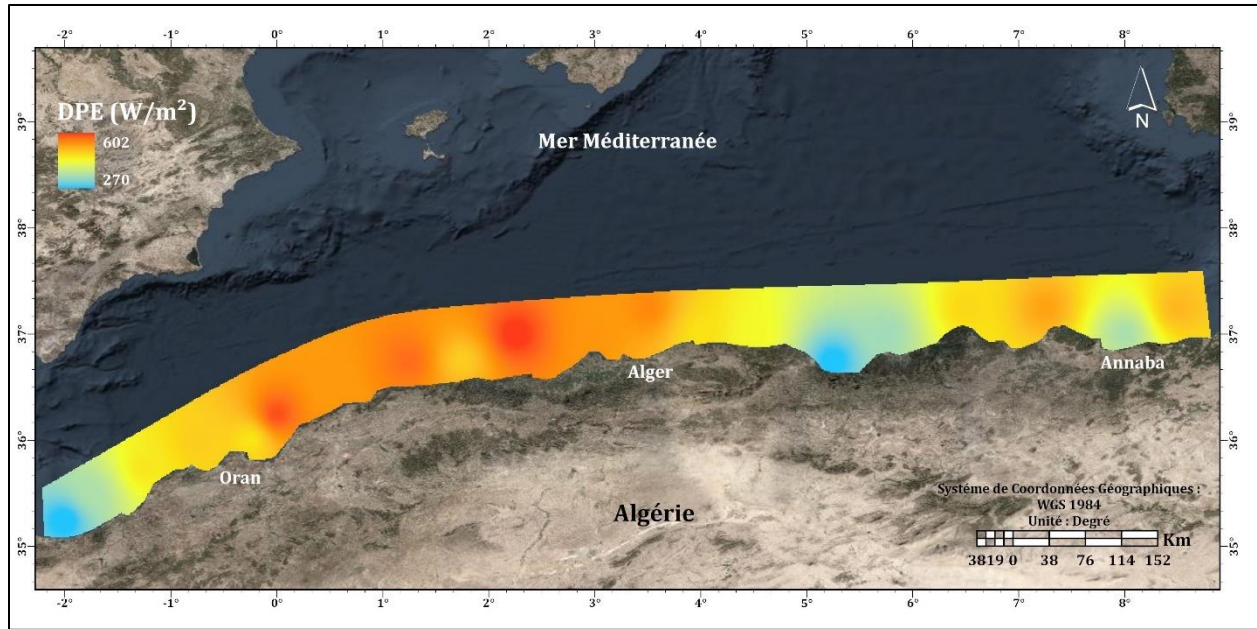


Figure 11. Cartographie à l'échelle annuelle du potentiel moyen énergétique éolien offshore moyen à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG).

2.3.2. Analyse des Vagues

Pour une évaluation quantitative des ressources en énergie houlomotrice le long de la côte algérienne, une analyse détaillée a été réalisée au niveau des 20 sites .

Des roses des vagues ont été construites pour les 20 sites à partir de séries temporelles de hauteur significative (H_s) et de direction de houle générées à l'aide d'un script Python.

La ressource houlomotrice, analysée sur la base des roses des vagues **Figure 12**, affiche une répartition variable le long de la côte algérienne.

La première région (S1 à S5) enregistre des houles de direction prédominante NNE avec des fréquences qui varient entre 36,4% et 47,3% ce qui correspond à un régime peu énergétique avec des hauteurs significative majoritairement inférieur à 2 m.

La zone centrale (S6 à S15) affiche une transition progressive vers des directions NE puis N avec des hauteurs de houle qui commencent à de diversifier. Elle est caractérisée par des fréquences comprises entre 28,7 % et 36,6 %, présentant une plus grande variabilité du régime (notamment au site S11) et une contribution croissante des classes de 2 à 3 m (sites S12 à S15).

La région la plus énergétique de la côte algérienne (Site S16 à Site S20) affiche des hauteurs significatives atteignant localement 3 à 4 m et au-delà. Les houles dans cette zone proviennent des directions NNO à NO avec des fréquences allant de 21,4 % à 30,5 %.

Ces résultats montrent que cette dernière zone (de S16 à S20) présente une opportunité d'exploitation des énergies houlomotrices offshore particulièrement prometteuse, s'affirmant comme la zone la plus riche en ressources du littoral.

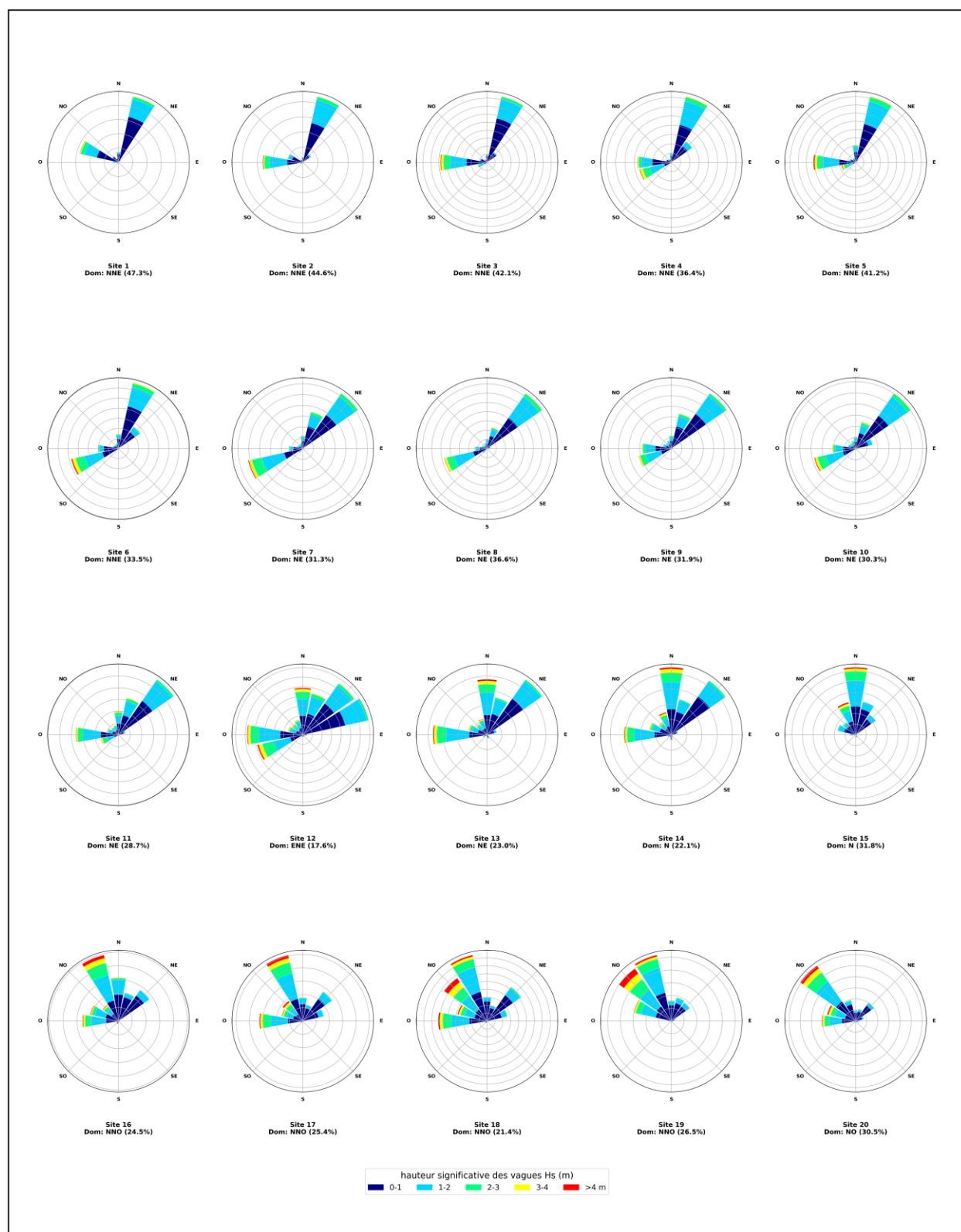


Figure 12. Roses des vagues des 20 sites étudiés.

2.3.3. Mesures de variabilité

Le calcul de la variabilité temporelle des énergies renouvelables constitue une question particulièrement importante. Pour quantifier les fluctuations de la production, notre étude mobilise trois indicateurs complémentaires :

Le coefficient de variation (CoV) ; L'indice de variabilité saisonnière (SVI) et variabilité mensuelle (MV) .

- le **coefficient de variation (CoV)** proposé par Cornett [113] défini comme l'écart-type (σ_p) normalisé par la puissance moyenne de la ressource (P_w). Ce paramètre permet d'identifier les zones potentielles caractérisées par une ressource en énergie des vagues significative associée à la plus faible variation [113,114]

$$COV = \frac{\sigma_p}{P_w} \quad (\text{Éq. 6})$$

Pour l'évaluation de la variabilité mensuelle (MV) et saisonnière (SV) [113], nous utilisons également deux indices de variabilité de la ressource en énergie des vagues, définis comme suit :

$$MV = \frac{P_{Mmax} - P_{Mmin}}{P_{An}} \quad (\text{Éq. 7})$$

$$SV = \frac{P_{Smax} - P_{Smin}}{P_{An}} \quad (\text{Éq. 8})$$

(P_{Mmax})et (P_{Mmin}) représentent respectivement la puissance moyenne des vagues du mois le plus énergétique et du mois le moins énergétique. De même, (P_{Smax})et (P_{Smin})correspondent respectivement à la puissance moyenne des vagues de la saison la plus énergétique et de la saison la moins énergétique, tandis que (P_{An})désigne la puissance moyenne annuelle des vagues.

Ces trois indices ont été calculés pour l'ensemble des 20 sites à l'aide d'un script Python développé à cet effet. Les valeurs obtenues sont regroupées dans le Tableau 4, tandis que l'histogramme comparatif (**Figure 13**) offre une visualisation simultanée des trois indices pour l'ensemble des sites étudiés.

La variabilité de la ressource houlomotrice, analysée à travers les indices CoV, MV et SV affiche une répartition contrastée le long de la côte algérienne :

La région Ouest du pays (S1 à S10) enregistre une prédominance systématique du CoV avec des valeurs oscillantes entre 1,6 et 2,1 ce qui correspond à une variabilité interannuelle critique. Tandis que, la saisonnalité (MV et SV) y reste modérée avec des indices compris entre 0,6 et 1,2.

La zone centrale (S11 à S15) quant à elle affiche des indices de saisonnalité qui sont généralement plus élevés que ceux de la région Ouest. Elle est caractérisée par une progression nette des barres MV et SV avec des valeurs qui varient entre 1,1 et 1,4 traduisant une transition visuelle vers un régime de production plus concentré.

La région Est de la côte algérienne affiche une saisonnalité maximale avec des indices MV et SV qui varient entre 1,4 et 1,7. La variabilité interannuelle (CoV) dans cette zone atteint également ses valeurs les plus hautes, oscillant entre 2,1 et 2,3 notamment vers les derniers sites. Ces résultats montrent que c'est la région Est qui présente la plus forte saisonnalité, constituant ainsi le principal facteur de différenciation pour les stratégies d'exploitation de la ressource le long du littoral.

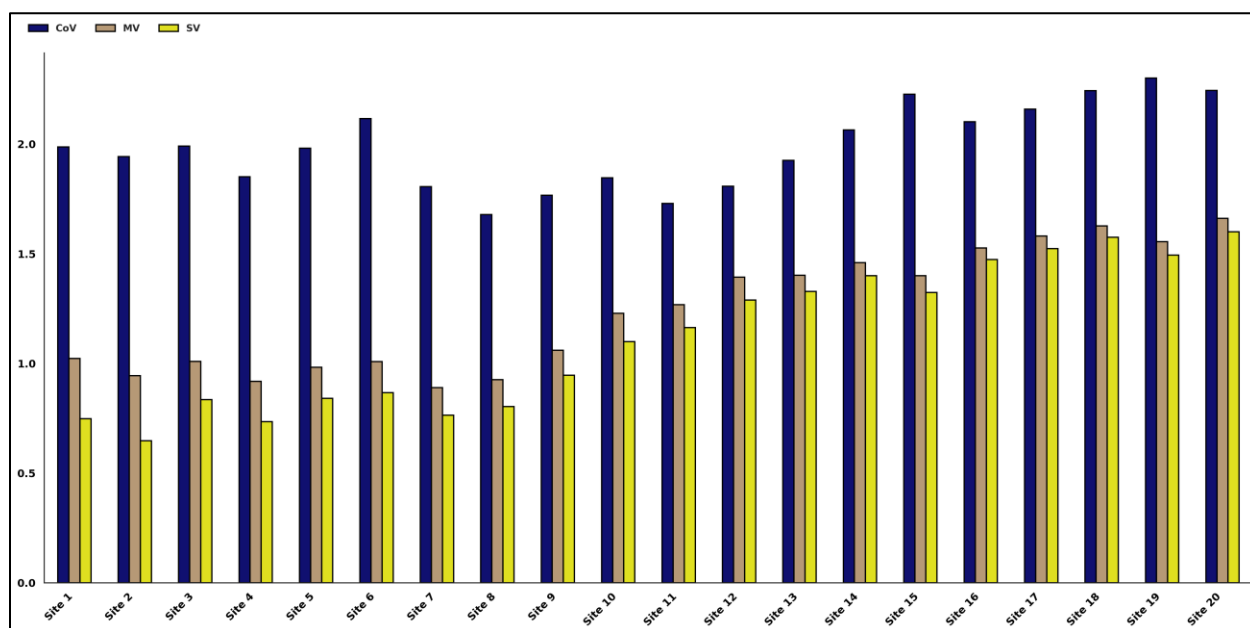


Figure 13. Distribution des indices de variabilité (CoV), de mensualité (MV) et de saisonnalité (SV) de la ressource houlomotrice pour les 20 sites étudiés.

2.3.4. Potentiel énergétique des vagues

À l'aide de la théorie des vagues linéaires, le flux de puissance des vagues (puissance par unité de largeur de crête, kW/m) a été calculé comme suit [115,116]

$$P_W = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (\text{Éq. 9})$$

ρ : la densité de l'eau (1025 kg/m³)

g : l'accélération gravitaire (9.81 m/s²)

H_s : la hauteur significative des vagues

T_e : est la période de l'énergie des vagues et afin de simplifier les calculs, on a utilisé la durée de crête (T_p) en appliquant la relation [117]

$$T_e = 0.9 T_p \quad (\text{Éq. 10})$$

Tout comme pour l'analyse éolienne, la répartition spatiale de ce potentiel houlomoteur sur les 20 sites a été cartographiée et illustrée par **Figure 14**.

Le flux de puissance houlomotrice (FPH), calculé le long du littoral algérien, affiche une répartition graduelle d'Ouest vers Est (Figure) :

La région ouest (S1 à S6) enregistre les valeurs les plus faibles de la ressource avec un FPH qui avoisine les 3,7 Kw/m, ce qui correspond à la zone la moins énergétique du littoral.

La zone centrale (S7 à S14) quant à elle affiche des puissances houlomotrices qui sont généralement plus fortes que celles de la région Ouest. Elle est caractérisée par une transition progressive marquée par une augmentation continue des valeurs de flux énergétique à mesure que l'on progresse vers l'Est.

La région Est de la côte algérienne affiche un FPH qui atteint ses niveaux maximaux, culminant à environ 13 KW/m. Les ressources dans cette zone, particulièrement concentrées autour d'Annaba (S15 à S20) confirment le caractère hautement énergétique de cette portion du littoral. Ces résultats montrent que **la région orientale** du pays présente une opportunité d'exploitation des énergies houlomotrice offshore, s'affirmant comme le gisement le plus promoteur de la façade maritime algérienne.

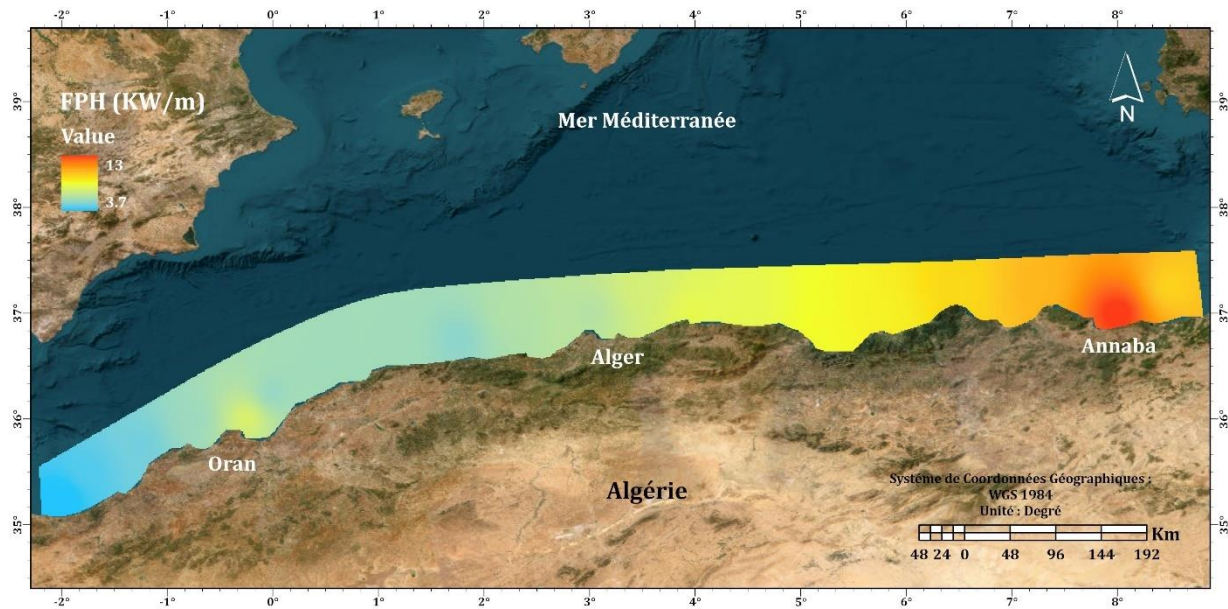


Figure 14. Flux de la puissance moyenne des vagues FPH (kW/m) aux sites étudiés.

Conclusion

L'analyse croisée des ressources éolienne et houlomotrice révèle une complémentarité géographique structurelle le long de la façade maritime algérienne. La zone centrale (S7–S14) concentre le meilleur potentiel éolien, avec des densités de puissance atteignant 602 W/m^2 , tandis que la région est (S15–S20), aux abords d'Annaba, s'affirme comme le gisement houlomoteur le plus prometteur, avec un flux de puissance culminant à 13 kW/m . Cette distribution spatiale différenciée n'est pas une contrainte, mais un atout stratégique : là où le vent faiblit, la houle prend le relais, et inversement, assurant une mutualisation naturelle des ressources propice à la stabilisation de la production.

Chapitre III

Sélection et dimensionnement des technologies de conversion

Introduction

Fort des résultats de caractérisation établis au chapitre précédent, ce chapitre franchit l'étape du dimensionnement technique du système hybride. Il présente et justifie le choix des deux équipements retenus, l'éolienne offshore Vestas V236-15 MW et le convertisseur houlomoteur CorPower Ocean C4 et évalue leurs performances réelles site par site. Les émissions de GES évitées ont été également calculées, sur la base du facteur d'émission du réseau électrique algérien, conformément aux méthodologies du Protocole de Kyoto et aux lignes directrices de l'AIE.

1. Sélection des dispositifs énergétiques pour l'analyse des performances

1.1. Sélection de l'éolienne :

La Vestas V236-15.0 MW est une éolienne offshore de grande taille **Figure 15**, parmi les plus puissantes, avec un diamètre de 236 m et une puissance de 15 MW, fonctionnant pour des vitesses de vent allant de 3 à 31 m/s. Elle est équipée d'un générateur à aimants permanents, de systèmes de contrôle avancés et d'une conception modulaire facilitant transport et installation. [118].

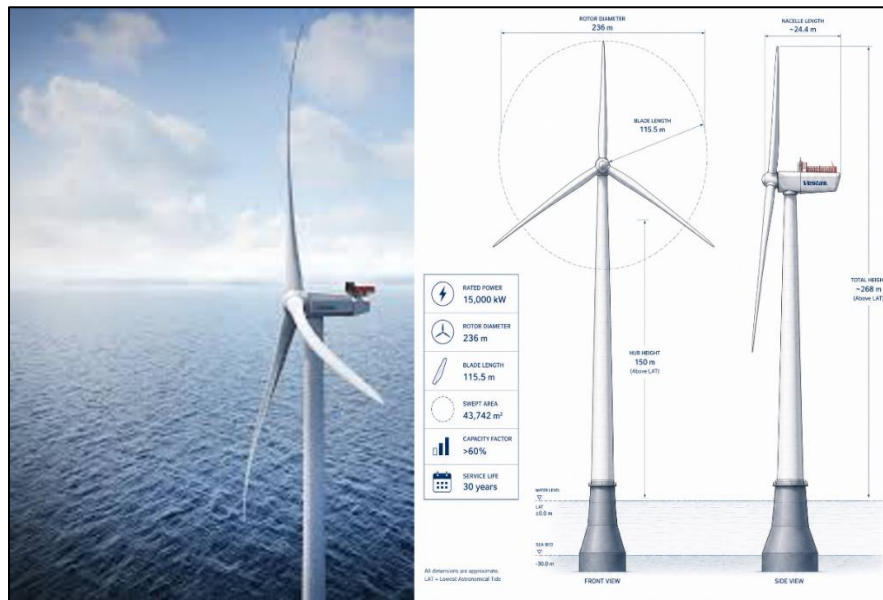


Figure 15. Technologie éolienne offshore Vestas V236-15 MW. [119]

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de l'éolienne Vestas (**Tableau 6**).

Tableau 6. Les caractéristiques de l'éolienne Vestas. (V236-15.0 MWTM, no date) [121]

Caractéristiques	Valeurs
Puissance nominale	15 000 kW
Vitesse de démarrage	3 m/s
Vitesse d'arrêt	31 m/s
Vitesse de démarrage	3 m/s
Vitesse nominale	11.1 m/s
Diamètre du rotor	236 m
Pales de	115,5 m
Surface balayée	43 742 m ²
Fréquence	50/60 Hz
Facteur de capacité supérieur à	60 %
Durée de vie de	30 ans

Donc, la Vestas V236-15.0 MW est la turbine idéale pour cette étude car elle optimise l'exploitation du gisement éolien algérien. Sa stabilité face aux variations de vitesse sur nos 20 sites garantit une évaluation précise et fiable du potentiel énergétique offshore de la région.

La puissance disponible s'exprime ainsi (W) :

$$P_{disponible} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (\text{Éq. 11})$$

P : la puissance (W).

ρ : la densité de l'air (1.23kg/m³).

A: la surface balayée par les rotors (m²).

V : la vitesse du vent (m/s).

Cette relation souligne l'importance cruciale de la vitesse du vent dans la production d'énergie éolienne. [122]

Capture ratio :

Ce ratio indique la fraction de la puissance aérodynamique totale qui est convertie en électricité. Il est comparé à la Limite de Betz ($C_p \text{ max} = 16/27 \approx 0,593$), qui est le maximum théorique de conversion pour une éolienne à axe horizontal. [123]

$$\eta = \frac{P_{\text{turbine}}}{P_{\text{disponible}}} \quad (\text{Éq. 12})$$

D'où :

$$P_{\text{turbine}} = \int_0^{\infty} P_{\text{turbine}}(v) \cdot f(v) dv \quad (\text{Éq. 13})$$

L'intégrale calcule le produit de la distribution de probabilité du vent (Weibull) et de la courbe de puissance de la turbine [124].

Le calcul de la puissance de la turbine est basé sur les caractéristiques de l'éolienne V236 (**Figure 16**) et dépend de la vitesse du vent. Il se décompose en plusieurs phases :

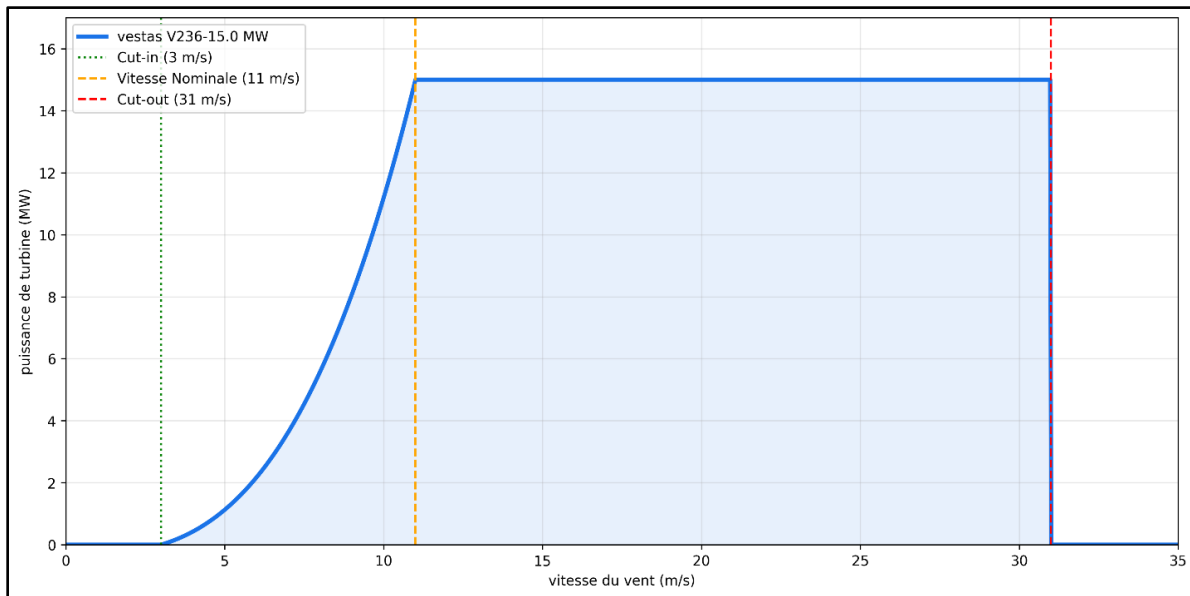


Figure 16. Les caractéristiques de l'éolienne Vestas V236.

Phase d'arrêt initial ($v < 3 \text{ m/s}$) : en dessous de la vitesse de démarrage (cut-in wind speed), la turbine ne produit pas d'énergie.

Phase de production cubique ($3 \leq v < 11.1 \text{ m/s}$): Dès que le seuil de 3 m/s est franchi, la turbine entre en production

Régime nominal ($11.1 \leq v \leq 31 \text{ m/s}$) : Une fois la vitesse nominale atteinte, la turbine stabilise sa production à sa capacité maximale de 15 000 KW (15 MW)

Sécurité et coupure ($v > 31 \text{ m/s}$) : Lorsque le vent dépasse la vitesse de coupure (Cut-out wind speed), l'éolienne s'arrête immédiatement par mesure de sécurité [125].

Production d'énergie par les éoliennes :

L'un des paramètres clés dans les études techniques et financières des projets éoliens est le **facteur de capacité**, noté (**Cf**) (%), fortement dépendant de la **vitesse du vent**.

Ce facteur est essentiel pour sélectionner l'éolienne la plus adaptée en fonction du site. Il représente la proportion de l'énergie effectivement produite par l'éolienne par rapport à la puissance maximale spécifiée par le fabricant. Son expression est donnée dans [126]

$$Cf = \frac{P_{turbine}}{P_{nominale}} \quad (\text{Éq. 14})$$

La production Annuelle d'Énergie (AEP) :

Le calcul de la production annuelle d'énergie (AEP) nécessite l'intégration de la puissance produite par l'éolienne sur la distribution des vitesses du vent [127].

$$AEP = P_{turbine} \times 8760 \text{ heures} \quad (\text{Éq. 15})$$

Heures annuelles de fonctionnement de la turbine Vestas V236-15 MW dans les conditions de vent exploitables (3–31 m/s) pour les 20 sites étudiés le long du littoral algérien :

Le nombre d'heures de fonctionnement annuel de la turbine a été estimé à partir des séries temporelles de vitesse du vent sur 30 ans. À l'aide d'un script Python développé à cet effet, le nombre d'enregistrements pour lesquels la vitesse du vent est comprise entre 3 m/s (vitesse de démarrage, *cut-in*) et 31 m/s (vitesse d'arrêt, *cut-out*) de la Vestas V236-15 MW a été comptabilisé sur l'ensemble de la période. Les données étant disponibles à un pas de temps de 3 heures, chaque enregistrement valide a été multiplié par 3 afin d'obtenir le nombre total d'heures de fonctionnement sur les 30 années. La division par 30 permet ensuite d'obtenir la moyenne annuelle

d'heures de production exploitable, soit le nombre d'heures par an durant lesquelles les conditions de vent permettent à la turbine de produire de l'électricité. Cette procédure a été appliquée de manière systématique et reproductible à l'ensemble des 20 sites étudiés.

Les résultats issus de l'application de cette procédure pour les 20 sites étudiés sont synthétisés dans le **Tableau 7**.

Tableau 7. Résultats de l'évaluation du potentiel éolien offshore par site.

Site	Kp	Cp (m/s)	V.Moy (m/s)	P (W/m ²)	H/an	P_Dispo (kW)	P_Turb (kW)	Cap.Ratio (%)	Cf (%)	AEP (MWh/an)
Site 1	1.4354	5.8460	5.3080	270.19	5921.30	11818.96	3187.56	26.9700	21.2500	27923.00
Site 2	2.3025	7.6500	6.7770	351.61	8759.10	15380.65	4776.20	31.0500	31.8400	41839.55
Site 3	1.6243	7.4970	6.7130	459.20	6979.30	20087.08	4826.76	24.0300	32.1800	42282.46
Site 4	1.7826	7.9660	7.0870	483.87	7369.30	21166.20	5297.97	25.0300	35.3200	46410.21
Site 5	1.7982	7.8370	6.9700	460.45	7393.60	20141.70	5149.77	25.5700	34.3300	45112.01
Site 6	1.9714	8.8240	7.8220	585.72	7841.60	25621.61	6266.72	24.4600	41.7800	54896.43
Site 7	1.9576	8.5320	7.5650	530.59	7716.70	23209.76	5934.51	25.5700	39.5600	51986.27
Site 8	2.1392	8.9780	7.9510	566.25	8066.60	24769.92	6487.61	26.1900	43.2500	56831.50
Site 9	1.8055	7.9990	7.1120	482.95	7440.80	21126.09	5331.22	25.2400	35.5400	46701.51
Site 10	1.8931	8.7880	7.7990	601.81	7710.90	26325.18	6207.77	23.5800	41.3900	54380.08
Site 11	1.7324	8.1230	7.2390	534.53	7367.40	23382.46	5476.41	23.4200	36.5100	47973.37
Site 12	2.0151	8.7010	7.7100	545.74	7844.30	23872.62	6137.09	25.7100	40.9100	53760.94
Site 13	2.0726	8.2750	7.3300	463.37	7914.00	20269.61	5634.91	27.8000	37.5700	49361.81
Site 14	1.9979	8.0440	7.1290	442.06	7780.90	19337.08	5358.23	27.7100	35.7200	46938.13
Site 15	1.5276	5.9960	5.4020	272.26	6371.20	11909.76	3241.07	27.2100	21.6100	28391.75
Site 16	1.5833	6.6250	5.9460	340.58	6754.50	14898.13	3890.07	26.1100	25.9300	34077.01
Site 17	1.9938	8.1950	7.2630	473.38	7910.50	20707.46	5540.87	26.7600	36.9400	48538.06
Site 18	1.8705	8.2630	7.3360	523.22	7792.90	22887.45	5624.22	24.5700	37.4900	49268.20
Site 19	1.6619	6.8430	6.1160	350.11	6966.90	15315.14	4075.33	26.6100	27.1700	35699.93
Site 20	1.7949	8.0630	7.1720	504.06	7495.30	22049.47	5404.94	24.5100	36.0300	47347.31

1.2. Sélection de convertisseur :

Le CorPower C4 est un convertisseur d'énergie houlomotrice de type absorbeur ponctuel, dont la conception s'inspire du principe de pompage du cœur humain (**Figure 17**) Une bouée de 9 m de diamètre et 19 m de hauteur, ancrée au fond marin à plus de 40 m de profondeur, oscille au rythme des vagues et actionne une pompe qui génère une différence de pression entraînant un générateur ; l'électricité produite est ensuite acheminée vers la côte via un câble sous-marin.

Au cœur du dispositif, la technologie brevetée **WaveSpring** (système pionnier de contrôle de phase) synchronise les mouvements de la bouée avec les vagues incidentes, amplifiant considérablement la capture énergétique et permettant au C4 de produire jusqu'à cinq fois plus d'énergie par tonne que les systèmes houlomoteurs conventionnels. Avec une puissance nominale de **300 kW**, un facteur de capacité de 40 à 60 % et une plage opérationnelle de 0,25 à 8 m de hauteur de vagues, le C4 intègre également un mécanisme de protection contre les tempêtes garantissant sa robustesse en conditions extrêmes. Modulaire, discret et disponible en continu (de jour comme de nuit, indépendamment des conditions météorologiques), il constitue un complément fiable aux énergies éolienne et solaire, offrant une voie compétitive vers une production d'électricité renouvelable à grande échelle. [128,129]

Grâce à l'ensemble de ces caractéristiques haute densité énergétique, robustesse, modularité et production continue, le CorPower C4 s'impose comme le convertisseur houlomoteur le plus adapté et le plus pertinent pour notre étude.

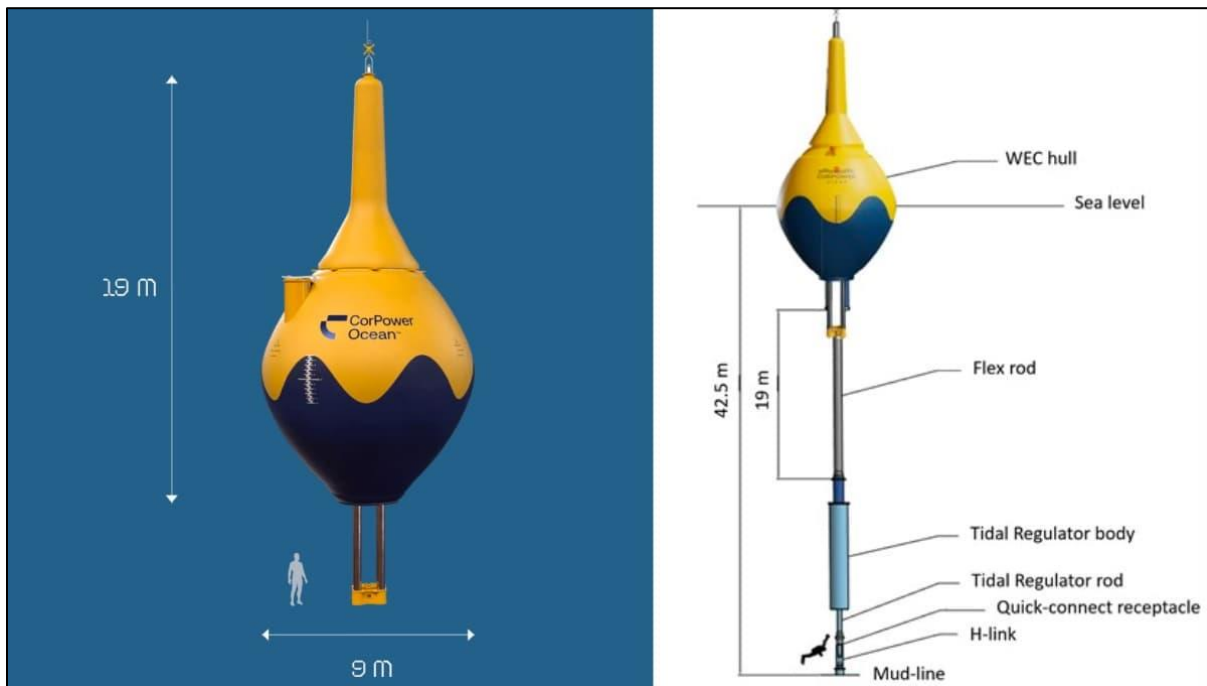


Figure 17. Convertisseur d'énergie des vagues CorPower Ocean [128].

La production Annuelle d'Énergie (AEP) :

La matrice de puissance fournie par CorPower Ocean **Figure 18** représente l'objectif de production énergétique fixé par l'entreprise à l'horizon 2030 (Safe Wave, 2023). Elle exprime la puissance générée par le convertisseur C4 en fonction des paramètres caractéristiques de l'état de mer, à savoir la hauteur significative des vagues (H_s) et la période énergétique. Tandis que

Figure 18 présente les matrices de puissance correspondant aux 20 sites étudiés, offrant ainsi une visualisation du potentiel de production pour chacun d'eux selon leurs conditions hydrodynamiques locales. **Le calcul de la Production Annuelle d'Énergie (AEP)** est obtenu en multipliant terme à terme la matrice de puissance de CorPower Ocean par la matrice de distribution des états de mer propre à chaque site.

			Tp (s)																				
			Te (s)																				
			2.8	3.9	5.0	6.1	7.2	8.3	9.4	10.6	11.7	12.8	13.9	15.0	16.1	17.2	18.3	19.4	20.6	21.7	22.8	23.9	
			2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	
Hs [m]	0.25	0	0.5	0.2	0.7	1.4	2.3	3.5	4.6	5.8	6.7	7.7	9.1	9.9	11.2	12.2	13.2	13.7	14.8	15.5	16.0	16.0	16.4
	0.75	0.5	1	2.0	5.7	11.7	19.3	28.2	36.1	42.7	48.3	55.1	61.1	64.7	71.9	72.9	74.4	78.3	76.6	79.0	77.4	78.0	77.3
	1.25	1	1.5	5.6	15.8	31.7	49.8	71.1	89.2	106.3	118.7	130.0	140.4	148.4	150.2	152.9	153.5	151.9	152.2	151.3	147.8	143.7	137.2
	1.75	1.5	2	10.7	30.0	60.3	96.6	132.0	167.3	186.6	212.0	225.9	236.8	243.9	242.9	243.5	241.0	236.5	228.0	223.7	215.4	212.0	203.9
	2.25	2	2.5	17.5	48.1	97.6	155.8	207.9	254.9	295.9	316.4	331.5	333.3	340.2	337.8	336.2	329.8	327.9	310.4	296.1	291.2	287.8	271.2
	2.75	2.5	3	0.0	72.9	142.9	223.9	298.6	359.9	398.4	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	394.3	383.6	373.0	347.5	336.1
	3.25	3	3.5	0.0	98.2	195.7	306.2	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
	3.75	3.5	4	0.0	0.0	254.4	389.9	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
	4.25	4	4.5	0.0	0.0	320.1	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	360.0
	4.75	4.5	5	0.0	0.0	0.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	320.0
	5.25	5	5.5	0.0	0.0	0.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	280.0
	5.75	5.5	6	0.0	0.0	0.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	240.0
	6.25	6	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	200.0
	6.75	6.5	7	0.0	0.0	0.0	0.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	160.0
	7.25	7	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	120.0
	7.75	7.5	8	0.0	0.0	0.0	0.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	200.0	80.0
8.25	8	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	320.0	160.0	40.0	
8.75	8.5	9	0.0	0.0	0.0	0.0	280.0	280.0	280.0	280.0	280.0	280.0	280.0	280.0	280.0	280.0	280.0	280.0	280.0	280.0	120.0	0.0	
9.25	9	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	240.0	240.0	240.0	240.0	240.0	240.0	240.0	240.0	240.0	240.0	240.0	240.0	240.0	240.0	80.0	0.0	
9.75	9.5	10	0.0	0.0	0.0	0.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	40.0	0.0	
10.25	10	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	0.0	0.0	
10.75	10.5	11	0.0	0.0	0.0	0.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	120.0	0.0	0.0	
11.25	11	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	0.0	0.0	
11.75	11.5	12	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	0.0	0.0	
12.25	12	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12.75	12.5	13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
13.25	13	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
13.75	13.5	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
14.25	14	14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
14.75	14.5	15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Figure 18. Matrice de puissance du HiWave-5 (fournie par CorPower dans le cadre du projet).



Figure 19. Matrices de distribution des états de mer (Hs, Te) pour les 20 sites étudiés.

Tableau 8. Paramètres houlomoteurs calculés par site.

Site	P_ann (kW/m)	CoV	MV	SV	Mois max	Saison max	Pe (kW)	Cf_V (%)	AEP_V (MWh/an)
Site 1	3.7800	1.9868	1.0226	0.7478	Mars	Hiver	46.8900	15.6300	410.72
Site 2	4.3400	1.9425	0.9448	0.6476	Mars	Hiver	50.4000	16.8000	441.55
Site 3	4.7100	1.9910	1.0098	0.8350	Fev	Hiver	53.9600	17.9900	472.70
Site 4	5.5300	1.8511	0.9181	0.7344	Mars	Hiver	61.9600	20.6500	542.78
Site 5	7.3700	1.9814	0.9829	0.8412	Janv	Hiver	78.2000	26.0700	685.02
Site 6	5.4400	2.1158	1.0083	0.8668	Janv	Hiver	59.1900	19.7300	518.52
Site 7	5.6300	1.8058	0.8902	0.7648	Janv	Hiver	63.4900	21.1600	556.16
Site 8	5.6500	1.6791	0.9263	0.8033	Janv	Hiver	65.7700	21.9200	576.17
Site 9	5.1700	1.7667	1.0598	0.9458	Janv	Hiver	61.4100	20.4700	537.99
Site 10	6.0900	1.8460	1.2290	1.0996	Janv	Hiver	68.4900	22.8300	600.01
Site 11	6.1700	1.7291	1.2679	1.1636	Janv	Hiver	72.4200	24.1400	634.40
Site 12	7.1900	1.8081	1.3932	1.2887	Janv	Hiver	78.4000	26.1300	686.81

Site	P _{ann} (kW/m)	CoV	MV	SV	Mois max	Saison max	Pe (kW)	Cf _V (%)	AEP _V (MWh/an)
Site 13	7.9100	1.9253	1.4017	1.3281	Janv	Hiver	86.1900	28.7300	755.03
Site 14	7.8700	2.0645	1.4598	1.3999	Janv	Hiver	83.6900	27.9000	733.17
Site 15	8.4800	2.2277	1.4002	1.3237	Fev	Hiver	89.2900	29.7600	782.16
Site 16	8.7200	2.1017	1.5262	1.4741	Fev	Hiver	89.5000	29.8300	784.03
Site 17	9.3900	2.1591	1.5814	1.5234	Fev	Hiver	89.5700	29.8600	784.65
Site 18	10.3000	2.2436	1.6271	1.5749	Fev	Hiver	91.8300	30.6100	804.45
Site 19	13.0600	2.3011	1.5549	1.4941	Fev.	Hiver	110.89	36.9600	971.41
Site 20	9.5600	2.2446	1.6616	1.5998	Dec.	Hiver	88.0900	29.3600	771.65

Conclusion

Le dimensionnement démontre que les technologies sélectionnées sont bien adaptées aux conditions spécifiques du littoral algérien. La Vestas V236, en particulier, tire pleinement parti des vents forts de la zone centrale, tandis que le CorPower C4 valorise efficacement la ressource houlomotrice de la zone est.

Chapitre IV

**Sélection et optimisation des sites
d'implantation du système hybride**

Introduction

Sur la base de l'analyse multicritère conduite sur les 20 sites offshore, ce chapitre franchit l'étape de la décision géographique en retenant deux sites pilotes : S12 et S18. Ce choix repose sur trois piliers complémentaires.

Le premier est la performance énergétique combinée offrant une complémentarité naturelle entre les deux sites. Le second pilier est la validation bathymétrique et hydrodynamique, appuyée sur des données haute résolution et des simulations couplées, qui confirment la faisabilité des fondations et caractérisent les contraintes hydrodynamiques locales pour les directions dominantes de chaque site. Le troisième pilier est la conformité réglementaire et environnementale.

Enfin, le chapitre quantifie les émissions de GES évitées sur la base du facteur d'émission du réseau algérien, le déploiement du système hybride permettrait d'éviter plusieurs dizaines de milliers de tonnes de CO₂ par an, renforçant l'argumentaire environnemental du projet.

1. Identification des sites pilotes optimaux pour le projet hybride éolien-houlomoteur

L'analyse comparative des résultats obtenus pour l'ensemble des 20 sites étudiés permet d'identifier les sites **12** et **18** comme les sites pilotes les plus appropriés pour l'implantation d'un projet hybride dédié à la production d'hydrogène vert. Ce choix repose sur une argumentation multicritère développée ci-après.

1.1 Performance énergétique

Les sites 12 et 18 présentent les meilleures performances énergétiques combinées de l'étude. Avec des AEP éoliens de 53760.94 MWh/an ($C_f=40.91\%$) et 49268.20 MWh/an ($C_f=37.49\%$) respectivement, les classant dans la catégorie des sites bon à excellents. Sur le plan houlomoteur le site 18 se distingue par un AEP de 804.45 MWh/an ($C_f=30.61\%$), légèrement supérieur au site 12 (686.81 MWh/an ; $C_f=26.13\%$), confirment sa meilleure aptitude à la composante houlomotrice du projet hybride.

1.2 Bathymétrie

Les données bathymétriques utilisées dans cette étude ont été fournies par les cartes bathymétriques numériques de Navionics. Ces données ont permis de représenter la topographie des fonds marins de la zone d'étude et ont été utilisées pour les analyses bathymétriques et la

modélisation. Ces données couvrent les deux sites retenus pour le projet pilote, à savoir le Site 12 et le Site 18.

Après conversion au format (XYZ), elles ont été intégrées dans le module Mesh Generator de MIKE Zero pour la génération du maillage triangulaire **Figure 22**. La densité du maillage a été ajustée sélectivement selon les zones d'intérêt, assurant un compromis entre précision spatiale et efficacité de calcul. Le domaine modélisé du Site 12 s'étend entre $3,53^{\circ}$ et $3,72^{\circ}$ de longitude Est et $36,79^{\circ}$ et $36,90^{\circ}$ de latitude Nord, avec des profondeurs variant de 1 à 70 m. Celui du Site 18 couvre une zone plus étendue, entre $6,82^{\circ}$ et $7,72^{\circ}$ de longitude Est et $36,88^{\circ}$ et $37,23^{\circ}$ de latitude Nord, avec des profondeurs allant de 50 à 200 m, reflétant un environnement offshore plus profond cohérent avec les hauteurs significatives de vagues élevées enregistrées sur ce site.

L'interpolation bathymétrique a été effectuée par la méthode du voisin le proche (DHI,2014).

Pour chaque site retenu, une carte bathymétrique est présentée afin d'illustrer la morphologie du fond marin et les gradients de profondeur de la zone d'implantation (**Figure 20** et **Figure 21**).

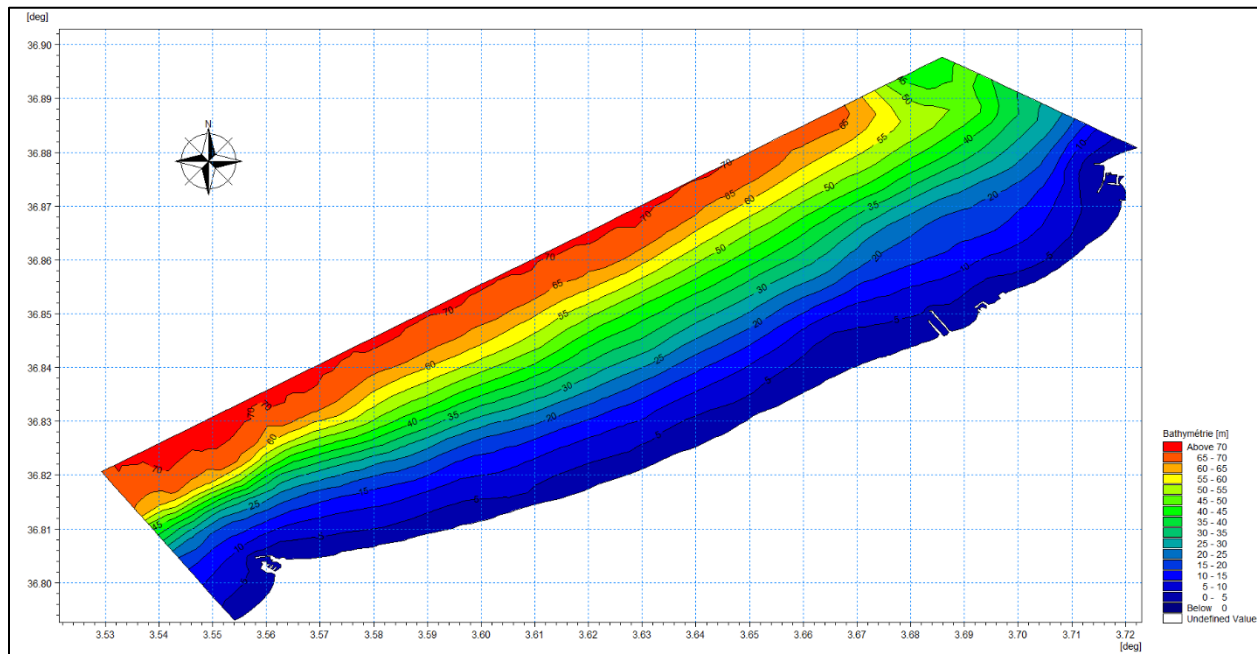


Figure 20. Bathymétrie de la zone de Boumerdès.

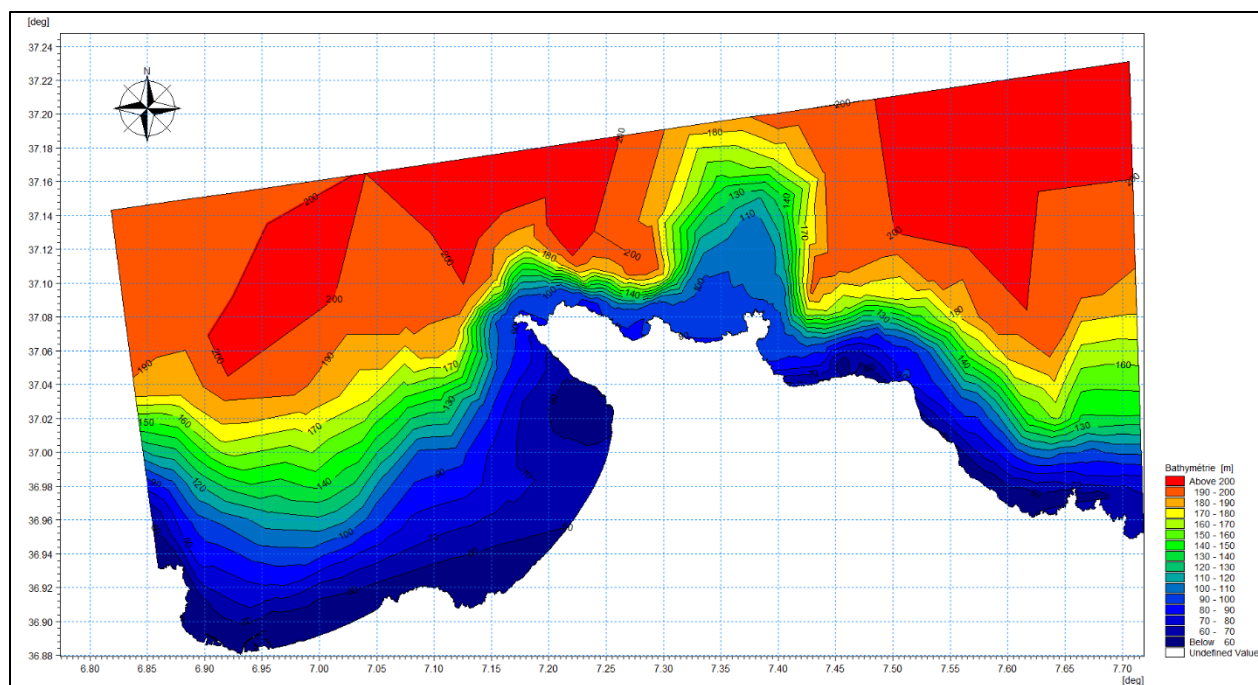
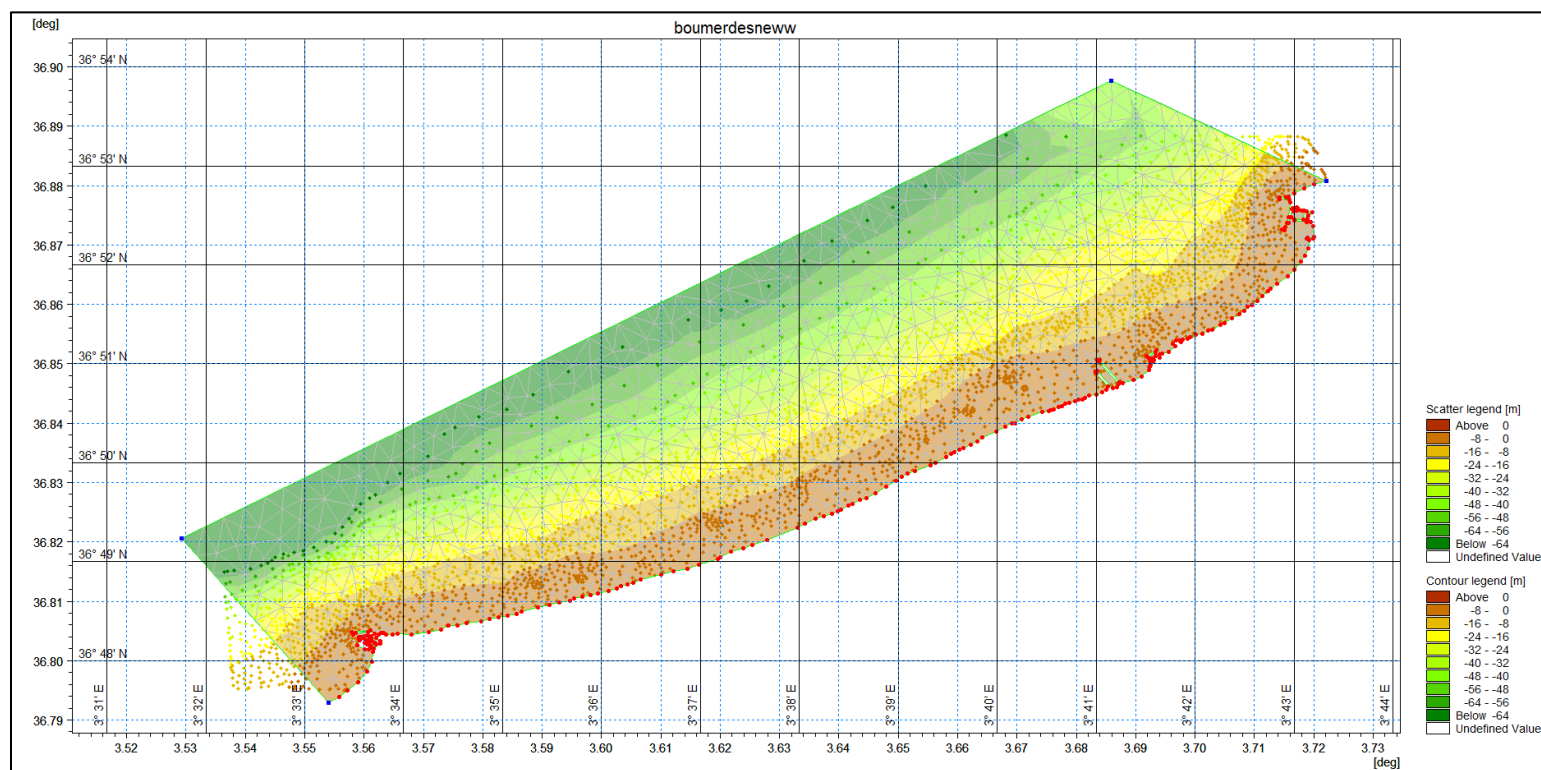


Figure 21. Bathymétrie de la zone de Skikda/Annaba.



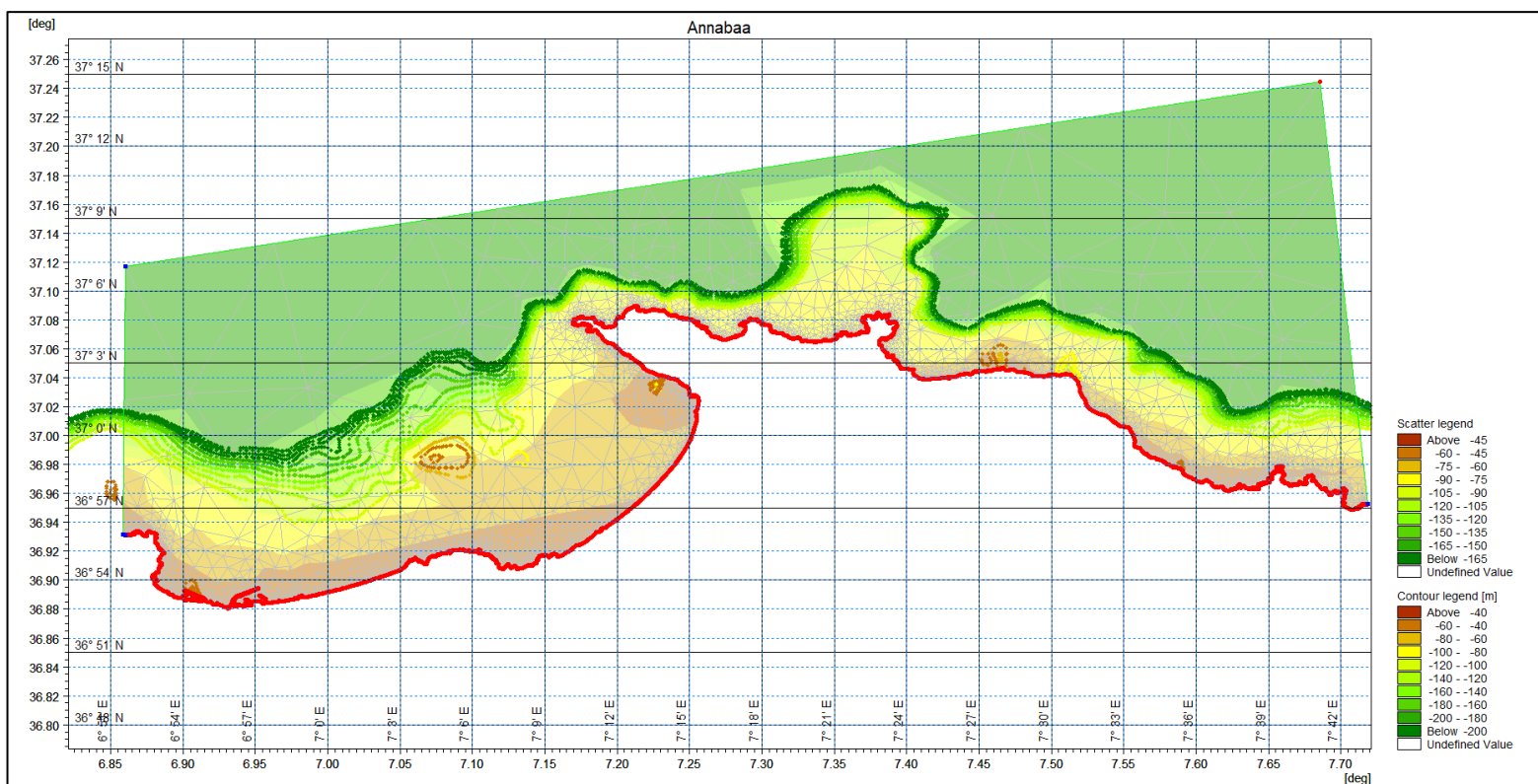


Figure 22. Maillages triangulaires utilisés pour la modélisation hydrodynamique des sites de Boumerdès (Site 12) et d'Annaba (Site 18).

1.3 Simulation hydrodynamique

La simulation hydrodynamique a été réalisée à l'aide du logiciel MIKE 21, en couplant le module de circulation (**HD**) et le module de propagation spectacle des vagues (**SW**). Cette approche couplée permet de représenter fidèlement les interactions entre le champ des courants et le champ des vagues, et d'obtenir une description complète de l'hydrodynamique locale dans les zones d'implantation.

Les simulations ont été conduites pour chacun des deux sites retenus (S12 et S18), en considérant les deux directions énergétiques dominantes identifiées lors de l'analyse climatologique : pour le Site 12, les directions **ENE** et **W** et pour le Site 18, les directions **W** et **NNW**.

Pour chaque direction et chaque site, les résultats sont restitués sous forme des cartes spatiales couvrant les variables suivantes : la puissance houlomotrice (kW/m), la hauteur significative des vagues (m), la vitesse des courants (m/s) et la direction des courants.

Ces sorties permettent d'évaluer conjointement les ressources énergétiques exploitable et les contraintes hydrodynamiques à prendre en compte pour le dimensionnement du système hybride.

La zone de Boumerdès (Site 12)

Vitesse du courant

L'examen de la **Figure 23** met en évidence une circulation superficielle modérée influencée par la direction du vent. Sous un forçage Est-Nord-Est (ENE) à droite, le domaine est dominé par des teintes de bleu clair, reflétant des vitesses résiduelles comprises entre 0,08 m/s et 0,16 m/s. Des zones d'accélération plus marquées apparaissent en bleu foncé au niveau de Cap Djinet, où la vitesse atteint des valeurs locales de l'ordre de 0,64 m/s à 0,80 m/s. Sous un forçage Ouest (W) à gauche, la dynamique s'intensifie globalement sur l'ensemble du bassin ; on observe une accélération généralisée illustrée par un bleu intermédiaire correspondant à des vitesses de 0,45 m/s à 0,75 m/s. Les pics de vitesse les plus élevés sont visibles en bleu très foncé à proximité des irrégularités côtières de Cap Djinet, atteignant environ 1,05 m/s à 1,20 m/s. Cette différence de magnitude entre les deux forçages suggère que la direction Ouest est le principal moteur de la dérive littorale dans ce secteur. Cette intensification s'explique par la configuration concave du littoral et la pente de la bathymétrie qui favorisent une canalisation des flux et un resserrement des lignes de courant sous l'effet des vents dominants d'Ouest.

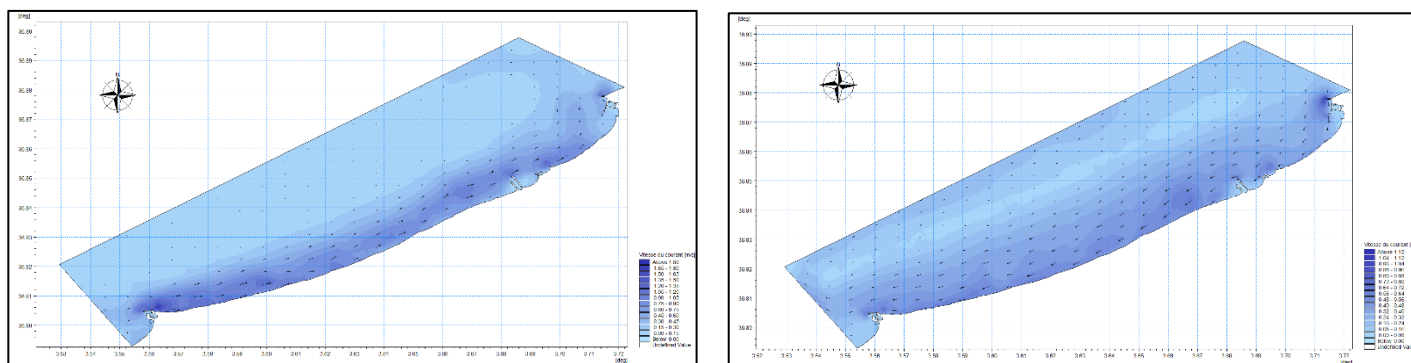


Figure 23. Les cartes de la vitesse des courants issues du module MIKE 21 HD – Zone de Boumerdès. ($H_s=5,65$ m, $T_p=12$ s).

Période de Pic des Vagues

Figure 24 illustre la transformation du spectre des fréquences de la houle, avec un gradient chromatique allant du bleu au rouge. Sous forçage ENE à droite, la carte est presque intégralement couverte de bleu foncé, indiquant des périodes homogènes situées entre 9,9 s et 10,1 s, avec de rares taches vertes près de Cap Djinet atteignant 10,6 s. Cette signature est typique d'une houle jeune générée localement. En revanche, le scénario Ouest (W) à gauche montre une transition vers des périodes plus longues, avec une dominance de teintes vert/cyan s'étendant de 12,15 s à 12,45 s sur une grande partie du bassin. Un point chaud en rouge est nettement visible à l'ouest de Zemmouri, marquant un maximum de 13,05 s à 13,20 s, ce qui indique l'arrivée de houles plus matures. Ces variations découlent principalement de la longueur du fetch qui est nettement plus importante pour les directions d'Ouest en Méditerranée, permettant le développement de houles de grande période, contrairement aux directions d'Est où le fetch est géographiquement limité.

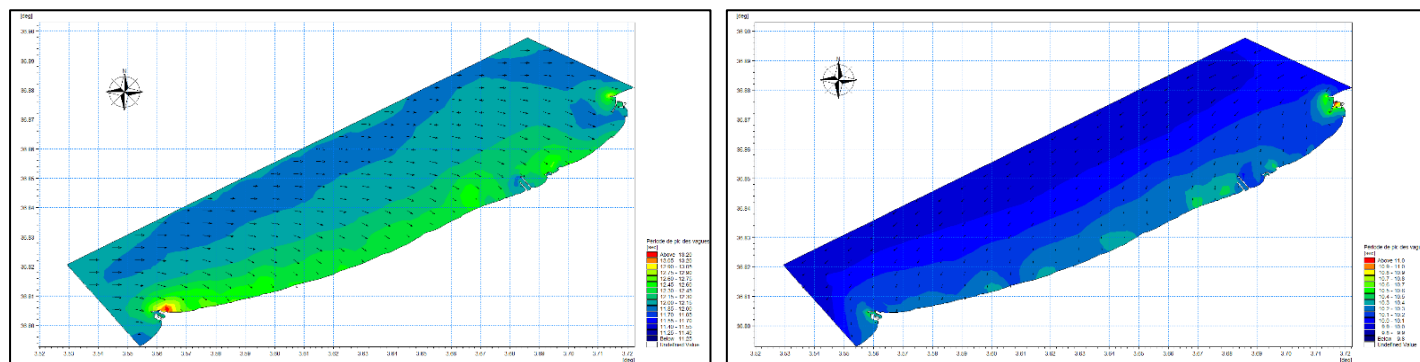


Figure 24. Les cartes de la période de pic (T_p) – Zone de Boumerdès ($H_s = 5,65$ m, $T_p = 12$ s) issues de la simulation spectrale des vagues (SW).

Hauteur Significative des Vagues

Figure 25 présente la morphologie de la surface marine, élément déterminant pour la stabilité du trait de côte. Sous forçage ENE à droite, les hauteurs significatives se situent majoritairement entre 1,6 m et 2,4 m (teintes vert/cyan), avec des zones jaunes/oranges au large atteignant 3,2 m à 4,0 m. Un maximum en rouge est visible à l'extrémité offshore est, dépassant 4,0 m. Le scénario Ouest (W) à gauche gauche est nettement plus sévère : le domaine central est dominé par des teintes jaunes ($\sim 3,2$ m à 4,0 m), tandis que les zones offshore affichent de l'orange et du rouge, indiquant

Des hauteurs supérieures à 4,8 m. La réduction de la hauteur de vague en approchant du rivage est universelle, mais elle est plus abrupte dans les secteurs à forte pente. Cette distribution est directement liée aux processus combinés de réfraction, de shoaling et de dissipation finale par déferlement, où l'énergie accumulée sur un long fetch d'Ouest se libère au contact des petits fonds de la zone de Boumerdès.

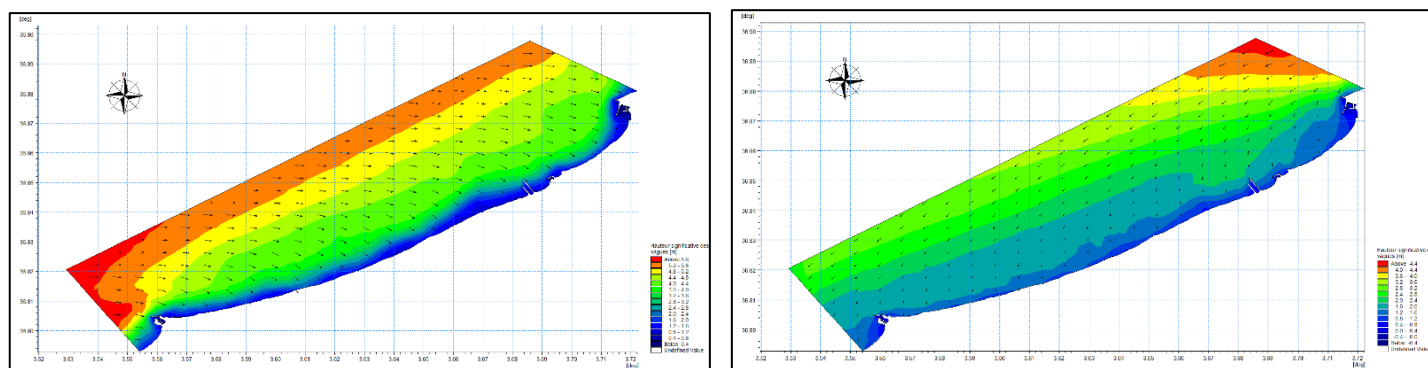


Figure 25. Les cartes de la hauteur significative des vagues (H_s) – Zone de Boumerdès ($H_s = 5,65$ m, $T_p = 12$ s) issues de la simulation spectrale des vagues (SW).

Puissance de la Houle

Figure 26 permet de quantifier le flux d'énergie incident. Pour le forçage ENE à droite, le potentiel énergétique est modéré ; la zone côtière est marquée par un bleu profond ($\sim 8-16$ kW/m), tandis que les secteurs au large passent au vert, jaune et orange ($\sim 56-80$ kW/m). Une zone de puissance maximale en rouge foncé est visible à l'extrémité offshore est, dépassant 96 kW/m. Sous forçage Ouest (W) à gauche, le domaine affiche une puissance considérablement plus élevée, avec une dominance du vert ($\sim 90-120$ kW/m) et des zones jaunes/oranges ($\sim 135-165$ kW/m) s'étendant vers la côte. Les valeurs les plus élevées en rouge sont observées au large, atteignant 180 kW/m à 195 kW/m. On remarque que les zones de forte puissance suivent étroitement les contours de la bathymétrie, montrant une dissipation massive d'énergie à l'approche du rivage. Cette concentration d'énergie résulte de la convergence des orthogonales de houle provoquée par la réfraction sur les irrégularités du fond, ainsi que de l'exposition directe du secteur aux houles incidentes les plus énergétiques.

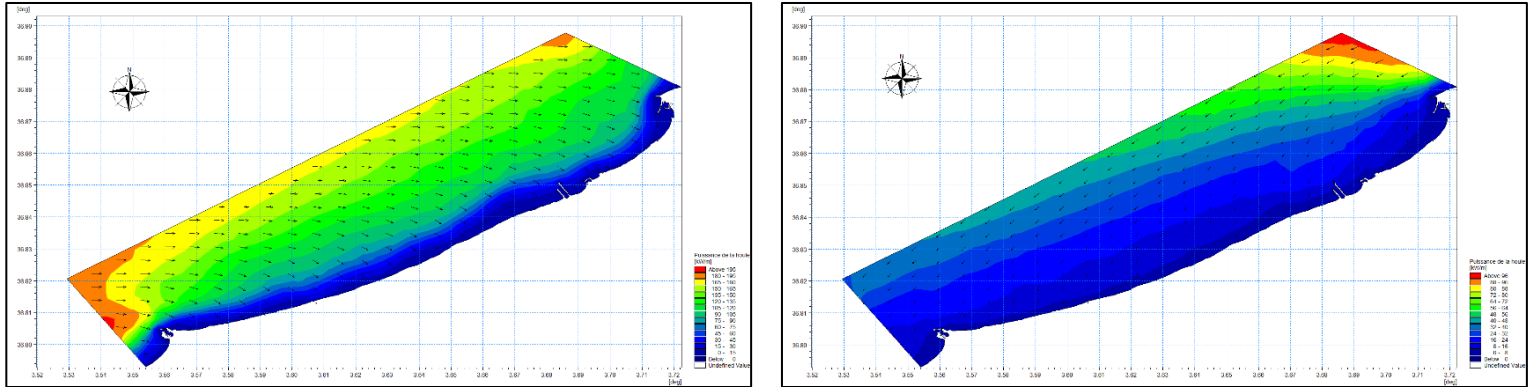


Figure 26. Les cartes de la puissance de la houle (Wave Power) – Zone de Boumerdès ($H_s = 5,65$ m, $T_p = 12$ s) issues de la simulation spectrale des vagues (SW).

La zone de Skikda/Annaba (Site 18)

Vitesse du Courant

Figure 27 pour la zone de Skikda-Annaba révèle une circulation superficielle influencée par la géométrie découpée de la côte. Sous un forçage Nord-Nord-Ouest (NNW) à droite, les vitesses sont globalement faibles, illustrées par un bleu très clair indiquant des valeurs comprises entre 0,05 m/s et 0,15 m/s, bien que des zones d'accélération en bleu plus foncé soient visibles près des caps (0,35 m/s à 0,45 m/s). En comparaison, le forçage Ouest (W) à gauche induit une dynamique plus intense et mieux organisée où le courant longe la côte avec une dominance de bleu intermédiaire (0,15 m/s à 0,30 m/s) et des pics dépassant 0,45 m/s près des obstacles rocheux. Les zones abritées à l'intérieur des baies conservent dans les deux cas des vitesses proches de 0,00 m/s. Cette intensification sous forçage Ouest s'explique par la canalisation du flux le long du talus continental et l'effet de jet généré par le contournement des obstacles topographiques majeurs qui jalonnent ce littoral.

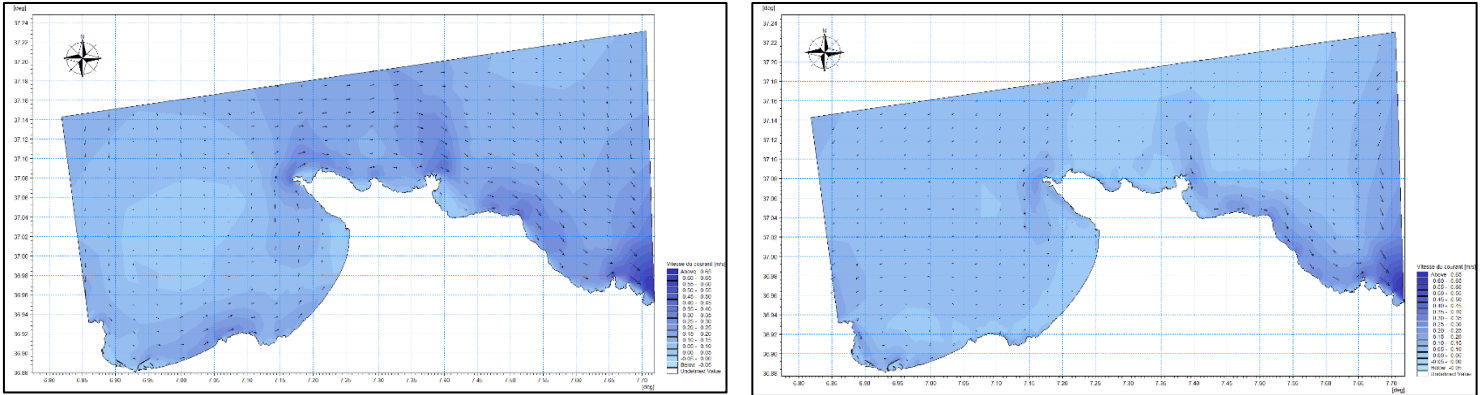


Figure 27. Les cartes de la vitesse des courants –Zone de Skikda/Annaba issues du module MIKE 21 HD ($H_s=8,66$ m, $T_p=13$ s)

Période de Pic des Vagues

Figure 28 illustre le caractère mature des houles atteignant cette région, avec un gradient chromatique relativement homogène. Sous forçage NNW à droite, la carte est presque uniformément vert clair, indiquant des périodes de 11,5 s à 12,0 s, avec quelques taches jaunes à l'est atteignant 13,0 s à 13,5 s. Pour le forçage Ouest (W) à gauche, le domaine affiche un vert plus foncé très homogène correspondant à des périodes de 11,2 s à 12,0 s, sans que les extrêmes théoriques de la légende ne soient atteints de manière significative. La prédominance de ces périodes longues témoigne de l'arrivée de houles lointaines ayant parcouru un fetch considérable à travers le bassin méditerranéen occidental, accumulant une énergie cinétique importante avant d'atteindre le secteur de Skikda-Annaba.

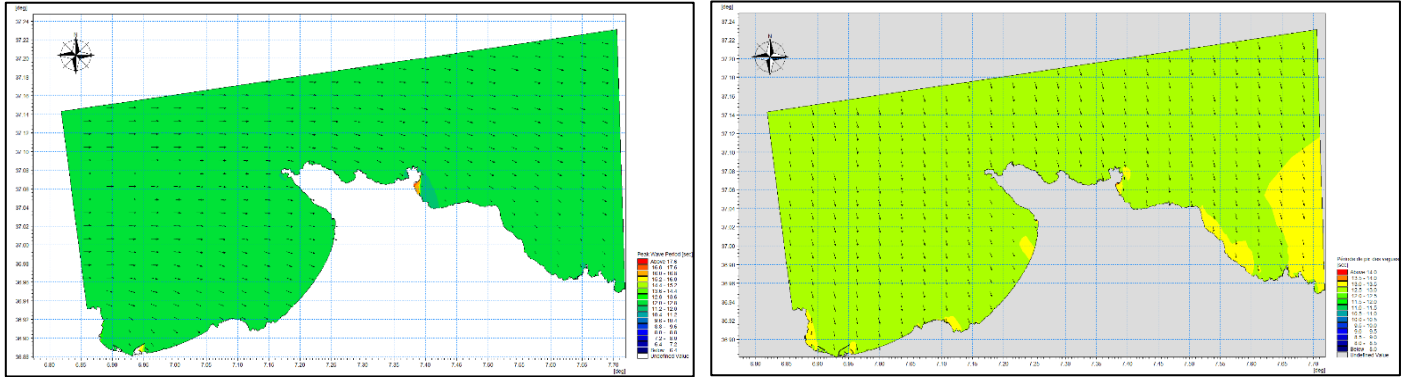


Figure 28. Les cartes de la période de pic (T_p) – Zone de Skikda/Annaba issues de la simulation spectrale des vagues (SW) ($H_s=8,66$ m, $T_p=13$ s).

Hauteur Significative des Vagues

Figure 29 montre une exposition majeure aux houles de tempête selon l'incidence des vagues. Sous forçage NNW à droite, l'exposition est maximale sur l'ensemble du linéaire ; une vaste zone offshore est marquée en rouge avec des hauteurs dépassant 8,0 m, tandis que la frange côtière affiche des teintes orange et jaune (4,0 m à 5,6 m). Sous forçage Ouest (W) à gauche, des hauteurs dépassant 7,0 m en rouge sont visibles au large, mais une large zone verte (2,5 m à 4,0 m) domine la côte, avec une zone d'ombre hydrodynamique en bleu foncé (moins de 1,0 m) nettement visible à l'est des grands caps protecteurs. Cette différence de distribution résulte de l'effet de protection morphologique (sheltering) où les reliefs interceptent l'énergie des houles d'Ouest, tandis que les houles de NNW frappent le littoral frontalement, limitant les zones de refuge.

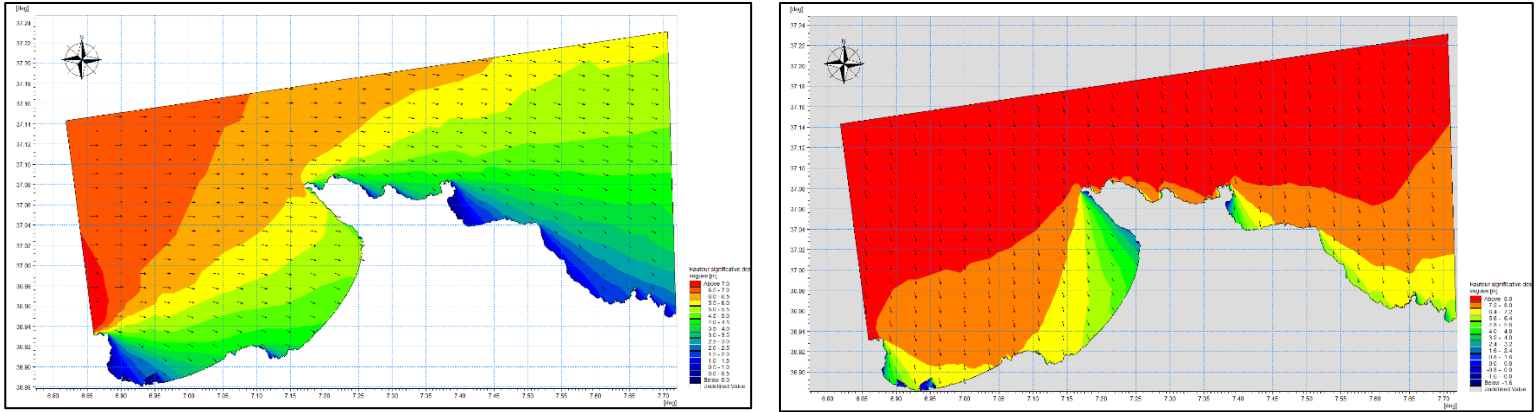


Figure 29. Les cartes de la hauteur significative des vagues (H_s) – Zone de Skikda/Annaba issues de la simulation spectrale des vagues (SW) ($H_s=8,66$ m, $T_p=13$ s).

Puissance de la Houle

Figure 30 confirme le caractère hautement énergétique de cette zone côtière. Sous forçage NNW à droite, le potentiel est massif avec des zones offshore dominées par le jaune (320 kW/m à 400 kW/m) et une zone côtière en vert (160 kW/m à 240 kW/m). Sous forçage Ouest (W) à gauche, la puissance est plus localisée, culminant à plus de 300 kW/m en orange/rouge à l'extrémité ouest de la carte, mais s'effondrant sous les 60 kW/m en bleu dans les zones abritées derrière les caps. Cette concentration d'énergie massive sous forçage NNW s'explique par l'absence d'obstacles géographiques majeurs entre les zones de génération de tempêtes en Méditerranée Nord et le littoral algérien oriental, faisant de cette région l'une des plus exposées aux transferts d'énergie marine.

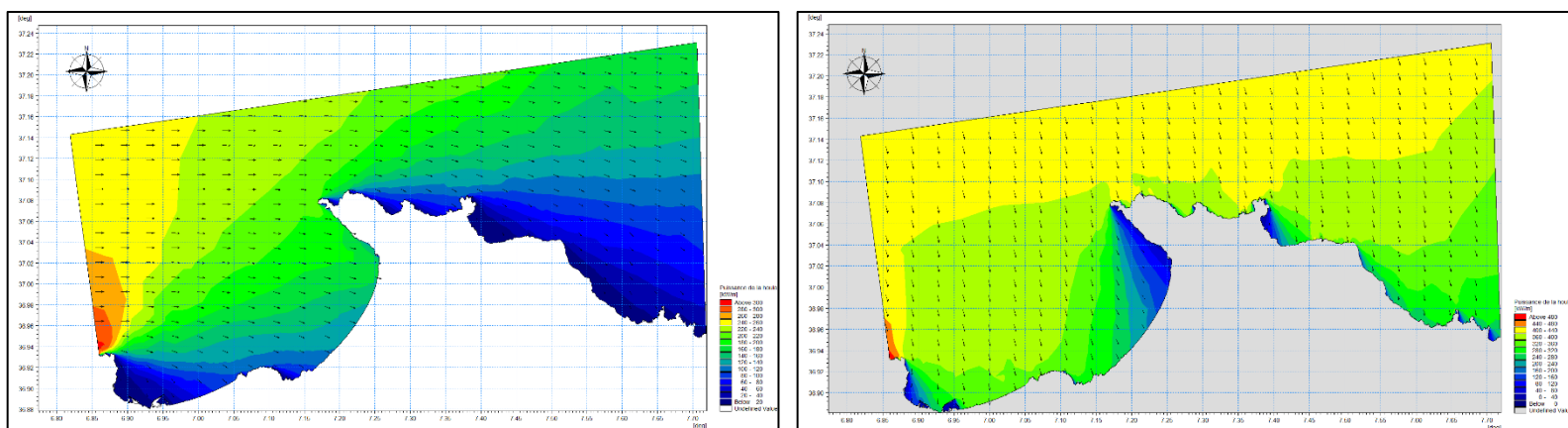


Figure 30. Les cartes de puissance de la houle (WP) – Zone de Skikda/Annaba issues de la simulation spectrale des vagues (SW) ($H_s=8,66$ m, $T_p=13$ s).

1.4 Contraintes environnementales et réglementaires

Le déploiement des systèmes hybrides sur les sites S12 et S18 devra respecter le cadre réglementaire algérien, notamment la loi 03-10 relative à la protection de l'environnement et la loi 02-02 relative à la valorisation du littoral, imposant une Étude d'Impact Environnemental (EIE) préalable. Cette étude devra évaluer les impacts sur les herbiers de Posidonie et la faune marine, tout en tenant compte des infrastructures sous-marines existantes et des zones de pêche réglementées. Les deux projets devront également s'inscrire dans le respect de la ZEE algérienne et des conventions internationales.

2. Estimation des émissions de Gaz à effet de serre évitées

Les émissions de gaz à effet de serre évitées grâce au déploiement des énergies marines renouvelables le long du littoral algérien sont estimées à partir du facteur d'émission (FE) du parc national de production d'électricité, tel que publié par la Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz (CREG). Ce facteur traduit l'intensité carbone moyenne du réseau électrique algérien, majoritairement alimenté par des centrales thermiques au gaz naturel [131,132].

La méthode retenue repose sur le principe de substitution directe : chaque kilowattheure produit par une installation éolienne ou houlomotrice offshore se substitue à un kilowattheure qui aurait été généré par le parc thermique conventionnel, évitant ainsi les émissions de (CO_2) correspondantes. Cette approche est conforme aux méthodologies reconnues internationalement

pour l'évaluation des projets d'énergies renouvelables, notamment dans le cadre des Mécanismes de Développement Propre (MDP) du Protocole de Kyoto [133,134]

et des lignes directrices de l'Agence Internationale de l'Énergie [135].

La formule appliquée est la suivante :

$$GES_{\text{évitées}}(tCO_2/an) = AEP(MWh/an) \times FE_{\text{CREG}}(tCO_2/MWh)$$

AEP: Production annuelle d'énergie calculée pour chaque site (MWh/an).

FE_{CREG} : Facteur d'émission du réseau électrique algérien = 0,546 (Kg CO₂ /kWh) (CREG, 2024).

Le système hybride déployé sur les sites S12 et S18 permet d'éviter en moyenne ~293 000 tCO₂eq/an, grâce à une production dominée à plus de 95 % par la composante éolienne. S12 affiche le gain environnemental le plus élevé (304 785 tCO₂eq/an) en raison de son meilleur gisement éolien, tandis que S18 se distingue par une performance houlomotrice supérieure. Ces résultats témoignent de la pertinence environnementale du projet dans le cadre de la transition énergétique algérienne. Les résultats des émissions de GES évitées pour les deux technologies sont présentés dans **Tableau 9**.

Tableau 9. Comparaison des performances des deux sites pilotes en termes de production annuelle d'énergie et de réduction des émissions carbone.

AEP Unitaire Turbine (MWh/an)	AEP Totale (10 Turbines) (MWh/an)	AEP Unitaire Convertisseur (MWh/an)	AEP Totale (30 Convertisseurs) (MWh/an)	Gain GES (tCO ₂ eq/an)
53 760,94	537 609,40	686,81	20 604,30	304 784,68
49 268,20	492 682,00	804,45	24 133,50	282 181,26

Conclusion

Les sites S12 et S18 s'imposent comme les candidats optimaux du littoral algérien grâce à leur complémentarité éolien-houle, leur bathymétrie adaptée aux fondations flottantes et leur proximité avec des stations de dessalement opérationnelles. La simulation hydrodynamique valide leur potentiel de production tout en identifiant les contraintes à intégrer dans le dimensionnement final : courants, propagation des vagues, impacts sur les écosystèmes côtiers.

Chapitre V

Production de l'hydrogène vert et analyse technico-économiques du projet

Introduction

Ce dernier chapitre scelle la convergence de nos travaux en assemblant les différentes composantes technologiques dans une architecture système complète et optimisée. En opérant la synergie entre l'éolien offshore (150 MW) et l'énergie houlomotrice (9 MW), nous consolidons une puissance hybride de 159 MW dédiée à la production massive d'hydrogène vert. Cette configuration illustre concrètement la capacité des ressources marines à porter une infrastructure énergétique de grande envergure

1. Production d'hydrogène vert

La démarche concerne la génération de l'énergie renouvelable offshore. Il repose sur deux composantes complémentaires : un parc éolien offshore constitué de dix éoliennes Vestas de 15MW chacune pour une capacité éolienne totale de 150 MW et un parc houlomoteur comprenant 30 convertisseurs d'énergie des vagues (WECs) de type CorPower Ocean d'une puissance unitaire de 300 kW portant la capacité houlomotrice à 9 Mw, la capacité offshore totale installée s'élève ainsi à 159 MW. L'électricité générée par les deux parcs et regroupée au niveau d'une plateforme collectrice offshore, puis acheminée vers les installations terrestres par l'intermédiaire d'un câble sous-marin à haute tension. La totalité de l'énergie annuelle produite (AEP) est destinée à la production de l'hydrogène vert (**Figure 30**).

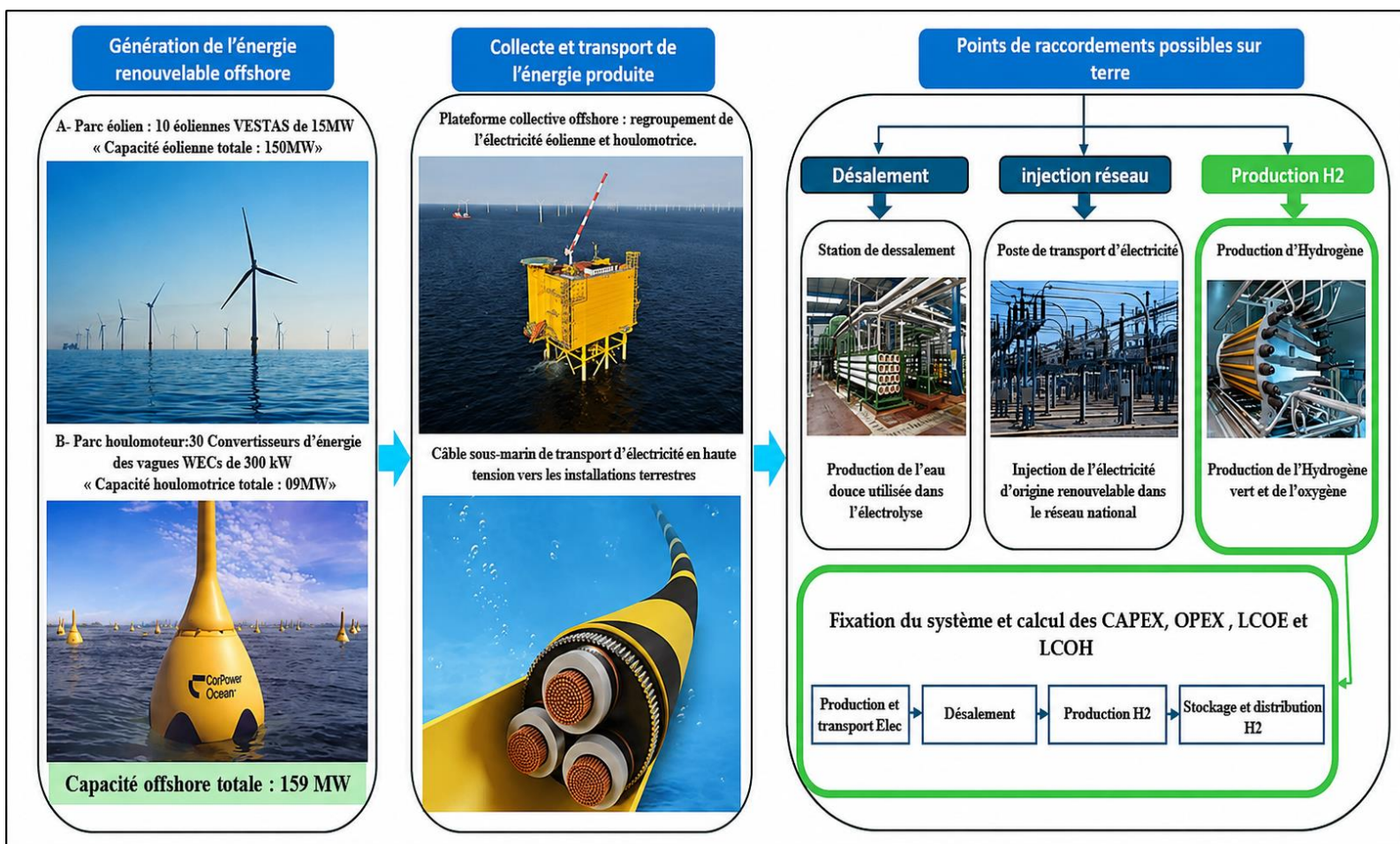


Figure 30. L'architecture globale du système hybride offshore retenu pour ce projet.

2. Dessalement de l'eau de mer

Algérie s'est positionnée comme un leader régional dans le domaine du dessalement de l'eau de mer, avec la construction de 21 usines de dessalement en moins de deux décennies et une augmentation significative des investissements dans Osmose Inverse de l'Eau de Mer (SWRO) depuis 2000 [7].

La majorité des stations de dessalement en Algérie est implantée le long du littoral, ce qui rend naturelles les synergies avec les ressources énergétiques offshore. La carte de **Figure 31** recense l'ensemble de ces stations, en distinguant celles en service et celles en projet tout en précisant pour chacune la technologie utilisée et la capacité de production journalière exprimé en (m^3/j).

Stations de Dessalement en Algérie

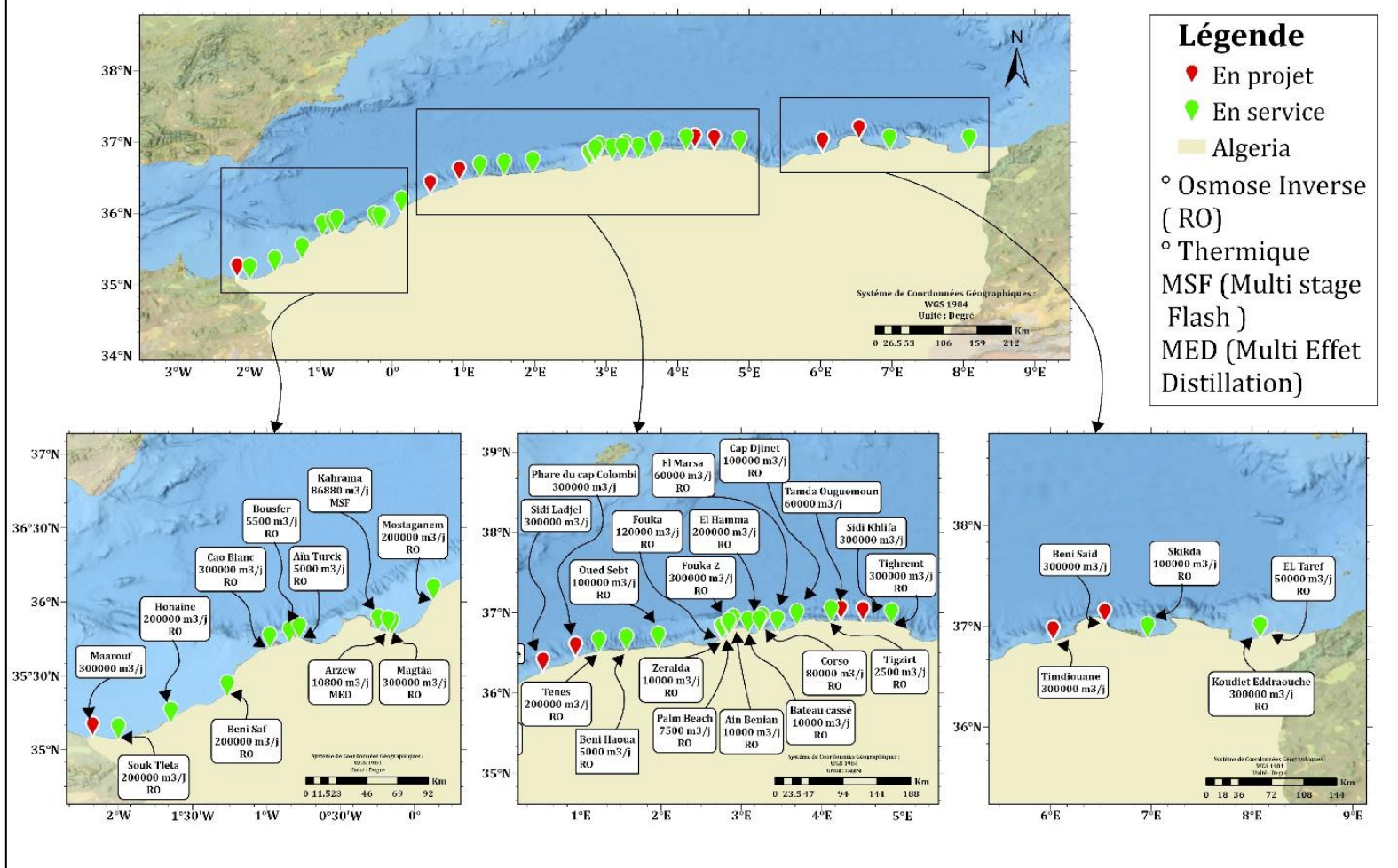


Figure 31. Répartition géographique et état d'avancement des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie (Données technologiques incluses).

Dans le cadre de la présente étude, les deux sites pilotes retenus pour l'hybridation éolienne-houlomotrice S12 et S18 se trouvent à proximité immédiate de stations de dessalement opérationnelles, S12 correspond à la station de dessalement de Cap Djinet tandis que S18 situé dans la région Est est associé à la station de Skikda

Figure 32.

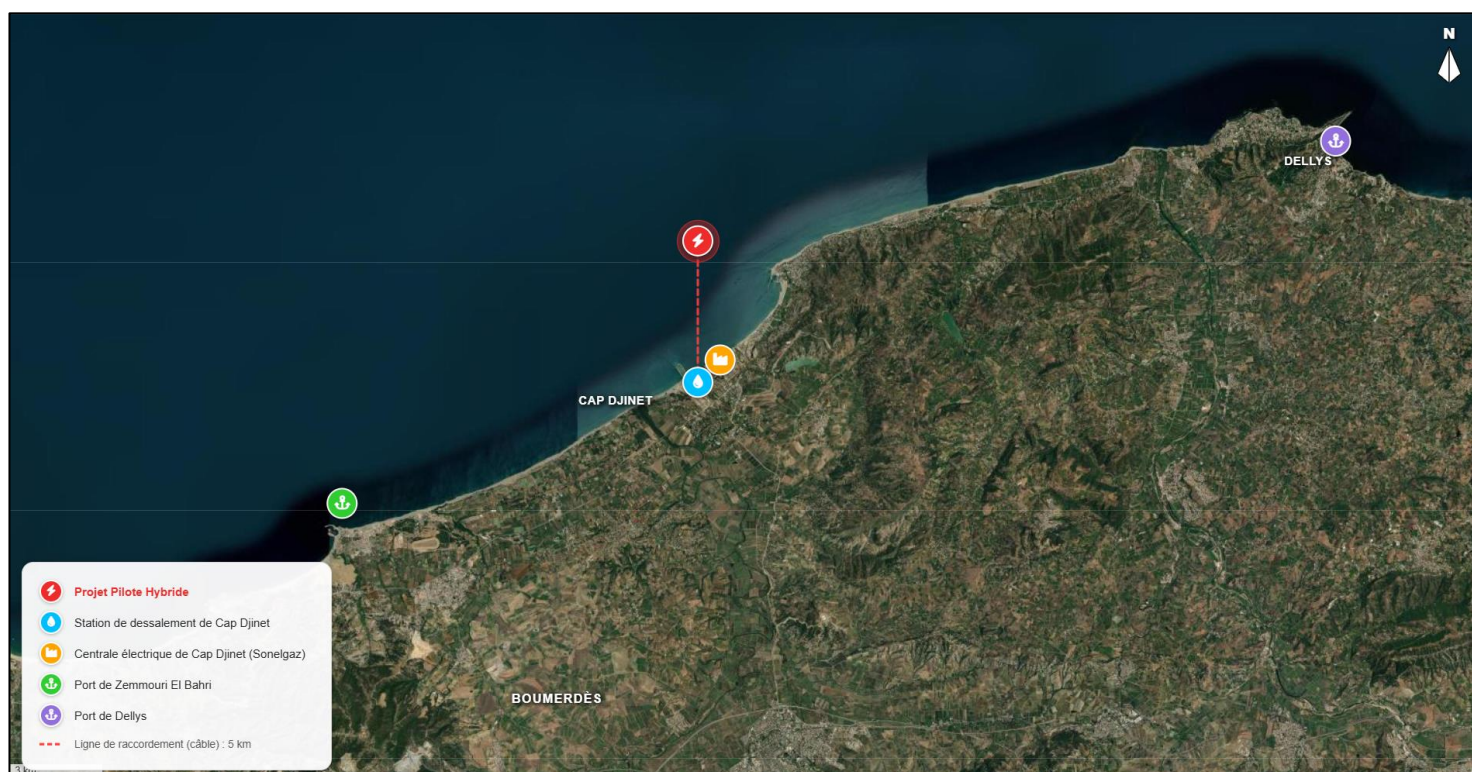
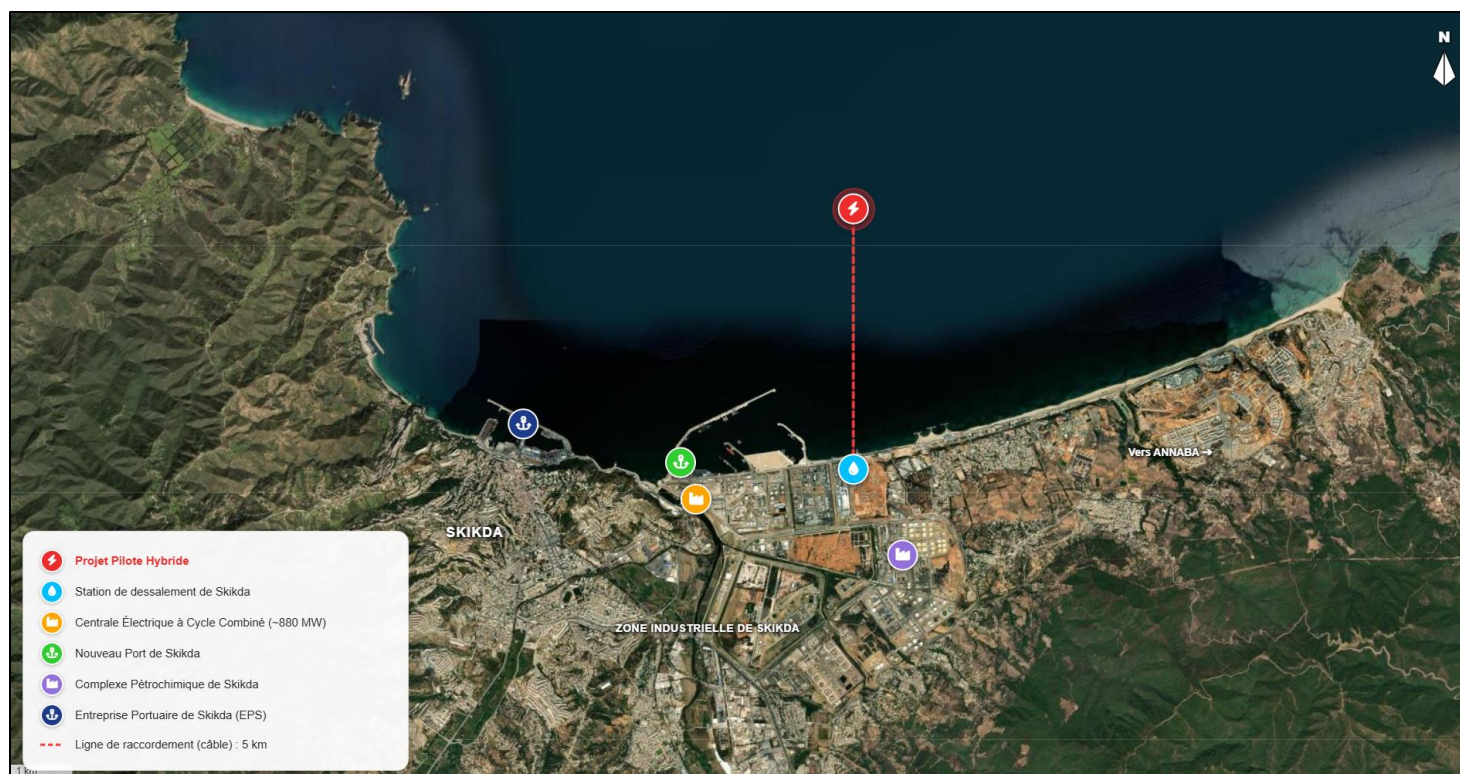


Figure 32. Localisation des sites pilotes hybrides et leurs connexion énergétique aux stations de dessalement.

3. Électrolyse

L'électrolyse de l'eau est le procédé retenu pour la production d'hydrogène vert la molécule d'eau est dissociée en dihydrogène (H₂) et en dioxygène (O₂). L'électrolyseur sélectionné est de technologie PEM (Proton Exchange Membrane), caractérisé par une consommation spécifique d'électricité (CEM) de 56,42 kWh/kg H₂, et sera installé au sein des stations de dessalement situées à proximité immédiate de la zone d'implantation du projet. L'eau douce nécessaire à l'alimentation du procédé est fournie directement par ces mêmes stations, assurant une intégration technique cohérente et une autonomie hydrique complète du système.

4. Analyse technico-économique du système hybride offshore

L'évaluation économique constitue un volet déterminant pour apprécier la viabilité et la compétitivité du système hybride éolien-houlomoteur dédié à la production d'hydrogène vert sur les sites pilotes S12 et S18. Cette analyse repose sur quatre indicateurs fondamentaux : les dépendances d'investissement (CAPEX), les coûts d'exploitation et de maintenance (OPEX),

Le coût nivelé de l'hydrogène (LCOH). Ces métriques permettent d'évaluer la rentabilité du projet sur l'ensemble de son cycle de vie en intégrant la capacité installée totale de 159 MW, la production annuelle d'énergie (AEP) issue des deux parcs et les paramètres technico-économiques propres aux technologies retenues : éoliennes Vestas (V236-15 MW), convertisseurs CorPower (C4) et l'électrolyseur (PEM). Les résultats obtenus dans Tableau X seront mis en perspective avec les valeurs de référence de la littérature scientifique internationale afin de positionner ce projet dans le contexte global de la transition énergétique méditerranéenne.

4.1. Bloc électrique : puissances, CAPEX, OPEX et LCOE

LCOE (Coût nivelé de l'électricité): Le coût total du cycle de vie comprend les dépenses en capital initiales (CapEx), couvrant les coûts de construction et d'installation ; les dépenses opérationnelles (OpEx), qui englobent les coûts continus d'exploitation et de maintenance tout au long de la vie de l'installation ; ainsi que les dépenses de déclassement (DecEx). Ces coûts sont actualisés dans le temps à un taux d'actualisation i , cumulés sur la durée de vie opérationnelle n , avec t représentant chaque année de cette période [137].

$$LCOE = \frac{CAPEX_{elec} \times CRF + OPEX_{elec}}{E_{eq}} \quad (Éq. 16)$$

4.2. Bloc hydrogène : électrolyseur PEM, dégradation, overhaul et production nette

LCOH : est calculé en additionnant toutes les dépenses du projet (CAPEX et OPEX correctement ajustés selon le taux de rendement) et en divisant par la quantité d'hydrogène produite par l'électrolyseur, exprimée en kilogrammes [138].

$$\mathbf{LCOH} = \frac{\mathbf{Annual_{costs_elec} + Annual_{costs_PEM}}}{\mathbf{H_{eq}}} \quad (\text{Éq. 17})$$

Tableau 10. Indicateurs technico-économiques : LCOE et LCOH des sites pilotes.

Symbole	Paramètre	Site 12	Site 18	Unité	Remarque
PARAMÈTRES GÉNÉRAUX					
n	Durée de vie du projet	25	25	Ans	Hypothèse projet
i	Taux d'actualisation (WACC)	7 %	7 %	—	Hypothèse projet
CRF	Facteur de récupération du capital	0,08581	0,08581	—	/
BLOC ÉOLIEN — Vestas V236-15.0 MW					
AEP ₀	Production annuelle initiale (an 1)	502,39	465,134	GWh/an	Hypothèse projet
N _{éolien}	Nombre d'éoliennes	10	10	Turbines	Hypothèse projet
P _{éolien}	Puissance éolienne totale	150	150	MW	Vestas
CAPEX _{éolien}	Coût spécifique CAPEX éolien offshore	3,0	3,0	MUSD/MW	Donnée fournie
CAPEX _{éolien}	CAPEX éolien total	450,00	450,00	MUSD	Donnée fournie
OPEX _{éolien}	Coût spécifique OPEX éolien offshore	100	100	USD/kW/an	Donnée fournie
OPEX _{éolien}	OPEX éolien annuel	15,00	15,00	MUSD/an	Donnée fournie
d _{éolien}	Taux de dégradation annuel	1,6 %	1,6 %	/an	Appliquée à la Production
E _{eq}	Production annuelle équivalente actualisée	439,57	406,974	GWh/an	/
BLOC HOULOMOTEUR — CorPower C4					
N _{vague}	Nombre de convertisseurs WEC	30	30	WEC	Hypothèse projet
P _{vague}	Puissance houlomotrice totale	9,0	9,0	MW	CorPower
CAPEX _{vague}	Coût spécifique CAPEX houlomoteur	4,0	4,0	MUSD/MW	Donnée fournie
CAPEX _{vague}	CAPEX houlomoteur total	36,00	36,00	MUSD	Donnée fournie
OPEX _{vague}	Coût spécifique OPEX houlomoteur	200	200	USD/kW/an	Donnée fournie
OPEX _{vague}	OPEX houlomoteur annuel	1,80	1,80	MUSD/an	/
INFRASTRUCTURE ÉLECTRIQUE					
L _{Câble}	Longueur câble sous-marin	5	5	Km	Hypothèse projet (Site offshore)
CAPEX _{câble}	Coût spécifique câble sous-marin	1,5	1,5	MUSD/km	Donnée fournie

CAPEX_câble	Coût poste de transformation offshore	2,0	2,0	MUSD	Hypothèse forfaitaire
CAPEX_câble	CAPEX câble + poste offshore	9,50	9,50	MUSD	/
OPEX_divers	OPEX divers (supervision, câble)	0,20	0,20	MUSD/an	Estimation forfaitaire
CAPEX_elec	CAPEX électrique total	495,50	495,50	MUSD	/
OPEX_elec	OPEX électrique total annuel	17,00	17,00	MUSD/an	/
BLOC HYDROGÈNE — Électrolyseur PEM					
P_PEM	Puissance nominale électrolyseur	57,35	53,097	MW	/
CAPEX_PEM	Coût spécifique CAPEX électrolyseur PEM	500	500	USD/kw	Donnée fournie
CAPEX_PEM	CAPEX électrolyseur PEM	28,675	26,549	MUSD	/
OPEX_PEM	Taux OPEX annuel électrolyseur (% CAPEX)	3%	3%	/an	Donnée fournie
OPEX_PEM	OPEX annuel PEM	0,860	0,797	MUSD/an	/
Overhaul	Coût overhaul stack (% CAPEX PEM)	60 %	60 %	/	à l'année 10
Overhaul	Overhaul stack annualisé (an 10)	0,750	0,695	MUSD/an	/
t_Overhaul	Année de remplacement du stack (overhaul)	Année 10	Année 10	/	/
Co	Consommation spécifique initiale PEM	56,42	56,42	kWh/kg H ₂	Hypothèse donnée
g_el	Taux de dégradation efficacité PEM	1,0%	1,0 %	/an	Hausse de consommation spécifique
H_eq	Production H ₂ annuelle équivalente	7160690	6 629 671	kg/an	/
l_H ₂	Taux de pertes hydrogène (fuites, purge)	0,1 %	0,1 %	/an	Pertes de chaîne
RÉSULTATS CLÉS					
LCOE	Coût nivelé de l'électricité	0,1354	0,1462	USD/kWh	/
LCOH	Coût nivelé de l'hydrogène vert	8,88	9,546	USD/kg H₂	/

Conclusion

En conclusion, ce chapitre démontre la viabilité du modèle par une analyse économique prospective s'étendant sur 2 ans. L'intégration minutieuse des dépenses d'investissement CAPEX, des couts opérationnels OPEX et des paramètres de dégradation technique permet d'établir des projections précises du LCOE et du LCOH pour chaque site pilote.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail propose une analyse technico-économique approfondie d'une installation hybride combinant énergie éolienne et houlomotrice en mer, orientée vers la génération d'hydrogène vert le long des côtes algériennes. L'étude de 20 stations littorales sur trois décennies (1992–2022) a permis de dresser une cartographie énergétique intégrant le gisement éolien et le gisement de houle, mettant en évidence une réelle synergie saisonnière entre ces deux sources, notamment dans la partie orientale du littoral. L'analyse croisée révèle ainsi une complémentarité géographique structurelle : la zone centrale (S7–S14) concentre le meilleur potentiel éolien (DPE atteignant 602 W/m²), tandis que la région Est (S15–S20), aux abords d'Annaba, s'affirme comme le gisement houlomoteur le plus prometteur, avec un flux de puissance culminant à 13 kW/m. Cette distribution spatiale différenciée assure une mutualisation naturelle des ressources propice à la stabilisation de la production.

Les sites (S12) et (S18) ont été identifiés par une approche de sélection multicritère, puis équipés de 10 aérogénérateurs Vestas V236-15 MW et de 30 convertisseurs houlomoteurs CorPower C4, constituant un parc de 159 MW raccordé à un électrolyseur à membrane PEM. Les modélisations hydrodynamiques réalisées sous MIKE 21 ont confirmé l'aptitude à l'implantation sur les fonds de 50 m, pour les deux directions de houle représentatives retenues. L'évaluation technique démontre la parfaite adéquation des technologies : la turbine Vestas V236 tire pleinement parti des vents forts de la zone centrale, tandis que le CorPower C4 valorise efficacement la ressource houlomotrice de la zone Est.

L'analyse économique sur 25 ans positionne les deux sites à 8,88 USD/kg (S12) et 9,55 USD/kg (S18) de LCOH. Ces valeurs, supérieures aux objectifs internationaux de 2–4 USD/kg à l'horizon 2030–2040, s'expliquent par le stade préindustriel du CorPower C4 et le CAPEX élevé de la composante houlomotrice. Elles restent néanmoins cohérentes avec la littérature sur les projets hybrides offshore de première génération. Trois leviers principaux permettront de réduire ces coûts à moyen terme : la montée en maturité technologique du convertisseur houlomoteur (TRL), l'optimisation du facteur d'utilisation de l'électrolyseur via un stockage tampon, et la baisse des coûts des électrolyseurs PEM (projections à 200–250 USD/kW d'ici 2030).

Conclusion générale

Malgré des limites liées aux hypothèses fixes de rendement et à l'exclusion des coûts de compression et de transport de l'hydrogène, ce projet démontre sa faisabilité technique dès aujourd'hui et son potentiel économique à moyen terme. En s'inscrivant dans le cadre du Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF) entré en vigueur en 2026, cette infrastructure transforme une contrainte réglementaire en une opportunité stratégique majeure. Elle ouvre une voie concrète pour que l'Algérie s'affirme comme un acteur clé de l'hydrogène vert méditerranéen, en parfaite synergie avec le développement du dessalement de l'eau de mer par osmose inverse (SWRO) et les ambitions de la Stratégie Nationale Hydrogène 2040.

Références

- [1] Cap sur l'hydrogène vert et les énergies renouvelables – Portail algérien, (2024). <https://portail.cder.dz/2024/10/01/cap-sur-lhydrogene-vert-et-les-energies-renouvelables/> (accessed February 25, 2026).
- [2] R. Hammouche, Atlas vent de l'Algerie, (1991). <https://orbit.dtu.dk/en/publications/atlas-vent-de-lalgerie/> (accessed June 14, 2026).
- [3] Y. Himri, M. Merzouk, N. Kasbadji Merzouk, S. Himri, Potential and economic feasibility of wind energy in south West region of Algeria, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 38 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2020.100643>.
- [4] F. Meziane, S.M. Boudia, I. Nouicer, M. Debbache, Assessing offshore wind plants for energy and green hydrogen production: A case study in the Mostaganem coastal region, Algeria, *Wind Engineering* 49 (2025) 1119–1132. <https://doi.org/10.1177/0309524X241269367>.
- [5] K. Amarouche, B. Bingölbali, A. Akpınar, New wind-wave climate records in the Western Mediterranean Sea, *Climate Dynamics* 2021 58:5 58 (2021) 1899–1922. <https://doi.org/10.1007/S00382-021-05997-1>.
- [6] S. Jin, D. Greaves, Wave energy in the UK: Status review and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 143 (2021) 110932. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110932>.
- [7] A. Mahmoudi, M. Bostani, S. Rashidi, M.S. Valipour, Challenges and opportunities of desalination with renewable energy resources in Middle East countries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 184 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113543>.
- [8] A. Radjai, M. Amara, F. Houma, H. Hadjar, S. Chernai, S. Amirouche, B. Hamdi, Physicochemical autopsy and sequential cleaning optimization of seawater reverse-osmosis membranes: a study from Beni Saf desalination plant, Algeria, *Water SA* 52 (2026) 82–96. <https://doi.org/10.17159/wsa/2026.v52.i1.4197>.

Références

- [9] M. Hubert, D. Peterson, E. Miller, J. Vickers, R. Mow DOE, M. Klembara, S. Satyapal, DOE Hydrogen Program Record 24005 : Clean Hydrogen Production Cost Scenarios with PEM Electrolyzer Technology, (2022).
- [10] B. Robertson, G. Dunkle, J. Gadasi, G. Garcia-Medina, Z. Yang, Holistic marine energy resource assessments: A wave and offshore wind perspective of metocean conditions, *Renew. Energy* 170 (2021) 286–301. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.136>.
- [11] R. Jayabal, Towards a carbon-free society : Innovations in green energy for a sustainable future, *Results in Engineering* 24 (2024) 103121. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.103121>.
- [12] Massaro, A. (2021). State of the Art and Technology Innovation. *Electronics in Advanced Research Industries*, 1–49. <https://doi.org/10.1002/9781119716907.CH1>
- [13] X. Su, X. Wang, W. Xu, L. Yuan, C. Xiong, J. Chen, Offshore Wind Power : Progress of the Edge Tool, Which Can Promote Sustainable Energy Development, *Sustainability* 2024, Vol. 16, 16 (2024). <https://doi.org/10.3390/su16177810>.
- [14] X. Wu, Y. Hu, Y. Li, J. Yang, L. Duan, T. Wang, T. Adcock, Z. Jiang, Z. Gao, Z. Lin, A. Borthwick, S. Liao, Foundations of offshore wind turbines : A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104 (2019) 379–393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.012>.
- [15] X. Ma, M. Li, W. Li, Y. Liu, Overview of Offshore Wind Power Technologies, *Sustainability* 2025, Vol. 17, 17 (2025). <https://doi.org/10.3390/su17020596>.
- [16] D. Micallef, A. Rezaeiha, Floating offshore wind turbine aerodynamics: Trends and future challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 152 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111696>.
- [17] G. Hou, K. Xu, J. Lian, A review on recent risk assessment methodologies of offshore wind turbine foundations, *Ocean Engineering* 264 (2022) 112469. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112469>.

Références

- [18] G.R. Timilsina, G. Cornelis van Kooten, P.A. Narbel, Global wind power development: Economics and policies, *Energy Policy* 61 (2013) 642–652.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.062>.
- [19] M.D. Esteban, J.J. Diez, J.S. López, V. Negro, Why offshore wind energy?, *Renew. Energy* 36 (2011) 444–450. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.009>.
- [20] J. Wu, Z.X. Wang, G.Q. Wang, The key technologies and development of offshore wind farm in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34 (2014) 453–462.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.023>.
- [21] L. Castro-Santos, V. Diaz-Casas, eds., *Floating Offshore Wind Farms*, (2016).
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-27972-5>.
- [22] P. Schaumann, S. Lochte-Holtgreven, S. Steppeler, Special fatigue aspects in support structures of offshore wind turbines, *Materwiss. Werksttech.* 42 (2011) 1075–1081.
<https://doi.org/10.1002/mawe.201100913>.
- [23] S. Schafhirt, A. Page, G.R. Eiksund, M. Muskulus, Influence of Soil Parameters on the Fatigue Lifetime of Offshore Wind Turbines with Monopile Support Structure, *Energy Procedia* 94 (2016) 347–356. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.194>.
- [24] A.F. de O. Falcão, Wave energy utilization: A review of the technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 899–918.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>.
- [25] A.M. O’Hagan, C. Huertas, J. O’Callaghan, D. Greaves, Wave energy in Europe: Views on experiences and progress to date, *International Journal of Marine Energy* 14 (2016) 180–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2015.09.001>.
- [26] L. Wan, T. Moan, Z. Gao, W. Shi, A review on the technical development of combined wind and wave energy conversion systems, *Energy* 294 (2024) 130885.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130885>.
- [27] IRENA, A Renewable Energy Roadmap Report, 2014. URL : www.irena.org/remap.

Références

- [28] T.M. El-Geziry, A.S. Dabbous, D.M. Hendy, Wave Energy Potential in the Mediterranean Sea : Assessment, Challenges, and Future Prospects, *Athens J. Sci.* 12 (2025) 151–170. <https://doi.org/10.30958/ajs.12-3-1>.
- [29] K. Veerabhadrapa, B.G. Suhas, C.K. Mangrulkar, R.S. Kumar, V.S. Mudakappanavar, Narahari, K.N. Seetharamu, Power Generation Using Ocean Waves : A Review, *Global Transitions Proceedings* 3 (2022) 359–370. <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2022.05.001>.
- [30] Offshore Wind Technical Potential | Analysis and Maps | ESMAP, 2020. URL: https://www.esmap.org/esmap_offshorewind_techpotential_analysis_maps (accessed February 14, 2026).
- [31] Offshore Wind : From 83 GW Today to 2,000 GW by 2050, 2025. URL : <https://www.irena.org/News/articles/2025/Sep/Offshore-Wind-From-83-GW-Today-to-2000-GW-by-2050> (accessed February 14, 2026).
- [32] M.A.H. Mudhafar, M.E. Zayed, S. Rehman, Offshore wind-to-green hydrogen: a comprehensive review on current challenges, techno-economic analyses, environmental implications, and potential risks, *Process Safety and Environmental Protection* 201 (2025) 107631. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107631>.
- [33] E. Faraggiana, A. Ghigo, M. Sirigu, E. Petracca, G. Giorgi, G. Mattiazzo, G. Bracco, Floating offshore wind potential for Mediterranean countries, *Heliyon* 10 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33948>.
- [34] D. Khojasteh, A. Shamsipour, L. Huang, S. Tavakoli, M. Haghani, F. Flocard, M. Farzadkhoo, G. Iglesias, M. Hemer, M. Lewis, S. Neill, M.M. Bernitsas, W. Glamore, A large-scale review of wave and tidal energy research over the last 20 years, *Ocean Engineering* 282 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114995>.
- [35] Maritime Commons: The Digital Repository of the World Maritime University (2023), URL: <https://commons.wmu.se/> (accessed February 14, 2026).
- [36] S. Jin, D. Greaves, Wave energy in the UK: Status review and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 143 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110932>.

Références

- [37] K. Amarouche, A. Akpınar, N.E.I. Bachari, F. Houma, Wave energy resource assessment along the Algerian coast based on 39-year wave hindcast, *Renew. Energy* 153 (2020) 840–860. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.02.040>.
- [38] M. Yusuf, L. Bazli, M.A. Alam, F. Masood, L.K. Keong, A. Noor, K. Hellgardt, B. Abdullah, Hydrogen production via natural gas reforming : A comparative study between DRM, SRM and BRM techniques, 2021 3rd International Sustainability and Resilience Conference: Climate Change (2021) 155–158. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF53624.2021.9668026>.
- [39] M. Jaszczur, Q. Hassan, P. Palej, J. Abdulateef, Multi-Objective optimisation of a micro-grid hybrid power system for household application, *Energy* 202 (2020) 117738. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.117738>.
- [40] E.T. Sayed, A.G. Olabi, K. Elsaid, M. Al Radi, R. Alqadi, M. Ali Abdelkareem, Recent progress in renewable energy based-desalination in the Middle East and North Africa MENA region, *J. Adv. Res.* 48 (2023) 125–156. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.08.016>.
- [41] JORA, Conventions et Accords Internationaux-Lois et Décrets Arrêtés, Décisions, Avis, Communications et Annonces (traduction française), 2023.
- [42] J. Kim, K. Park, D.R. Yang, S. Hong, A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants, *Appl. Energy* 254 (2019) 113652. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113652>.
- [43] M. Elimelech, W.A. Phillip, The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment, *Science* (1979). 333 (2011) 712–717. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1200488/SUPPL_FILE/ELIMELECH.SOM.PDF.
- [44] M. Zhang, S. Yu, C. Shi, H. Wang, N. Chang, Carbon footprint analysis and carbon neutrality potential of desalination by reverse osmosis for different applications based on life cycle assessment method, *Scientific Reports* 2025 15:1 15 (2025) 40842-. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24518-2>.

- [45] N. Ghaffour, T.M. Missimer, G.L. Amy, Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability, *Desalination* 309 (2013) 197–207. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2012.10.015>.
- [46] H. Shemer, R. Semiat, Sustainable RO desalination – Energy demand and environmental impact, *Desalination* 424 (2017) 10–16. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2017.09.021>.
- [47] M.A. Abdelkareem, M. Al Radi, M. Mahmoud, E.T. Sayed, T. Salameh, R. Alqadi, E.C.A. Kais, A.G. Olabi, Recent progress in wind energy-powered desalination, *Thermal Science and Engineering Progress* 47 (2024) 102286. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102286>.
- [48] C. Ling, Y. Wang, C. Min, Y. Zhang, Economic evaluation of reverse osmosis desalination system coupled with tidal energy, *Frontiers in Energy* 2017 12:2 12 (2017) 297–304. <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0478-2>.
- [49] A. Jarquin-Laguna, Performance analysis of a hydraulic tidal turbine for seawater desalination, *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference* 16 (2025). <https://doi.org/10.36688/ewtec-2025-919>.
- [50] B. Del Rio-Gamero, J.S. Rodríguez, P.S. Arocha, Combining offshore wind and wave energy to supply a big size desalination plant, *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference* 15 (2023). <https://doi.org/10.36688/ewtec-2023-586>.
- [51] N.A. Kelly, Hydrogen production by water electrolysis, *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution* (2014) 159–185. <https://doi.org/10.1533/9780857097736.2.159>.
- [52] S.D. Ebbesen, M. Mogensen, Electrolysis of carbon dioxide in Solid Oxide Electrolysis Cells, *J. Power Sources* 193 (2009) 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.02.093>.
- [53] M. Izzì, M.C. Sportelli, N. Ditaranto, R.A. Picca, M. Innocenti, L. Sabbatini, N. Cioffi, Pros and Cons of Sacrificial Anode Electrolysis for the Preparation of Transition Metal Colloids: A Review, *ChemElectroChem* 7 (2020) 386–394. <https://doi.org/10.1002/CELC.201901837>.

- [54] X. Zhang, R. Zeng, T. Du, Y. He, H. Tian, K. Mu, X. Liu, H. Li, Conventional and energy level based exergoeconomic analysis of biomass and natural gas fired polygeneration system integrated with ground source heat pump and PEM electrolyzer, *Energy Convers. Manag.* 195 (2019) 313–327. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.017>.
- [55] F. Lin, A. Wokaun, I. Alxneit, Rh-doped Ceria : Solar Organics From H₂O, CO₂ and Sunlight ? *Energy Procedia* 69 (2015) 1790–1799. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.151>.
- [56] U.U. Rahman, M. Humayun, U. Ghani, M. Usman, H. Ullah, A. Khan, N.M. El-Metwaly, A. Khan, MXenes as Emerging Materials : Synthesis, Properties, and Applications, *Molecules* 2022, Vol. 27, 27 (2022). <https://doi.org/10.3390/molecules27154909>.
- [57] M. Humayun, C. Wang, W. Luo, Recent Progress in the Synthesis and Applications of Composite Photocatalysts: A Critical Review, *Small Methods* 6 (2022) 2101395. <https://doi.org/10.1002/smtd.202101395>.
- [58] P. Muthukumar, A. Kumar, M. Afzal, S. Bhogilla, P. Sharma, A. Parida, S. Jana, E.A. Kumar, R.K. Pai, I.P. Jain, Review on large-scale hydrogen storage systems for better sustainability, *Int. J. Hydrogen Energy* 48 (2023) 33223–33259. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.304>.
- [59] J.Q. Li, J.C.L. Li, K. Park, J.T. Kwon, Investigation on the changes of pressure and temperature in high pressure filling of hydrogen storage tank, *Case Studies in Thermal Engineering* 37 (2022) 102143. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102143>.
- [60] D. Tang, G.L. Tan, G.W. Li, J.G. Liang, S.M. Ahmad, A. Bahadur, M. Humayun, H. Ullah, A. Khan, M. Bououdina, State-of-the-art hydrogen generation techniques and storage methods: A critical review, *J. Energy Storage* 64 (2023) 107196. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107196>.
- [61] M.J. Siddiqui, P.K. Balguri, K. Haripriya, A.R. Rajendran, I. V. Patil, Analysis of type IV hydrogen pressure vessel with S-glass, Carbon fiber T700 and Kevlar composite materials, *Mater. Today Proc.* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.036>.

- [62] R. Morales-Ospino, A. Celzard, V. Fierro, Strategies to recover and minimize boil-off losses during liquid hydrogen storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 182 (2023) 113360. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113360>.
- [63] M. Aziz, A. TriWijayanta, A.B.D. Nandiyanto, Ammonia as Effective Hydrogen Storage : A Review on Production, Storage and Utilization, *Energies* 2020, Vol. 13, 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/en13123062>.
- [64] S. Ramadhani, Q.N. Dao, Y. Imanuel, M. Ridwan, H. Sohn, H. Jeong, K. Kim, C.W. Yoon, K.H. Song, Y. Kim, Advances in Catalytic Hydrogenation of Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs) Using High-Purity and Low-Purity Hydrogen, *ChemCatChem* 16 (2024) e202401278. <https://doi.org/10.1002/cctc.202401278>.
- [65] S.P. Safronov, S. V. Vostrikov, A.A. Samarov, P. Wasserscheid, K. Müller, S.P. Verevkin, Comprehensive thermodynamic study of substituted indoles/perhydro indoles as potential liquid organic hydrogen carrier system, *Fuel* 331 (2023) 125764. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125764>.
- [66] E.I. Epelle, W. Obande, G.A. Udourioh, I.C. Afolabi, K.S. Desongu, U. Orivri, B. Gunes, J.A. Okolie, Perspectives and prospects of underground hydrogen storage and natural hydrogen, *Sustain. Energy Fuels* 6 (2022) 3324–3343. <https://doi.org/10.1039/d2se00618a>.
- [67] E. Barbuzza, G. Buceti, A. Pozio, M. Santarelli, S. Tosti, Gasification of wood biomass with renewable hydrogen for the production of synthetic natural gas, *Fuel* 242 (2019) 520–531. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.079>.
- [68] M.H. Huesemann, T.S. Hausmann, B.M. Carter, J.J. Gerschler, J.R. Benemann, Hydrogen Generation Through Indirect Biophotolysis in Batch Cultures of the Nonheterocystous Nitrogen-Fixing Cyanobacterium *Plectonema boryanum*, *Applied Biochemistry and Biotechnology* 2009 162 :1 162 (2009) 208–220. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8741-6>.

- [69] I. Pizzuti, M. Conti, G. Delibra, A. Corsini, A. Castorrini, Energy Storage and Management of Offshore Wind-Based Green Hydrogen Production, *Processes* 2025, Vol. 13, 13 (2025). <https://doi.org/10.3390/pr13030643>.
- [70] J. Ren, G. Xu, H. Zhao, Q. Kang, Wave energy powered reverse osmosis seawater desalination: Research development and future perspective, *Process Safety and Environmental Protection* 203 (2025) 107978. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107978>.
- [71] M. Avesani, Cost-benefit analysis of the offshore wind power transition in the Mediterranean: Towards a “New Eldorado”?, *Open Research Europe* 5 (2025) 66. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.19339.1>.
- [72] O. Bourzgui, M. Nachtane, K. Adeli, A. Faik, A. Boulazhar, D. Saifaoui, Water-energy-hydrogen nexus : Addressing water scarcity in sustainable green hydrogen production, *Results in Engineering* 28 (2025) 108256. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108256>.
- [73] Énergies renouvelables : L’Algérie en route vers les 15000 MW – Portail algérien, (2025). URL : <https://portail.cder.dz/2025/11/11/energies-renouvelables-lalgerie-en-route-vers-les-15000-mw/> (accessed May 18, 2026).
- [74] A. Boudghene Stambouli, Y. Kitamura, M.T. Benmessaoud, N. Yassaa, Algeria’s journey towards a green hydrogen future : Strategies for renewable energy integration and climate commitments, *Int. J. Hydrogen Energy* 58 (2024) 753–763. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.01.119>.
- [75] Loi 02-01 du 22 Dhou El Kaada 1422 correspondant au 5 février 2002 relative à l’électricité et à la distribution du gaz par canalisations – CREG, (2002). URL : <https://creg.gov.dz/fr/loi-02-01-du-22-dhou-el-kaada-1422/> (accessed May 18, 2026).
- [76] Loi n° 02-02 relative à la protection et à la valorisation du littoral., (2002). URL : <https://www.ecolex.org/fr/details/legislation/loi-no-02-02-relative-a-la-protection-et-a-la-valorisation-du-littoral-lex-faoc041674/> (accessed May 18, 2026).
- [77] Loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement impose la réalisation d'une Étude d'Impact Environnemental (EIE). (2003). URL : <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2003/F2003043.pdf> (accessed May 18, 2026)

Références

- [78] Loi n° 04-09 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable (2004). URL : <https://faolex.fao.org/docs/pdf/alg46202.pdf> (accessed May 18, 2026)
- [79] Loi n° 16-09 relative à la promotion de l'investissement définit le cadre juridique général encourageant l'investissement national et étranger (2016). URL: <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2016/F2016046.pdf> (accessed May 18, 2026)
- [80] Convention de Barcelone – milieu marin, (1976). <https://www.milieumarinfrance.fr/convention-de-barcelone> (accessed May 18, 2026).
- [81] Décret n° 96-774 portant publication de la Convention des Nations unies sur le droit de la mer (1996). URL: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000378591> (accessed May 18, 2026).
- [82] Décret n° 63-403 fixant l'étendue des eaux territoriales (1963). URL : <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/1963/F1963076.PDF> (accessed May 18, 2026)
- [83] Décret exécutif n° 13-218 fixant les conditions d'octroi des primes au titre des coûts de diversification de la production d'électricité – CREG, (2013). URL : <https://creg.gov.dz/fr/decret-executif-n-13-218/> (accessed May 18, 2026).
- [84] Décret présidentiel n° 18-96 instituant une zone économique exclusive au large des côtes algériennes. | UNEP Law and Environment Assistance Platform, (2018). URL: <https://leap.unep.org/en/countries/dz/national-legislation/decret-presidentiel-ndeg-18-96-du-2-rajab-1439-correspondant-au> (accessed May 18, 2026).
- [85] Arrêté du 2 Rabie Ethani 1435 correspondant au 2 février 2014 fixant les tarifs d'achat garantis et les conditions de leur application pour l'électricité. (2014). URL : <https://creg.gov.dz/wp-content/uploads/2021/11/2-fevrier-2014-fixant-les-tarifs-d-achat-garantis-eolien.pdf> (accessed May 18, 2026)
- [86] Face au mécanisme européen d'ajustement carbone aux frontières : La transition écologique des industries exportatrices, une nécessité - El Watan, (2026). <https://elwatan.dz/face-au-mecanisme-europeen-dajustement-carbone-aux-frontieres-la->

- [transition-ecologique-des-industries-exportatrices-une-necessite/](#) (accessed May 18, 2026).
- [87] ISO/AWI 19880-11 - Carburant d'hydrogène gazeux — Stations-service -Partie 11 — Partie 11: Pompes à hydrogène liquide haute pression. URL : <https://www.iso.org/fr/standard/92934.html> (accessed May 18, 2026).
- [88] IEC 62282-2-100, Technologies des piles a combustible et électrolyseurs. (2020). URL : <https://webstore.iec.ch/en/publication/59780> (accessed May 18, 2026).
- [89] ISO 22734-1:2025 - Générateurs d'hydrogène utilisant le procédé d'électrolyse de l'eau — Partie 1 : Sécurité. URL : <https://www.iso.org/fr/standard/82766.html> (accessed May 18, 2026).
- [90] Hydrogène pour les véhicules électriques à piles à combustible. URL: <https://fr.airliquide.com/solutions/hydrogene-pour-les-vehicules-electriques-a-piles-a-combustible> (accessed May 18, 2026).
- [91] ISO 14687:2025 - Qualité du carburant hydrogène — Spécification de produit, (2025). URL : <https://www.iso.org/fr/standard/82660.html> (accessed May 18, 2026).
- [92] Règlement délégué (UE) 2023/1184 de la Commission du 10 février 2023 complétant la directive (UE) 2018/2001... - Strada lex Europe, (2023). URL : https://www.stradalex.eu/en/se_src_publ_leg_eur_jo/toc/leg_eur_jo_1_20230620_157/doc/joue_2023.157.01.0011.01 (accessed May 18, 2026).
- [93] Norme internationale IEC 61400-3-1:2019, (2019). URL : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/iec-61400312019/systemes-de-generation-denergie-eolienne-partie-31-exigences-de-conception-/xs134398/250426> (accessed May 18, 2026).
- [94] CEI TS 62600-2:2019 | CEI, (2019). URL : https://webstore-iec-ch.translate.goog/en/publication/62399?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=fr&_x_tr_hl=fr&_x_tr_pto=sge (accessed May 18, 2026).

Références

- [95] Conventions de mers régionales (OSPAR et Barcelone) | PatriNat, centre d'expertise et de données sur le patrimoine naturel. URL : <https://www.patrinat.fr/fr/conventions-de-mers-regionales-ospar-et-barcelone-6253> (accessed May 18, 2026).
- [96] R. Albonetti, L. Manganelli, The Trans-Mediterranean natural gas pipeline, *International Journal of Project Management* 2 (1984) 94–96. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(84\)80007-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(84)80007-1).
- [97] Algérie Presse Service, (2026). URL : <https://www.aps.dz/fr/algerie/education-et-technologie/mkfk0dy6-zerrouki-souligne-l-engagement-du-secteur-a-renforcer-la-souverainete-numerique-nationale> (accessed May 18, 2026).
- [98] Ministère de l'Environnement et de la Qualité de la Vie (n.d.). URL : <https://www.me.gov.dz/fr/la-cote/> (accessed May 18, 2026).
- [99] Loi n° 01-11 relative à la pêche et à l'aquaculture. (2001). URL : https://www.douane.gov.dz/IMG/pdf/loi_no_01-11_du_3_juillet_2001_modifiee_et_completee_relative_a_la_peche_et_a_l_aquaculture_.pdf (accessed May 18, 2026)
- [100] Loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement impose la réalisation d'une Étude d'Impact Environnemental (EIE). (2003). URL : <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2003/F2003043.pdf> (accessed May 18, 2026)
- [101] B. Taormina, J. Bald, A. Want, G. Thouzeau, M. Lejart, N. Desroy, A. Carlier, A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96 (2018) 380–391. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.07.026>.
- [102] I. Galparsoro, I. Menchaca, J.M. Garmendia, Á. Borja, A.D. Maldonado, G. Iglesias, J. Bald, Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms, *Npj Ocean Sustainability* 2022 1:1 1 (2022) 1-. <https://doi.org/10.1038/s44183-022-00003-5>.
- [103] Loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement impose la réalisation d'une Étude d'Impact Environnemental (EIE). (2003). URL : <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2003/F2003043.pdf> (accessed May 18, 2026)

- [104] A study reveals the real length of the coast of Algeria, (2023).
<https://www.agenzianova.com/en/news/a-study-reveals-the-real-length-of-the-Algerian-coast/> (accessed April 5, 2026).
- [105] A study reveals the real length of the coast of Algeria, (2023).
<https://www.agenzianova.com/en/news/a-study-reveals-the-real-length-of-the-Algerian-coast/> (accessed March 31, 2026).
- [106] F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani, A. Recioui, A contribution in the actualization of wind map of Algeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 993–1002.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.025>.
- [107] S.A. Hsu, E.A. Meindl, D.B. Gilhousen, S.A. Hsu, E.A. Meindl, D.B. Gilhousen, Determining the Power-Law Wind-Profile Exponent under Near-Neutral Stability Conditions at Sea., *JApMe* 33 (1994) 757–772. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033).
- [108] Y. Wen, B. Kamranzad, P. Lin, Assessment of long-term offshore wind energy potential in the south and southeast coasts of China based on a 55-year dataset, *Energy* 224 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120225>.
- [109] Q. Gao, S.S. Khan, N. Sergiienko, N. Ertugrul, M. Hemer, M. Negnevitsky, B. Ding, Assessment of wind and wave power characteristic and potential for hybrid exploration in Australia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 168 (2022) 112747.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112747>.
- [110] G. Masters, *Renewable and efficient electric power systems*, (2013). URL:
https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=onT0dkqlqWsC&oi=fnd&pg=PP8&ots=gIE1bve_eS&sig=KP56KUITDXNu9y-_8OYiigNSL_E (accessed March 25, 2026).
- [111] W. Wang, C. Qin, J. Zhang, C. Wen, G. Xu, Correlation analysis of three-parameter Weibull distribution parameters with wind energy characteristics in a semi-urban environment, *Energy Reports* 8 (2022) 8480–8498.
<https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.06.043>.

- [112] B. Ali, G. Abbas, A. Memon, S. Mirsaedi, M.A. Koondhar, S. Chandio, I.A. Channa, A comparative study to analyze wind potential of different wind corridors, *Energy Reports* 9 (2023) 1157–1170. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.12.048>.
- [113] T.P. Chang, Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application, *Appl. Energy* 88 (2011) 272–282. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.06.018>.
- [114] M.S. Adaramola, M. Agelin-Chaab, S.S. Paul, Assessment of wind power generation along the coast of Ghana, *Energy Convers. Manag.* 77 (2014) 61–69. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2013.09.005>.
- [115] A.M. Cornett, A Global Wave Energy Resource Assessment, (2008). <https://dx.doi.org/> (accessed April 11, 2026).
- [116] G. Lavidas, V. Venugopal, A 35 year high-resolution wave atlas for nearshore energy production and economics at the Aegean Sea, *Renew. Energy* 103 (2017) 401–417. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.11.055>.
- [117] G. Besio, L. Mentaschi, A. Mazzino, Wave energy resource assessment in the Mediterranean Sea on the basis of a 35-year hindcast, *Energy* 94 (2016) 50–63. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.10.044>.
- [118] Hemer, M. A., Zieger, S., Durrant, T., O’Grady, J., Hoeke, R. K., McInnes, K. L., & Rosebrock, U. (2017). A revised assessment of Australia’s national wave energy resource. *Renewable Energy*, 114, 85–107. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.08.039>.
- [119] C. Alaoui, Review and assessment of offshore renewable energy resources in morocco’ coastline, *Cogent Eng.* 6 (2019). <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1654659>.
- [120] F. Meziane, M. Debbache, A. Bekhti, Assessing Offshore Wind Resource for Sustainable Energy and Hydrogen Production in the El Kala Coastal Region, *Proceedings - 2023 2nd International Conference on Electronics, Energy and Measurement, IC2EM 2023* (2023). <https://doi.org/10.1109/IC2EM59347.2023.10419396>.
- [121] Global Leader in Sustainable Energy | Vestas. URL : <https://www.vestas.com/en> (accessed June 4, 2026).

Références

- [122] V236-15.0 MWTM. URL : <https://www.vestas.com/en/energy-solutions/offshore-wind-turbines/V236-15MW> (accessed April 19, 2026).
- [123] Vestas V236-15.0 - 15,00 MW - Wind turbine. URL : <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/2317-vestas-v236-15-0> (accessed May 26, 2026).
- [124] Énergie cinétique du vent : comprendre et exploiter. URL : <https://www.energiesavenir.info/energie-cinetique-du-vent-comprendre-et-exploiter/> (accessed April 5, 2026).
- [125] Nsouandélé, J. L., Kidmo Kaoga, D., Djetouda, S. M., & Djongyang, N. (2024). Estimation statistique des données du vent à partir de la distribution de Weibull en vue d'une prédiction de la production de l'énergie électrique d'origine éolienne sur le Mont Tinguelin à Garoua dans le Nord Cameroun. *Journal of Renewable Energies*, 19(2), 291–301. <https://doi.org/10.54966/JREEN.V19I2.568>.
- [126] Nsouandélé, J. L., Kidmo Kaoga, D., Djetouda, S. M., & Djongyang, N. (2024). Estimation statistique des données du vent à partir de la distribution de Weibull en vue d'une prédiction de la production de l'énergie électrique d'origine éolienne sur le Mont Tinguelin à Garoua dans le Nord Cameroun. *Journal of Renewable Energies*, 19(2), 291–301. <https://doi.org/10.54966/JREEN.V19I2.568>.
- [127] Courbe de puissance des éoliennes - Boland Energy. URL: <https://bolandnewenergy.com/fr/wind-turbine-power-curve/> (accessed May 20, 2026).
- [128] S.F. Khahro, K. Tabbassum, A. Mohammad Soomro, X. Liao, M.B. Alvi, L. Dong, M.F. Manzoor, Techno-economical evaluation of wind energy potential and analysis of power generation from wind at Gharo, Sindh Pakistan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35 (2014) 460–474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.027>.
- [129] O. Acosta, P. Mandal, E. Galvan, T. Senjyu, Performance assessment of offshore and onshore wind energy systems to counterpoise residential HVAC loads, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 157 (2024) 109830. <https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2024.109830>.

Références

- [130] InnoEnergy, CorPower C4 WEC. URL : <https://innoenergy.com/portfolio/corpower-ocean/265713/> (accessed May 21, 2026).
- [131] InnoEnergy, CorPower Ocean's C4 successfully demonstrates wave power on a large scale. URL : <https://myshify.com/corpower-ocean-c4-wave-energy-converter/> (accessed May 20, 2026).
- [132] Santiago, I., Liria, P., Garnier, R., Bald, J., Leitao, J., Ribeiro, A., 2023. SafeWave DELIVERABLE 3.3 Marine Dynamic Modelling. Tech. Rep. 3.3, Azti Tecnalia, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.36716.74886>, URL [https://www.safewave-project.eu/project-outputs/..](https://www.safewave-project.eu/project-outputs/)
- [133] Eleventh Conference on Climate Change and Development in Africa | United Nations Economic Commission for Africa. (2013). URL : <https://www.uneca.org/eca-events/CCDA-XI>).
- [134] IEA – International Energy Agency. URL : <https://www.iea.org/> (accessed May 27, 2026).
- [135] Nairobi Climate Change Conference| UNFCCC, (2006). URL: <https://unfccc.int/conference/nairobi-climate-change-conference-november-2006> (accessed May 27, 2026).
- [136] AR5 Synthesis Report: Climate Change — IPCC, (2014). URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (accessed May 27, 2026).
- [137] World Energy Outlook – Analysis - IEA, (2017). URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017> (accessed May 27, 2026).
- [138] Chiffres Clés – CREG. URL : <https://creg.gov.dz/fr/chiffres-cles/> (accessed June 10, 2026) .
- [139] J. Alves Ribeiro, B. Alves Ribeiro, F. Pimenta, S. M.O. Tavares, J. Zhang, F. Ahmed, Offshore wind turbine tower design and optimization: A review and AI-driven future directions, Appl. Energy 397 (2025) 126294. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2025.126294>.

Références

- [140] G. Calado, R. Castro, Hydrogen Production from Offshore Wind Parks: Current Situation and Future Perspectives, *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, 11 (2021).
<https://doi.org/10.3390/APP11125561>.

Annexe

Business model Canvas

Création d'un bureau d'études en ingénierie maritime et énergies renouvelables offshore : HoulEole Ingénierie

Équipe d'encadrement

Pr. Mezouar Khoudir

M. Khamallah Youcef

Équipe de projet

BELMAMOUN Alâa

BRIKI Sahar

CHEURFI Nabil

MEKKI Ahlam

2025-2026

Sommaire

Introduction.....	1
I. Présentation du Projet	1
I.1. Idée du projet (solution proposée)	1
I.2 Les valeurs suggérées	2
I.3 L'équipe (Les Étudiants).....	2
I.4 Les activités clés	3
I.5 Planning de réalisation du projet (PFE).....	5
II. Nature des innovations.....	6
III. Analyse stratégique du marché	6
III.1 Le segment du marché	6
III.2 Mesure de l'intensité de la concurrence.....	8
III.3 La Stratégie Marketing	9
IV. Plan de production et d'organisation	14
IV.1 Le processus de production (Ingénierie et Livrables)	14
IV.1.1 Acquisition et centralisation des données de référence.....	14
IV.1.2 Traitement numérique et analyse statistique (Le Cœur du Procédé).....	14
IV.1.3 Modélisation hydrodynamique et études maritimes standards	15
IV.1.4 Ingénierie de procédés et couplage du Nexus Énergie-Eau-Hydrogène	15
IV.1.5 Conditionnement, emballage et livraison des livrables.....	16
IV.2 L'approvisionnement.....	16
IV.2.1 Politique d'achat.....	16
IV.2.2 Les fournisseurs	17
IV.2.3 Politique de paiement et délai de réception.....	17
IV.3 Main d'œuvre	18

IV.4 Les principaux partenaires	18
V. Plans financier.....	Error! Bookmark not defined.
VI. Faisabilité Technique et Modèle Pilote (Avant-Projet).....	22
VI.1 Objectif du Modèle Pilote.....	23
____VI.2 Préparation et Structure de la Méthodologie	23
____VI.3 Limites du Projet et Perspectives du Futur Bureau d'Études	23
VII. Canva Bmc	25

Introduction

L'Algérie, traditionnellement positionnée comme un acteur majeur des énergies fossiles en Méditerranée, se trouve aujourd'hui à un tournant stratégique de son histoire énergétique. Face à l'impératif mondial de décarbonation et à la nécessité de diversifier son économie, le pays dispose d'un atout considérable : un littoral de plus de 2148 km doté d'un potentiel en énergies marines renouvelables (EMR) encore largement inexploité. Si l'accent a jusqu'à présent été mis sur le solaire terrestre, les technologies offshore notamment l'éolien en mer et l'énergie houlomotrice (énergie des vagues) offrent des perspectives industrielles et énergétiques exceptionnelles.

Ces ressources marines représentent une opportunité unique pour propulser la transition vers l'hydrogène vert, un vecteur énergétique d'avenir pour lequel l'Algérie ambitionne de devenir un hub régional à destination de l'Europe. Cependant, le développement d'installations offshore de grande envergure nécessite une maîtrise parfaite des conditions météo-océaniques, des contraintes géotechniques et des impacts environnementaux. C'est dans ce contexte que s'inscrit la création de notre bureau d'études spécialisé. En combinant l'évaluation de pointe des potentiels éolien et houlomoteur avec des prestations d'ingénierie et d'études maritimes standards, notre structure vise à devenir le partenaire technique de référence pour les développeurs, les industriels et les institutions publiques engagés dans l'économie bleue en Algérie.

I. Présentation du Projet

I.1. Idée du projet (solution proposée)

HoulEole ingénierie est un bureau d'études et de conseil basé à Alger, structuré sous la forme juridique d'une SARL et agréé par le Centre National du Registre du Commerce (CNRC) sous le **code d'activité 607007 – Bureau d'ingénierie et d'études techniques**. Dans le domaine de l'ingénierie et du conseil en énergies marines et environnement. Né du constat des limites des méthodes conventionnelles en Algérie souvent coûteuses, gourmandes en énergie et freinées par un manque crucial de données actualisées et d'expertise locale intégrée, ce projet pionnier apporte une alternative hautement écologique, économique et durable. En combinant des campagnes de mesures *in situ* de haute précision avec des outils de modélisation numérique avancés (tels que MIKE 21, SWAN) et des solutions géospatiales de pointe (ArcGIS Pro, Python), l'entreprise traduit les données brutes de vent, de vagues et de courants en cartographies opérationnelles et analyses

de productible fiables. Le cœur de métier de **HoulEole ingénierie** réside dans la validation de la faisabilité technique et de la viabilité économique de projets complexes et innovants le long du littoral algérien notamment le couplage de parcs hybrides offshore (éolien et houlomoteur) avec des unités de dessalement d'eau de mer ou des électrolyseurs pour la production d'hydrogène vert tout en garantissant la maîtrise des études maritimes standards indispensables à tout aménagement côtier, telles que l'hydrodynamique, la sédimentologie et l'évaluation des impacts environnementaux.

I.2 Les valeurs suggérées

Notre bureau d'études fonde sa proposition de valeur sur quatre piliers fondamentaux :

- **Précision et Rigueur Scientifique** : Utilisation de modèles numériques de pointe et de données historiques fiables (réanalyses multi-décennales) pour minimiser les risques d'investissement des développeurs (réduction des incertitudes sur le LCOE/LCOH).
- **Souveraineté Énergétique et Expertise Locale** : Offrir une alternative locale aux cabinets de conseil étrangers, réduisant ainsi les coûts pour nos clients tout en développant un savoir-faire algérien hautement qualifié.
- **Innovation Durable** : Promouvoir des solutions hybrides innovantes et respectueuses des écosystèmes marins et littoraux (préservation de la biodiversité, gestion de la dynamique sédimentaire).
- **Approche Clé en Main** : Accompagner le client de la phase de préfaisabilité et d'identification des sites pilotes jusqu'à l'assistance technique lors de la phase de conception.

I.3 L'équipe (Les Étudiants)

Ce projet de fin d'études est mené par un groupe d'étudiants de la spécialité Génie Côtier et Aménagement du Littoral de l'ENSSMAL. Chaque membre apporte une expertise complémentaire et des compétences consolidées tout au long d'un cursus rigoureux, renforcé par des applications pratiques et une vision stratégique du domaine marin et de l'énergie offshore :

- **BELMAMOUN ALAA** : Dotée d'une expertise pointue en géomatique, elle est spécialisée dans la cartographie numérique et la mise en œuvre des Systèmes d'Information

Géographique (SIG). Son travail de fin d'études lui a permis de consolider des compétences pratiques de haut niveau dans le traitement de données spatiales et le développement d'outils de visualisation. Elle maîtrise l'élaboration de modèles d'aide à la décision, essentiels pour cartographier les zones d'exclusion et identifier avec exactitude les sites d'implantation potentiels du projet.

- **BRIKI SAHAR** : Spécialisée dans les aspects de l'aménagement du littoral et de la gestion intégrée des zones côtières, elle a développé une expertise approfondie dans l'analyse réglementaire et l'évaluation de la vulnérabilité des côtes. Son parcours lui permet d'anticiper et de mesurer avec rigueur les impacts environnementaux des installations marines. Grâce à sa maîtrise des cadres légaux et des critères de durabilité, elle veille à la parfaite intégration écologique et administrative des solutions proposées.
- **CHERFII NABIL** : Passionné par les technologies marines renouvelables, il s'est spécialisé dans le volet énergétique offshore et la transition bas-carbone. Ses compétences techniques englobent le traitement avancé des bases de données météo-océaniques et la configuration technique des systèmes hybrides (éolien et houlomoteur). Son esprit d'analyse et sa maîtrise des calculs de productibilité énergétique lui permettent de concevoir des architectures d'approvisionnement optimales et adaptées aux conditions marines réelles.
- **MEKKI AHLEM** : Au cours de son cursus en ingénierie côtière, il a acquis des compétences pointues en dynamique sédimentaire et océanique. Chargé principalement de l'analyse des processus hydrodynamiques, de la modélisation de la propagation de la houle et des interactions fluide-structure en zone côtière, ses travaux s'appuient sur une solide maîtrise des outils de simulation. Ses expériences académiques et pratiques lui permettent d'évaluer avec précision le comportement des structures marines face aux forces météo-océaniques, un élément clé pour garantir la viabilité technique du projet.

L'équipe a su conjuguer ces compétences techniques spécialisées avec une approche transverse de la gestion de projet et une sensibilité aux enjeux d'innovation, garantissant ainsi une exécution efficace, scientifique et structurée de ce projet d'aménagement et d'énergie offshore.

I.4 Les activités clés

Dans le cadre de ce mémoire, nos activités se structurent autour de cinq axes principaux :

- **Caractérisation du Climat Maritime** : Analyse des chroniques de houles et de vents (données de bouées, réanalyses) pour déterminer le potentiel énergétique brut.
- **Modélisation Numérique Côtière** : Simulation de la transformation des vagues du large vers la côte (réfraction, déferlement) pour évaluer les sollicitations sur les structures.
- **Cartographie Thématique SIG** : Superposition des contraintes environnementales et techniques (bathymétrie, nature des fonds, zones protégées) pour le choix des sites.
- **Couplage Énergie et Aménagement** : Étude d'impact hydro-sédimentaire du sillage des parcs offshore sur la dynamique sédimentaire des plages adjacentes.
- **Évaluation d'Ingénierie de Procédés** : Analyse conceptuelle de la connexion des systèmes marins aux infrastructures terrestres (dessalement de l'eau, électrolyseurs).

I.5 Planning de réalisation du projet (PFE)

Tableaux I.1 – Planning de réalisation du projet

Phases	Tâches	Durée (Mois)				
		1	2	3	4	5
Phase 1	Élaboration du plan détaillé du projet, analyse des besoins du secteur énergétique algérien, recherche bibliographique sur les EMR (éolien offshore et houlomoteur).	X				
Phase 2	Centralisation et traitement des données météo-océaniques brutes (chroniques de houles/vents) et acquisition des données bathymétriques.	X				
Phase 3	Structuration des bases de données géospatiales sous SIG et exécution des scripts de traitement pour cartographier les contraintes littorales.		X			
Phase 4	Configuration, calibration et exécution des modèles de propagation numérique de la houle du large vers la côte (SWAN, MIKE 21).	X				
Phase 5	Analyse d'impact hydro-sédimentaire, évaluation des Interactions fluide-structure et dimensionnement préliminaire des scénarios d'aménagement.		X			
Phase 6	Évaluation de l'ingénierie de procédés (couplage des parcs aux électrolyseurs pour l'hydrogène vert et aux unités dessalements) et synthèse.	X				

II. Nature des innovations

- **Innovation du marché** : Introduction d'une solution intégrée d'ingénierie numérique et cartographique pour l'évaluation fine du gisement éolien offshore et houlomoteur le long du littoral algérien, répondant à un besoin critique et non satisfait des opérateurs énergétiques nationaux et des investisseurs internationaux pour le développement de la filière hydrogène vert.
- **Innovation incrémentale** : Amélioration continue des algorithmes de calcul (Lois de Weibull) et mise à niveau de nos logiciels de simulation hydrodynamique côtière pour optimiser la précision des livrables et réduire les temps de traitement informatique au fil des projets.
- **Innovation radicale** : Développement de méthodologies d'évaluation basées sur l'hybridation des ressources (couplage éolien flottant et énergie des vagues) combinées à la modélisation du Nexus Énergie-Eau (dessalement direct pour alimentation d'électrolyseurs), offrant une alternative radicale et stable aux études de faisabilité énergétique conventionnelles terrestres.
- **Innovation technologique** : Utilisation d'outils numériques avancés de modélisation côtière spectrale (MIKE 21) et de planification spatiale multicouches sous SIG (ArcGIS Pro) pour concevoir des configurations d'installations offshore hautement performantes, sécurisées face aux tempêtes et respectueuses des zones d'exclusion écologiques ou industrielles.

III. Analyse stratégique du marché

III.1 Le segment du marché

Notre bureau cible quatre segments de clientèle prioritaires :

Segment 1 : Institutions publiques, ministères et agences étatiques : Ministère de l'Énergie, Ministère de l'Hydraulique, Ministère de l'Environnement, SONATRACH, SONELGAZ, APRUE, LEM et ANRH. Ces acteurs majeurs expriment un besoin critique en études de pré faisabilité et en cartographies thématiques pour orienter la feuille de route de la Stratégie Nationale Hydrogène Vert (2040) et planifier l'espace maritime algérien.

Segment 2 : Industriels et développeurs de projets énergétiques : Consortiums nationaux et internationaux souhaitant concevoir et implanter des parcs hybrides offshore (éolien flottant et houlomoteur) couplés à des électrolyseurs ou à des systèmes de dessalement d'eau de mer (SWRO).

Segment 3 : Acteurs des Travaux Publics et aménageurs du littoral : Entreprises de dragage, autorités portuaires et collectivités locales nécessitant des prestations d'ingénierie maritime standard (études de propagation de la houle, conception de digues, modélisation de la sédimentation, études d'impact environnemental).

Segment 4 : Opérateurs de l'eau et du dessalement : L'AEC (*Algerian Energy Company*) et les exploitants de stations de dessalement par osmose inverse. Ils constituent un marché naturel pour nos études de couplage énergétique offshore (visant à décarboner leur procédé très énergivore) et nos diagnostics techniques sur les infrastructures côtières (conduites de prise d'eau de mer et de rejet de saumure face au transport sédimentaire).

III.2 Mesure de l'intensité de la concurrence

Entreprise	Description	Forces	Faiblesses
LEM (Laboratoire d'Études Maritimes)	Entreprise publique algérienne de référence sous tutelle du Ministère des Travaux Publics, spécialisée dans l'ingénierie maritime, portuaire et côtière.	Leader historique incontestable ; accès exclusif aux données bathymétriques et hydrodynamiques d'État ; forte expérience en infrastructures portuaires.	Structure rigide ; focus quasi exclusif sur les travaux publics conventionnels (digues, ports) ; expertise limitée sur les EMR (éolien en mer, houlomoteur).
CNERIB / Centres de Recherche Nationaux	Centres d'études et de recherche étatiques travaillant sur le génie civil, l'aménagement du territoire et le littoral.	Forte base de données techniques ; adossement réglementaire solide ; maîtrise de la géotechnique côtière.	Processus bureaucratiques lents ; missions principalement orientées vers la recherche publique plutôt que l'ingénierie commerciale agile pour le secteur privé.
ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques)	Établissement public cartographiant et analysant les ressources en eau, incluant la frange littorale et le suivi sédimentaire.	Banque de données historiques immense sur l'hydrologie et la dynamique côtière algérienne ; expertise terrain reconnue.	Focalisation historique majeure sur les ressources terrestres (barrages, nappes) ; manque d'outils dédiés aux technologies énergétiques offshore.
Grands Cabinets Privés Algériens (ex: SIDEM ou équivalents ingénierie)	Bureaux d'études nationaux de grande envergure intervenant dans le secteur des infrastructures industrielles et hydrauliques.	Grande flexibilité commerciale ; maîtrise parfaite des études d'impact environnemental (EIE) et des procédures d'agrément en Algérie.	Dépendance technologique vis-à-vis des logiciels étrangers ; compétences centrées sur le terrestre et le dessalement standard sans maîtrise du Nexus EMR-Hydrogène.

III.3 La Stratégie Marketing

Pour atteindre efficacement nos clients et établir une présence solide sur le marché algérien, nous suivrons les étapes suivantes :

- **Participation à des Salons et Foires Industrielles** : Participer à des événements industriels et énergétiques majeurs pour présenter nos solutions d'ingénierie offshore à un public ciblé et établir des contacts stratégiques. Notamment :
 - Salon ERA (Salon International des Énergies Renouvelables, de l'Environnement et du Développement Durable).
 - NAPEC (North African Petroleum Exhibition & Conference — essentiel pour Sonatrach et l'hydrogène vert).
 - SIEE Pollutec (pour le Nexus Eau-Énergie et le contact avec l'AEC et les acteurs du dessalement).
- **Collaborations avec des Institutions Académiques et de Recherche** : Travailler en étroite synergie avec des universités et centres de recherche nationaux d'excellence (ENSSMAL, CDER, USTHB) pour co-développer des méthodologies de calcul, valider la précision de nos modèles numériques côtiers et promouvoir l'expertise locale qualifiée.
- **Partenariats Stratégiques** : Collaborer avec des entités clés et des acteurs du secteur pour intégrer nos expertises maritimes standards et nos études de gisement dans leurs grands projets d'aménagement (ex: partenariats techniques avec des développeurs d'infrastructures ou des bureaux d'études environnementales pour porter ensemble des dossiers d'envergure).
- **Publicité en Ligne** : Utiliser des campagnes ciblées sur LinkedIn Ads et Google Ads en configurant des mots-clés hautement techniques (*LCOE offshore, modélisation MIKE 21 Algérie, production hydrogène vert, étude d'impact littoral*) afin de toucher directement les directeurs techniques, chefs de projets et décideurs des ministères et grands groupes (Sonatrach, Sonelgaz, AEC).
- **Réseaux Sociaux et Présence Digitale** : Créer et maintenir des profils actifs sur LinkedIn (le réseau B2B par excellence) pour partager des livres blancs techniques, des cartographies

thématiques issues de nos simulations, et des notes d'analyse sur la transition énergétique en Méditerranée. Concevoir et mettre en ligne un Site Web Institutionnel vitrine, intégrant un portfolio de nos compétences en hydrodynamique et sédimentologie.

- **Canaux de Distribution** : Vente Directe (B2B) en démarchant et en s'approchant directement des industries cibles, des exploitants de stations de dessalement (SWRO) et des institutions étatiques. Réponse rigoureuse aux appels d'offres nationaux et internationaux pour les études maritimes standards et de planification spatiale.

Programme de fidélisation (HoulEole Elite Partners)

L'objectif de ce programme est d'assurer une satisfaction maximale, d'asseoir notre rôle de partenaire technique de confiance et de garantir la fidélité à long terme de nos clients industriels et institutionnels. Le programme comporte :

- **Système de Points d'Ingénierie** : Les clients accumulent des points pour chaque volume d'études commandé (études maritimes standards ou évaluations de potentiel), où chaque tranche budgétaire contractée annuellement équivaut à un certain nombre de points :
 - **100 points** : 5% de réduction sur une future étude maritime standard (ex: étude sédimentaire ou de propagation de houle).
 - **250 points** : 10% de réduction sur un futur livrable cartographique ou une mise à niveau de modèle numérique.
 - **500 points** : Une journée de consultation et d'audit technique gratuit sur site pour l'optimisation ou le diagnostic d'installations côtières existantes (intake/outfall de dessalement, etc.).
- **Avantages Additionnels** :
 - Les membres du programme bénéficient d'un support technique et d'un traitement prioritaire pour l'exécution rapide de leurs simulations numériques en cas d'urgence (ex : tempête ou alerte érosion).

- Les membres ont un accès exclusif avant-première à nos notes de conjoncture météo-océaniques et à nos bases de données de réanalyses actualisées du littoral algérien.

Plan d'Action Opérationnel

Premier Trimestre (T1)

- Développer et lancer officiellement le site web de Houleole Ingénierie et configurer les profils professionnels sur les réseaux sociaux (LinkedIn).
- Activer les premières campagnes de communication digitale ciblée sur les décideurs de la transition énergétique en Algérie.
- Assurer notre présence et notre visibilité dans les premiers séminaires nationaux liés à l'économie bleue et à l'hydrogène vert.

Deuxième Trimestre (T2)

- Concrétiser et signer les accords de partenariat avec les centres de recherche nationaux (CDER, ENSSMAL) pour consolider notre caution scientifique.
- Organiser des webinaires techniques à destination des ingénieurs du secteur public et privé sur l'apport de la modélisation spectrale (SWAN/MIKE 21) pour la sécurisation des infrastructures en mer.
- Publier une première étude de cas concrète (ex: cartographie du potentiel houlomoteur sur un site pilote de la côte algérienne) sur notre site web et LinkedIn pour démontrer notre savoir-faire.

Troisième Trimestre (T3)

- Développer des relations publiques actives en transmettant des communiqués de presse et des articles de fond dans des revues spécialisées dans l'énergie et le secteur maritime algérien.
- Poursuivre les campagnes de prospection directe (B2B) auprès de Sonatrach, Sonelgaz et l'AEC pour proposer nos services d'évaluation du couplage offshore / hydrogène vert.

- Ajuster les campagnes de publicité en ligne en fonction des performances et des segments de clientèle les plus réactifs.

Quatrième Trimestre (T4)

- Évaluer l'ensemble des performances marketing, analyser le taux de conversion des démarches B2B et mesurer la notoriété acquise par le bureau d'études.
- Recueillir les retours techniques et fonctionnels des premiers clients (notamment sur la clarté de nos atlas SIG et rapports maritimes standards) afin d'ajuster notre offre commerciale.
- Planifier la stratégie de l'année suivante en s'alignant sur les nouvelles opportunités réglementaires et les appels d'offres de la feuille de route nationale de l'hydrogène vert.

Produit

HoulÉole Ingénierie commercialise des prestations intellectuelles spécialisées structurées en trois gammes complémentaires, couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur de l'évaluation ENR maritime jusqu'à la mise en œuvre.

Gamme 1 — Évaluation du Potentiel ENR Maritime

- Études de potentiel éolien offshore : modélisation Weibull, AEP, facteur de charge
- Études de potentiel houlomoteur : flux de puissance (Hs, Te), cartographie littorale
- Modélisation numérique côtière : MIKE 21, SWAN, WAVEWATCH III
- Cartographie SIG géospatiale du littoral algérien (atlas interactifs)
- Mesures in-situ : campagnes bathymétriques, bouées météo-océaniques, lidars

Gamme 2 — Faisabilité Technico-Économique

- Études LCOE (Levelized Cost of Energy) pour parcs éoliens offshore
- Études LCOH (Levelized Cost of Hydrogen) pour la production d'hydrogène vert
- Dimensionnement de parcs hybrides (éolien + houlomoteur + PEM électrolyseur)
- Analyses de corrélation éolien/vague et optimisation du couplage
- Modélisation financière : CRF, VAN, TRI, analyse de sensibilité

Gamme 3 — Conseil, Conformité & Accompagnement

- Évaluations d'Impact Environnemental (EIE) pour installations maritimes
- Conseil réglementaire : Loi 04-09, Loi 02-01, Décret 13-218, ZEE, CBAM/MACF
- Assistance à Maîtrise d'Ouvrage (AMO) — suivi de projet de A à Z

- Rapports exécutifs synthétiques à destination des décideurs et investisseurs

Prix

La politique tarifaire de HoullÉole repose sur une tarification à la valeur (value-based pricing), adaptée à la complexité et à l'impact stratégique de chaque mission. Les prix reflètent l'expertise rare et la valeur générée pour le client (réduction du risque d'investissement, conformité réglementaire, optimisation des sites).

Grille Tarifaire Indicative

Type de prestation	Fourchette indicative (DA)
Étude de potentiel ENR (site unique)	1 500 000 – 3 000 000 DA
Étude de faisabilité complète (LCOE/LCOH)	3 000 000 – 6 000 000 DA
EIE pour installation maritime	2 000 000 – 4 000 000 DA
AMO / Conseil stratégique (forfait annuel)	4 000 000 – 8 000 000 DA
Accès base de données littorale (abonnement)	500 000 – 1 200 000 DA/an
Étude de corrélation éolien/houle multi-sites	2 500 000 – 4 500 000 DA

Politique de Remises et Conditions

- Remise partenariat pluriannuel : 10 à 15% pour contrats de 2 ans et plus
- Remise organismes publics : 10% dans le cadre d'appels d'offres institutionnels
- Programme HoullÉole Elite Partners : fidélisation par système de points d'ingénierie
 - 100 points → 5% de réduction sur une future étude standard
 - 250 points → 10% de réduction sur un livrable cartographique
 - 500 points → Journée d'audit technique gratuit sur site
- Acompte de 30% à la signature, solde à la livraison du rapport final

IV. Plan de production et d'organisation

IV.1 Le processus de production (Ingénierie et Livrables)

Le processus de production des études d'ingénierie numérique, des atlas cartographiques et des analyses de gisements offshore se déroule en plusieurs étapes successives. Ces étapes sont cruciales pour assurer la rigueur scientifique et la haute précision du produit final (rapports et modèles) utilisé par nos clients pour la validation de projets d'hydrogène vert ou d'aménagements côtiers standards.

IV.1.1 Acquisition et centralisation des données de référence

L'acquisition des données météo-océaniques et géospatiales est la première étape cruciale de notre processus. Elle garantit que toutes les informations nécessaires à nos simulations sont disponibles et conformes aux critères de fiabilité requis pour minimiser les incertitudes de projet.

- **Fournisseurs de données et ressources** : Copernicus Marine Service (CMEMS), ECMWF (données de réanalyse globale ERA5), bases bathymétriques GEBCO, NOAA, ainsi que les fiches techniques certifiées des constructeurs d'équipements offshore (Vestas, CorPower Ocean).
- **Contrôle Qualité** : Réception, filtrage et inspection des séries temporelles brutes pour éliminer les valeurs aberrantes (données manquantes, artefacts de mesure) et vérifier leur cohérence physique par rapport au littoral algérien.
- **Stockage et Sécurisation** : Structuration et stockage des bases de données historiques (vent, houle, courants, bathymétrie) sur des serveurs locaux sécurisés et des bases de données géospatiales (Geodatabases sous ArcGIS Pro).

IV.1.2 Traitement numérique et analyse statistique (Le Cœur du Procédé)

Le traitement de la donnée est la phase de transformation où les données brutes sont converties en indicateurs énergétiques et hydrodynamiques opérationnels.

- **Scripts de traitement statistique (Python)** : Exécution de codes Python personnalisés pour ajuster les distributions de vitesse du vent via les lois de Weibull, calculer la variabilité saisonnière et évaluer le productible brut.

- **Génération des indicateurs physiques** : Calcul précis de la puissance houlomotrice, de la direction moyenne des flux et traitement des hauteurs significatives de houle (\$H_s\$) et des périodes de pic.
- **Génération graphique** : Édition automatisée des roses des vents et des roses de houle propres à chaque zone d'étude le long du littoral.
- **Contrôle Qualité** : Vérification mathématique des résultats statistiques par comparaison croisée avec des données locales de bouées in situ si disponibles, afin de valider les modèles de gisement.

IV.1.3 Modélisation hydrodynamique et études maritimes standards

Cette étape intègre la modélisation physique des processus côtiers indispensables à tout aménagement en mer ou couplage industriel.

- **Configuration des modèles spectraux** : Injection de la bathymétrie et des forçages de houle du large dans les logiciels de simulation côtière spectrale (MIKE 21 SW / SWAN).
- **Simulations de propagation** : Exécution des calculs numériques pour simuler la transformation des vagues (réfraction, déferlement, diffraction) à l'approche de la frange côtière.
- **Modélisation de la dynamique sédimentaire** : Évaluation des transits sédimentaires littoraux et de l'impact hydrodynamique du sillage des parcs offshore sur le recul ou l'avancée du trait de côte des plages adjacentes.
- **Contrôle de stabilité du modèle** : Calibration des coefficients de frottement sur le fond et vérification des critères de convergence pour garantir des simulations hydrodynamiques (MIKE 21 HD) hautement réalistes.

IV.1.4 Ingénierie de procédés et couplage du Nexus Énergie-Eau-Hydrogène

- **Conception du couplage technique** : Dimensionnement préliminaire de la configuration des parcs hybrides (éolien flottant et houlomoteur) et modélisation de l'intermittence de la production électrique.

- **Ingénierie du Nexus** : Calcul de la puissance requise pour alimenter les unités de dessalement par osmose inverse (SWRO) et dimensionnement des électrolyseurs industriels pour la production stable d'hydrogène vert.
- **Analyse financière de faisabilité** : Calcul mathématique rigoureux des indicateurs de viabilité : CAPEX, OPEX, LCOE (coût de l'énergie) et LCOH (coût de l'hydrogène), mis en perspective avec les benchmarks internationaux.

IV.1.5 Conditionnement, emballage et livraison des livrables

- **Préparation des Unités de Vente (Rapports Finaux)** : Édition du rapport d'ingénierie final comprenant la synthèse exécutive, les fiches techniques d'implantation par site et les recommandations d'aménagement.
- **Atlas Cartographique** : Compilation et mise en page sous ArcGIS Pro de l'atlas cartographique multicouche, superposant le potentiel énergétique et les zones d'exclusion (zones protégées, câbles sous-marins, couloirs de navigation).
- **Documentation et Archivage numérique** : Emballage numérique comprenant la livraison des rapports au format PDF protégé, les cartes interactives (SIG), les fichiers sources des modèles de houle (DHI) et les scripts Python exécutés. Remise officielle des dossiers en main propre sous format papier relié haute définition et supports de stockage physiques chiffrés lors d'une réunion de restitution.

IV.2 L'approvisionnement

IV.2.1 Politique d'achat

- **La matière première (Données de référence)** : Séries temporelles et données de réanalyse météo-océaniques multi-décennales (vent, houle, courants), données satellitaires haute résolution, données bathymétriques côtières et globales.
- **Matériaux et fournitures (Logiciels et Licences d'ingénierie)** : Licences d'exploitation pour logiciels de modélisation spectrale et hydrodynamique marine, licences de Systèmes d'Information Géographique (SIG), environnements de programmation et bibliothèques géospatiales.

- **Équipement** : Stations de travail (Workstations) haute performance dotée de processeurs multicœurs puissants et de cartes graphiques (GPU) dédiées au calcul intensif, serveurs de stockage de données sécurisés (NAS), traceurs grand format (Plotters) pour l'impression des atlas cartographiques, équipements bureautiques complets et infrastructure réseau.

IV.2.2 Les fournisseurs

- **Fournisseurs de Matières Premières (Bases de données)** : Copernicus Marine Service (CMEMS), ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans), NOAA.
- **Fournisseurs de logiciels et licences** : DHI Group (éditeur de MIKE 21 HD-SW), ESRI France/Algérie (éditeur d'ArcGIS Pro), Python Software Fondation (solutions open-source).
- **Fournisseurs d'équipements informatiques et serveurs** : Enseignes spécialisées de distribution informatique IT en Algérie (ex: Matrix Informatique, EURL High Tech Systems, ou équivalents matériels serveurs Dell/HP Algérie).

IV.2.3 Politique de paiement et délai de réception

- **Politique de Paiement** : Pour optimiser les coûts technologiques et assurer une gestion saine des flux de trésorerie, nous négocierons des contrats de souscription logicielle annuels modulables avec des options de paiement échelonné pour l'acquisition des serveurs informatiques lourds. Nous privilégierons les formules d'abonnements académiques ou "Start-up" auprès des éditeurs (comme ESRI ou DHI) pour réduire le coût des licences initiales, et établirons des accords à long terme pour stabiliser le coût des renouvellements.
- **Délais de Réception** : S'agissant de ressources immatérielles (données et licences logicielles), les délais de réception après paiement sont quasi immédiats (téléchargement et activation des clés d'accès). Pour le matériel informatique lourd (Workstations), nous planifierons les achats un mois avant le démarrage des phases de calcul intensif en collaborant avec des distributeurs locaux garantissant un service après-vente (SAV) rapide pour éviter tout arrêt des serveurs de simulation.

IV.3 Main d'œuvre

Au début du projet, le bureau d'études démarrera avec l'équipe fondatrice issue de l'**ENSSMAL (spécialité Génie Côtier et Aménagement du Littoral)**, composée de quatre ingénieurs spécialisés :

- Un ingénieur expert en Géomatique, SIG et développement Python.
- Un ingénieur expert en Hydrodynamique marine et Modélisation numérique côtière.
- Un ingénieur spécialisé en Systèmes Énergétiques Offshore et Génie des procédés.
- Un ingénieur spécialisé en Aménagement du littoral, Environnement et Cadre réglementaire.

Au cours des six prochaines années, face à la montée en charge des projets nationaux d'hydrogène vert et des demandes d'études maritimes standards, nous recruterons progressivement des ingénieurs juniors en calcul de structures en mer, des techniciens en levés hydrographiques ainsi qu'un responsable du marketing et du développement commercial.

IV.4 Les principaux partenaires

- **Fournisseurs de données et outils** : Copernicus Marine, DHI Group (MIKE 21), ESRI (ArcGIS Pro).
- **Fournisseurs d'équipement de calcul** : Distributeurs officiels de stations de travail haute performance et de serveurs en Algérie.
- **Institutions académiques et de recherche** : **ENSSMAL** (École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral), **CDER** (Centre de Développement des Énergies Renouvelables), USTHB, USTO.
- **Organismes de Régulation et de Certification (Validation des critères)** : Ministère de l'Énergie et des Énergies Renouvelables, Ministère de l'Hydraulique (tutelle de l'ANRH et de l'AEC), Ministère de l'Environnement, CNRC (Centre National du Registre du Commerce).
- **Agences de Communication et Marketing** : Cabinets de conseil en communication digitale B2B basés à Alger (pour le déploiement du site web et de la stratégie LinkedIn).

- **Organismes de soutien à l'entrepreneuriat** : NESDA / ANADE (Agence Nationale d'Appui et de Développement de l'Entrepreneuriat).
- **Organismes de Financement** : ASF (Algerian Startup Fund).
- **Structures d'accompagnement** : Blue Incubator (Incubateur de l'ENSSMAL).

V. Plan financier

TABLEAU V.1 – Les charges des équipements

Matériel	Prix (DA)
Stations de travail haute performance (Workstations GPU)	1,400,000.00
Serveur de stockage sécurisé (NAS) et infrastructure réseau	850,000.00
Licence logicielle de simulation hydrodynamique spectrale (MIKE 21)	3,200,000.00
Licence Système d'Information Géographique (ArcGIS Pro)	950,000.00
Ordinateurs portables professionnels et moniteurs 4K	650,000.00
Traceur grand format (Plotter A0) pour atlas maritimes	450,000.00
Équipements réseau, onduleurs et infrastructure IT	400,000.00
Mobilier de bureau et aménagement de l'espace	350,000.00
Matériel d'arpentage et instrumentation technique de base	500,000.00
Consommables de démarrage (supports, cartouches, papier)	250,000.00
Total	9,000,000.00

TABLEAU V.2 – Les Charges fixes et variables du projet

Nature des Coûts	Catégorie de charge	Prix (DA)
Coûts fixes	Equipements (Maintenance, cloud, licences)	1,200,000.00
Coûts fixes	Local (Loyer annuel du bureau à Alger)	960,000.00
Coûts fixes	Marketing & Abonnements (Salons, prospection B2B)	400,000.00
Coûts fixes	Salaires & Charges (Équipe d'ingénieurs)	7,200,000.00
Coûts variables	Consommables (Supports de stockage, impressions)	300,000.00
Coûts variables	Energie (Électricité serveurs et calcul intensif)	180,000.00

TABLEAU V.3 – Le cout du projet et le prix de vente unitaire

Indicateur	Valeur (DA)
Coût global du projet (Investissement + BFR)	12,500,000.00
Coût unitaire (Coût de revient d'un Homme-Mois)	420,000.00
Prix de vente unitaire moyen (Tarif Homme-Mois)	650,000.00

TABLEAU V.4 – Le volume des ventes prévisionnelles

Mois	Quantite (Unité)	Mois	Quantite (Unité)	Mois
Janvier	2	Janvier	2	Janvier
Février	2	Février	2	Février
Mars	3	Mars	3	Mars
Avril	3	Avril	3	Avril
Mai	4	Mai	4	Mai
Juin	4	Juin	4	Juin
Juillet	5	Juillet	5	Juillet
Août	2	Août	2	Août
Septembre	4	Septembre	4	Septembre
Octobre	5	Octobre	5	Octobre
Novembre	6	Novembre	6	Novembre
Décembre	6	Décembre	6	Décembre
TOTAL	46	TOTAL	46	TOTAL

TABLEAU V.5 – Chiffre d'affaires annuel et dépenses annuelle (DA)

Mois	Quantité (Unité)	CA (Quantité x Prix de vente)	Coût	Résultat
Janvier	2	1,300,000.00	853,000.00	447,000.00
Février	2	1,300,000.00	853,000.00	447,000.00
Mars	3	1,950,000.00	873,500.00	1,076,500.00
Avril	3	1,950,000.00	873,500.00	1,076,500.00
Mai	4	2,600,000.00	894,000.00	1,706,000.00
Juin	4	2,600,000.00	894,000.00	1,706,000.00
Juillet	5	3,250,000.00	914,500.00	2,335,000.00
Août	2	1,300,000.00	853,000.00	447,000.00
Septembre	4	2,600,000.00	894,000.00	1,706,000.00
Octobre	5	3,250,000.00	914,500.00	2,335,000.00
Novembre	6	3,900,000.00	935,000.00	2,965,000.00
Décembre	6	3,900,000.00	935,000.00	2,965,000.00
TOTAL	46	30,000,000.00	10,690,000.00	19,310,000.00

TABLEAU V.6 – La rentabilité

Indicateur de rentabilité	Valeur
Seuil de rentabilité (en DA) /année	9 873 000,00 DA
Seuil de rentabilité (en Unité) /année	15,2 Unités
Seuil de rentabilité (en jour)	120 jours

VI. Faisabilité Technique et Modèle Pilote (Avant-Projet)

Dans le cadre d'un projet de création d'entreprise (bureau d'études *HoulEole Ingénierie*), la phase "prototype" ne correspond pas à un produit physique ou à un système industriel déjà implanté,

mais à la **validation de notre méthodologie de calcul et de notre chaîne de traitement de données** sur un site pilote virtuel le long de la côte algérienne.

VI.1 Objectif du Modèle Pilote

L'objectif est de démontrer la capacité future de notre bureau d'études à traiter de bout en bout une étude d'évaluation de potentiel offshore (éolien/houlomoteur) couplée à des études maritimes standards, en utilisant notre propre chaîne algorithmique (Python/SIG).

VI.2 Préparation et Structure de la Méthodologie

- **Acquisition des données** : La méthodologie repose sur la collecte de données météo-océaniques globales en open-source (Copernicus Marine, ERA5).
- **Traitement statistique** : Développement et validation des scripts de calcul sous Python (lois de Weibull, calcul des flux de puissance) pour automatiser l'analyse des gisements énergétiques.
- **Cartographie SIG** : Structuration de notre base de données géospatiale sous ArcGIS Pro pour cartographier les zones d'exclusion et définir les coordonnées des sites d'implantation potentiels.

VI.3 Limites du Projet et Perspectives du Futur Bureau d'Études

Note de conclusion du projet : En raison du statut de projet de création (bureau d'études non encore établi juridiquement), de **contraintes de temps strictes** liées au calendrier universitaire, et de **l'absence d'accès à des données de terrain *in situ*** (mesures réelles de bouées ou levés bathymétriques fins du littoral algérien), ce travail constitue un **modèle d'avant-projet de préfaisabilité**.

L'accès à des **logiciels d'ingénierie lourds de haute gamme** (tels que la suite commerciale complète MIKE 21 de DHI) ainsi que l'acquisition de données locales de précision feront partie des premiers investissements matériels et partenariats stratégiques (notamment avec le LEM, l'ANRH ou le CDER) dès le lancement officiel et l'ouverture commerciale de notre structure *HoulEole Ingénierie*. Pour l'instant, les outils open-source (Python) et les données satellitaires validés dans ce mémoire prouvent la viabilité technique et scientifique de notre démarche.



Figure 1. Logo du Bureau.

VII. Canva Bmc

1. Partenaires Clés	2. Activités Clés	3. Proposition de Valeur	4. Relations Clients	5. Segments Clients
• Fournisseurs de données & outils : Copernicus Marine, DHI Group (MIKE 21), ESRI (ArcGIS Pro). • Fournisseurs d'équipements : Distributeurs officiels de serveurs et Workstations en Algérie. • Institutions académiques & recherche : ENSSMAL, CDER, USTHB, USTO. • Organismes de régulation : Ministère de l'Énergie, Ministère de l'Hydraulique (ANRH, AEC), Ministère de l'Environnement, CNRC. • Financement & Accompagnement : ASF (Algerian Startup Fund),	• Caractérisation du climat maritime (données de bouées et réanalyses). • Modélisation numérique côtière (simulations hydrodynamiques MIKE 21). • Cartographie thématique SIG & Planification spatiale. • Ingénierie du Nexus (couplage parcs offshore / dessalement / hydrogène vert). • Études maritimes standards (impact hydro-sédimentaire).	• Validation de la faisabilité technique & économique des projets complexes et innovants (éolien offshore, houlomoteur) sur le littoral algérien. • Souveraineté & Expertise locale : Alternative nationale de haute précision face aux cabinets étrangers. • Réduction du risque financier (minimisation des incertitudes sur le LCOE / LCOH). • Approche clé en main : de la pré-faisabilité à l'assistance technique.	Programme de fidélisation (HoulEole Elite Partners) via un système de points : • 100 pts : 5% de réduction sur une future étude standard. • 250 pts : 10% de réduction sur un livrable cartographique. • 500 pts : 1 journée d'audit technique gratuit sur site (Intake/Outfall dessalement). • Avantages additionnels : Support prioritaire en cas d'urgence littorale et accès anticipé aux bases de données.	• Segment 1 : Institutions & Agences étatiques (Ministère de l'Énergie/Hydraulique, SONATRACH, SONELGAZ, AEC, ANRH, LEM). • Segment 2 : Industriels & Développeurs énergétiques (Consortiums pour parcs hybrides offshore couplés à des électrolyseurs). • Segment 3 : Aménageurs du littoral & Travaux Publics (Autorités portuaires, dragage, digues).

NESDA / ANADE, Blue Incubator (ENSSMAL).

6. Ressources Clés

- Humaines : Équipe de 4 ingénieurs spécialisés ENSSMAL (Géomatique, Hydrodynamique, Énergie offshore, Réglementation).
- Technologiques : Logiciels MIKE 21 et ArcGIS Pro ; scripts Python de traitement.
- Matérielles : Stations de calcul GPU, serveurs NAS sécurisés, Traceur A0.
- Matière première : Séries temporelles météo-océaniques multi-décennales et bathymétrie.

7. Canaux

- Vente Directe (B2B) : Démarchage de grands comptes et réponse aux appels d'offres publics/privés.
- Salons & Foires : Présence stratégique aux salons ERA, NAPEC et SIEE Pollutec.
- Présence Digitale : Campagnes LinkedIn Ads ciblées et site web vitrine avec portfolio d'études.

- Segment 4 : Opérateurs de l'eau (AEC, exploitants de stations de dessalement par osmose inverse).

8. Structure des Coûts

Investissements Équipements initiaux : 9 000 000,00 DA

- Stations de travail GPU (Calcul intensif) : 1 400 000,00 DA
- Serveur NAS & Réseau sécurisé : 850 000,00 DA
- Licence annuelle MIKE 21 : 3 200 000,00 DA
- Licence annuelle ArcGIS Pro Advanced : 950 000,00 DA
- Ordinateurs portables & Écrans 4K : 650 000,00 DA
- Traceur grand format (Plotter A0) : 450 000,00 DA
- Équipements réseau, onduleurs, mobilier : 750 000,00 DA
- Matériel d'arpentage et instrumentation de base : 500 000,00 DA
- Consommables de démarrage : 250 000,00 DA

Charges d'Exploitation Annuelles :

- Coûts fixes (Salaires équipe 3 ingénieurs, loyer Alger, maintenance, marketing) : 9 760 000,00 DA
- Coûts variables (Énergie calcul intensif, stockage, déplacements littoraux) : 800 000,00 DA

TOTAL COÛT GLOBAL DU PROJET (Investissement + BFR) : 12 500 000,00 DA

9. Flux de Revenus

- Vente de contrats d'études d'ingénierie et de modélisation côtière facturés sur la base d'unités d'ingénierie (Homme-Mois).
- Prix de vente unitaire moyen : 650 000,00 DA / Homme-Mois.
- Volume annuel prévisionnel : 46 unités vendues (réparties sur les différents contrats de l'année).
- Revenus complémentaires : Prestations d'audits techniques rapides sur site, levés sédimentaires ou édition d'atlas cartographiques thématiques spécifiques.

CHIFFRE D'AFFAIRES ANNUEL PRÉVISIONNEL : 30 000 000,00 DA

Résumé: Ce travail évalue un système hybride éolien-houlomoteur offshore (159 MW) sur le littoral algérien pour la production d'hydrogène vert, à partir de l'analyse de 20 sites côtiers sur 30 ans (1992–2022). Les sites S12 (Cap Djinet) et S18 (Golfe d'Annaba) sont sélectionnés comme sites pilotes. L'analyse technico-économique sur 25 ans donne un LCOH de 8,88 USD/kg (S12) et 9,55 USD/kg (S18), avec des émissions évitées de 304 785 et 282 181 tCO₂eq/an. Les résultats confirment la faisabilité technique et la pertinence environnementale du projet, tout en identifiant les leviers de réduction des coûts vers une production d'hydrogène vert compétitive.

Mots-clés: énergie éolienne offshore, énergie houlomotrice, système hybride, hydrogène vert, LCOE, LCOH, Algérie, MIKE 21, ArcGIS Pro, Python, CorPower C4, Vestas V236.

Abstract: This study assesses a hybrid offshore wind-wave energy system (159 MW) along the Algerian Mediterranean coast for green hydrogen production, based on the analysis of 20 coastal sites over 30 years (1992–2022). Sites S12 (Cap Djinet) and S18 (Gulf of Annaba) are selected as pilot sites. The 25-year techno-economic analysis yields a LCOH of 8.88 USD/kg (S12) and 9.55 USD/kg (S18), with avoided emissions of 304,785 and 282,181 tCO₂eq/yr. Results confirm the technical feasibility and environmental relevance of the project, while identifying cost-reduction pathways toward competitive green hydrogen production.

Keywords : offshore wind energy, wave energy, hybrid system, green hydrogen, LCOE, LCOH, Algeria, MIKE 21, ArcGIS Pro, Python, CorPower C4, Vestas V236.

ملخص: تقم هذه الدراسة نظاماً هجيناً بحرياً يجمع بين طاقة الرياح وطاقة الأمواج (159 ميغاواط) على طول الساحل الجزائري المتوسطي، بهدف إنتاج الهيدروجين الأخضر، وذلك استناداً إلى تحليل 20 موقعاً ساحلياً على مدى 30 عاماً (1992–2022). تم اختيار الموقعين S12 (رأس جنات، بومرداس) وS18 (خليج عنابة) كموقعين تجريبيين. تُعطي الدراسة التقنية-الاقتصادية على مدى 25 عاماً تكلفةً مُسوَّاةً للهيدروجين تبلغ 8,88 دولار/كغ (S12) و9,55 دولار/كغ (S18)، مع انبعاثات مُتجنَّبة تُقدَّر بـ 304 785 و282 181 طن CO₂ مكافئ/سنة. تؤكد النتائج الجدوى التقنية والأهمية البيئية للمشروع، مع تحديد مسارات خفض التكاليف نحو إنتاج هيدروجين أخضر تنافسي.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح البحرية، طاقة الأمواج، النظام الهجين، الهيدروجين الأخضر، LCOE، LCOH، الجزائر، Vestas V236، CorPower C4، Python، ArcGIS Pro، MIKE 21