République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire

Mémoire :

Pour l'obtention du diplôme de Master En Géographie et Aménagement du territoire

Spécialité : Géomatique.

Implantation des sites éoliens à l'aide des SIG et d'AMC : Cas d'étude de la plaine de Mletta.

Présenté par :

MAKHLOUFI Mouatez Billah Mohammed Ali

FETAISSA Hachem Abdoullah

Devant le jury composé de :

SEGHIRI Hicham	Maître assistant A	Président
SIDI YKHLEF Soraya	Maître assistante A	Encadrante
ALLAL Nadir Elouasini	Maître assistante A	Examinateur

Année Universitaire 2025-2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions **Allah Tout-Puissant** qui nous a accordé la force, la patience et la santé nécessaires pour mener à bien ce travail et franchir les étapes de notre parcours universitaire.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre **encadrante**,
Madame **Soraya SIDI YKHLEF**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son accompagnement constant tout au long de ce projet. Ses orientations nous ont permis d'avancer avec confiance et rigueur.

Nous tenons également à remercier Monsieur **SEGHIRI Hicham**, président du jury, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider notre soutenance, ainsi que Monsieur **ALLAL Nadir Elouasini**, examinateur, pour l'intérêt porté à notre travail et ses remarques constructives.

Nos remerciements s'adressent aussi à Madame **GOURINE Farida**, Cheffe de notre Département, pour son soutien et son engagement envers les étudiants. Nous remercions également Monsieur **Mohamed El Amine Benkheira**, pour ses encouragements constants et le temps qu'il nous a consacré afin de nous pousser à donner le meilleur de nous-mêmes.

Nous exprimons aussi notre gratitude à Madame **Cherif Nacera**, Responsable de la cartothèque, ainsi qu'au **staff de la bibliothèque**, pour leur disponibilité et leur aide précieuse.

Nous souhaitons exprimer toute notre reconnaissance à nos **parents**, pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur patience, qui ont été une source de motivation essentielle dans la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également nos **familles**, pour leur soutien tout au long de ce parcours.

Enfin, nous remercions nos **amis et camarades**, pour leur aide et leur présence bienveillante. Nous tenons à dédier une mention spéciale à notre ami **Zerbita Mehdi Bidjed**, pour son aide précieuse, ainsi qu'à notre ami **Noufel Boukli Hacen**, pour son soutien et ses encouragements.

Nous considérons ces amis comme de véritables **frères que la vie nous a offerts**, et leur présence à nos côtés a été une source de force et de motivation tout au long de ce parcours.

À toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, nous exprimons ici notre gratitude et notre profond respect.

Résumé :

Ce mémoire propose une méthodologie géomatique intégrée pour l'identification du site optimal d'implantation d'un parc éolien dans la plaine de Mletta à la wilaya d'Oran en Algérie. S'appuyant sur le logiciel ArcMap 10.8 et des données climatiques ERA5, l'étude combine deux méthodes d'analyse multicritère — AHP et TOPSIS — implémentées sous forme d'extensions Python personnalisées. Quatre critères physiques sont évalués : la vitesse du vent (poids 70 %), l'altitude (15 %), l'exposition des versants (10 %) et la pente du terrain (5 %). Après application d'un masque d'exclusion réglementaire droits de servitude (zones bâties et Sebkha d'Oran), les deux modèles convergent à plus de 90 % sur les zones de très haute aptitude. Un algorithme d'implantation automatisée positionne ensuite 300 aérogénérateurs en respectant un espacement de 5D (500 m), pour une puissance installée totale de 750 MW. Ces résultats confirment le fort potentiel éolien de la plaine de la Mletta et sa contribution stratégique aux objectifs nationaux de 22 000 MW d'énergie renouvelable à l'horizon 2030.

Afin de valoriser et de rendre exploitables ces résultats, nous avons développé la plateforme web d'aide à la décision spatiale WebGIS FMGeoTOPSIS. Ce système permet de centraliser, traiter et visualiser de manière interactive les données multicritères et le maillage des scores d'aptitude. Un assistant intelligent (IA) y est intégré sous forme de chatbot pour guider l'utilisateur dans l'interprétation des critères, calculer des distances géographiques exactes et appliquer dynamiquement de nouvelles pondérations sur le tableau de bord. En guise de perspectives, ce travail pose les jalons d'un outil universel, commercialisable et entièrement automatisé, capable de convertir directement les rasters d'aptitude en implantations vectorielles sur n'importe quel territoire.

Mots-clés : Énergie éolienne - Transition énergétique - SIG - AMC - AHP - TOPSIS - ArcMap - Plateforme Web - Assistant IA - Plaine de Mletta.

Abstract:

This thesis presents an integrated geospatial methodology for identifying the optimal site for a wind farm in the Mletta plain, located in the province of Oran, Algeria. Using ArcMap 10.8 and ERA5 climate reanalysis data, the study combines two multi-criteria decision-making methods — AHP and TOPSIS — implemented as custom Python extensions. Four physical criteria are assessed: wind speed (70% weight), altitude (15%), slope aspect (10%), and terrain slope (5%). After applying a regulatory exclusion mask and Easement (built-up areas and the Sebkha of Oran), both models converge on the highest-suitability zones with over 90% geographic agreement. An automated placement algorithm then positions 300 wind turbines with a minimum spacing of 5D (500 m), yielding a total installed capacity of 750 MW. These results confirm the outstanding wind potential of the Mletta plain and its strategic contribution to Algeria's national target of 22,000 MW of renewable energy by 2030.

To leverage these results and make them operational, we developed WebGIS FMGeoTOPSIS, a spatial decision-support web platform designed to centralize, process, and interactively visualize the multi-criteria data and suitability score grids. An AI assistant (LLM) is embedded as a chatbot to guide users through criteria interpretation, calculate precise geographical distances, and dynamically update weight settings directly on the dashboard. As a future outlook, this work lays the foundation for a universal, commercial, and fully automated web tool capable of converting suitability rasters into direct vector turbine layouts on any imported territory.

Keywords: Wind energy - Energy transition - GIS - MCDA - AHP - TOPSIS - ArcMap - Web Platform - AI Assistant - Mletta plain.

ملخص:

تقدم هذه المذكرة منهجية جيومكانية متكاملة لتحديد الموقع الأمثل لإنشاء حقل لطاقة الرياح في سهل ملاّتة بولاية وهران في الجزائر. بالاعتماد على برنامج ArcMap 10.8 وبيانات إعادة التحليل المناخي ، تجمع الدراسة بين طريقتين للتحليل متعدد المعايير لاتخاذ القرار — AHP وTOPSIS — تم تطبيقهما عبر امتدادات برمجية مخصصة بلغة Python. يتضمن النموذج تقييم أربعة معايير فيزيائية رئيسية: سرعة الرياح (بوزن نسبي 70%)، الارتفاع (15%)، توجيه المنحدرات (10%)، وانحدار التضاريس (5%). بعد تطبيق قناع الاستبعاد القانوني والتنظيمي و حقوق الأرتفاق (المناطق العمرانية وسبخة وهران)، حقق كلا النموذجين تقارباً جغرافياً يتجاوز 90% في تحديد المناطق ذات الملاءمة العالية جداً. إثر ذلك، قامت خوارزمية التوطين الآلي بتوزيع 300 توربينة رياح مع مراعاة مسافة فاصلة لا تقل عن 5 أضعاف قطر الدوّار (500 م)، ليبلغ إجمالي القدرة المركبة 750 ميغاواط. وتؤكد هذه النتائج الإمكانات الريحية الاستثنائية لسهل ملاّتة ومساهمته الاستراتيجية في تحقيق الهدف الوطني البالغ 22,000 ميغاواط من الطاقة المتجددة بحلول عام 2030.

وتثميناً لهذه النتائج ولجعلها قابلة للاستغلال عملياً، قمنا بتطوير منصة *GeoTOPSIS* الرقمية للمساعدة على اتخاذ القرار المكاني عبر الويب، والتي تتيح مركزة البيانات متعددة المعايير، معالجتها، وتصوير شبكة نقاط تقييم االملاءمة بشكل تفاعلي. كما تم دمج مساعد ذكي (IA) في المنصة على شكل نظام حوار (Chatbot) لمساعدة المستخدم في تفسير المعايير، وحساب المسافات الجغرافية الدقيقة، وتحديث أوزان المعايير ديناميكياً على لوحة التحكم. وتتطلع آفاق هذا البحث إلى ترقية المنصة كخدمة ويب عالمية، قابلة للتسويق ومؤتمتة بالكامل لتحويل نتائج الراستر (Raster) إلى بيانات(Vector) وتوطين التوربينات مباشرة على أي إقليم.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح – التحول الطاقوي – نظم المعلومات الجغرافية (SIG) – التحليل متعدد المعايير AHP – (AMC) TOPSIS – ArcMap – – منصة ويب – مساعد ذكي – سهل ملاّتة.

Sommaire

Remerciements……1
Résumés ……2
Sommaire .. ……4
Liste des Figures ……7
Liste des Tableaux :……8
Introduction
Générale……..……..…..10

Chapitre 1 Les énergies renouvelables ….....…….....12

1.2 Définition des énergies renouvelables 13
1.3 Rôle des énergies renouvelables dans la transition énergétique 13
1.4 Importance mondiale et nationale 15
1.5 Comparaison Energie renouvelable / énergies fossiles 16
1.6 Types principaux d'énergies renouvelables 17
1.6.1 Énergie solaire 18
1.6.2 Énergie éolienne 19
1.6.3 Énergie hydraulique …….…..…..20
1.6.4 Biomasse 21
1.6.5 Géothermie 22
1.7 Importance et potentiel des énergies renouvelables en Algérie 23
1.8 Objectifs stratégiques de l'Algérie (2030 – 2050) 24
1.9 Projets réalisés et projets en cours 25
1.9.1 Limites et obstacles 26
1.10 Concepts fondamentaux liés à l'énergie éolienne 26
1.10.1 Principe de conversion énergétique ……26
1.10.2 Paramètres physiques essentiels : Vitesse, densité et turbulence …….. 27
1.10.3 Carte du potentiel éolien en Algérie……27
1.10.4 Contraintes techniques, environnementales et sociales 28
1.11 Fonctionnement d'une éolienne 28
1.11.1 Composantes principales ……29
1.11.2 Principe de conversion 30
1.12 Classification des éoliennes 30
1.13 Avantages et limites de l'énergie éolienne. 32
1.13.1 les avantages ……32
1.13.2 Limites et contraintes de l'énergie éolienn……...32
1.14 Cadre juridique et réglementaire de l'implantation éolienne .....……..33
1.14.1 les lois Nationales et objectifs stratégique……..33
1.14.2 Réglementation environnementale…..……..33
1.14.3 Normes de distance et d'implantation……...…….33
1.14.4 Gestion foncière et réversibilité……34
1.15 Conclusion :…….....34

Chapitre 2 Cadre Méthodologique: SIG et Analyse Multi-critère……...35

2.1 Introduction 36

2.2 Le Système d'Information Géographique (SIG)……...**36**

2.2.1 Définition et rôle du SIG 36

2.2.2 Les composantes d'un SIG 37

2.2.3 Modes de représentations et types de données utilisées..... 38

2.2.4 La superposition de couches (Overlay)..... 39

2.2.5 L'Analyse Spatiale et les Géo-traitements..... 39

2.3 Les Méthodes d'Analyse Multicritère (AMC)..... **40**

2.3.1 La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) 40

2.3.2 La méthode TOPSIS 41

2.4 Vers une approche intégrée SIG-AMC..... 41

2.5 Conclusion..... 42

Chapitre 3 Présentation de la zone d'étude ……..……...43

3.1 Introduction……..……44

3.2 Présentation du contexte géographique de la plaine de Mletta……..…….44

3.3 Cadre physique et naturel…...…….45

3.3.1 Les Altitudes……45

3.3.2 Les Pentes……46

3.3.3 L'Exposition…….……47

3.4 Cadre climatique……..……48

3.4.1 Les Vents…….…….48

3.4.2 Modélisation algorithmique et structuration de la base de données éolienne ERA5……50

3.5 Cadre physique et facteurs d'éligibilité techniques..... 52

3.5.1 La Géologie..... 52

3.6 Cadre humains et contraintes environnementales d'exclusion..... 53

3.6.1 L'Occupation du Sol……..……..53

3.6.2 Les zones de retrait (Carte des contraintes légales et environnementales) :…….….54

3.7 Conclusion :…….……..…..…….55

Chapitre 4 ……Approche méthodologique et conceptuelle……..**56**

4.1 Introduction ……57

4.2 Prétraitement et cartographie des contraintes……..57

4.2.1 Vectorisation des données d'occupation du sol……..57

4.2.2 Modélisation Des Zones Tampons (Buffers)……...58
4.2.3 Sélection et intégration des quatre critères de décision…….59
4.3. Standardisation et reclassification thématique des critères d'entrée…….59
4.4 Analyse multicritère via l'extension "TOPSIS"……61
4.4.1. Développement de l'outil TOPSIS ……61
4.4.2 Normalisation et traitement des critères ……62
4.5. Validation par la méthode AHP ……62
4.5.1 Conception et développement de l'exception AHP ……63
4.5.2 Matrice de Saaty et calcul de la cohérence ……63
4.5.3. Conception de l'outil d'implantation :……65
4.6 Conclusion ……..…….....65
Chapitre 5 ……Résultats, applications et discussions.……..66
5.1 Introduction 67
5.2 Cartographie des contraintes et préparation du foncier 67
5.2.1. Restitution du Buffering et du masque d'exclusion absolu…….....67
5.2.2. Planche cartographique des critères reclassifiés et découpés…….68
5.3. Restitution et convergence des modèles décisionnels..... 70
5.3.1. Restitution cartographique du modèle TOPSIS…….70
5.3.2. Restitution cartographique du modèle AHP……..70
5.3.3. Analyse comparative en vis-à-vis et sélection du site optimal……..71
5.4. Simulation et plan d'implantation des éoliennes..... 72
5.4.1. Spécifications techniques et contraintes d'espacement……73
5.4.2. Restitution du plan d'implantation automatique…….73
5.5. Déploiement web et diffusion : le site internet du projet..... 75
5.6 Discussion des résultats et analyse de faisabilité ……78
5.6.1. Fiabilité et convergence de la double approche (TOPSIS Vs AHP) 78
5.6.2. Apport de l'automatisation Python et du WebGIS..... 78
5.7 Conclusion……..……79
Conclusion Générale : 81
Références documentaires. 84

Liste des figures

Figure.1.1 : Principales sources d'énergie renouvelable et non renouvelables…….....….13

Figure.1.2 : Schéma de la transition d'un système énergétique ……..……14

Figure 1.3 : Production électrique issue des énergies renouvelables en 2023…….16

Figure 1.4 : Les différentes filières de production d'énergie renouvelable. ……..…….17

Figure 1.5 : Schéma de principe de l'énergie solaire photovoltaïque. ……...…….18

Figure 1.6 : Schéma de principe de l'énergie solaire thermique. ……..…….19

Figure 1.7 : Schéma de principe d'une éolienne. …….…..….20

Figure 1.8 : Schéma de principe de L'énergie hydraulique. …….…….…….21

Figure 1.9 : Schéma de principe de L'énergie de Biomasse. ……..…..….22

Figure 1.10 : Schéma de principe de L'énergie Géothermie. ……..…..…….…..….23

Figure 1.11 : Première ferme éolienne en Algérie d'Adrar ……..…...25

Figure 1.12 : Carte annuelle des vents (m/s) à 100 m du sol. …….…….27

Figure 1.13 : Structure et principaux éléments d'une éolienne. …….29

Figure 1.14 : Classification des éoliennes selon l'orientation de l'axe de rotation. ……..…….31

Figure 2.1 : Les cinq composantes fondamentales d'un Système d'Information Géographique ……..…37

Figure 2.2 : Les modes de représentation dans les S.I.G…….....….38

Figure 2.3 : Principe de la superposition de couches thématiques……...…….…….39

Figure 2.4 : Relations spatiales entre objets géographiques……...….40

Figure 3.1 : Carte de situation géographique et délimitation de la plaine de la Mletta. ...……..….44

Figure 3.2 : Carte des altitudes de la zone d'étude. …….....….45

Figure 3.3 : Carte des pentes de la plaine de la Mletta. ……..……46

Figure 3.4 : Carte de l'exposition des versants. ……..47

Figure 3.5 : Répartition spatiale de la vitesse et de la direction des vents dominants……...….49

Figure 3.6 : Rose des vents de la plaine de la Mletta. …….49

Figure 3.7 : Carte géologique de la plaine de la Mletta……..52

Figure 3.8 : Carte de l'occupation du sol de la plaine de Mletta. …….…….54

Figure 3.9 : Carte des contraintes d'aménagement…….…..….55

Figure 4.1 : Fenêtre de configuration de l'outil de géo-traitement Buffer sous ArcMap. …….58

Figure 4.2 : Exemple de reclassification thématique des critères sous ArcMap 10.8. ……..….60

Figure 4.3 : Interface graphique de l'extension TOPSIS personnalisée développée sous ArcMap 10.8…….……61

Figure 4.4 : Interface graphique de l'extension AHP personnalisée développée sous ArcMap 10.8……...…63

Figure 4.5 : Interface graphique de l'extension d'implantation automatisée ……..... 65

Figure 5.1 : Carte du foncier résiduel disponible après application du masque d'exclusion (Buffers). ……...…68

Figure 5.2 : Planche cartographique des quatre critères décisionnels reclassifiés. …….69

Figure 5.3 : Carte d'aptitude territoriale issue de l'extension personnalisée TOPSIS. ……...….70

Figure 5.4 : Carte d'aptitude territoriale issue de l'extension personnalisée AHP. ……..……..71

Figure 5.5 : Planche comparative en vis-à-vis des zones de Très Haute Score (TOPSIS vs AHP). ……...…72

Figure 5.6 : Plan d'implantation final des aérogénérateurs sur le site validé. …….…….74

Figure 5.7 : Interface utilisateur du site WEBGIS développé……...….76

Figure 5.8 : L'implantation des éoliens proposée après sélection de la zone d'étude sur écran…….…….76

Figure 5.9 : Le WebGIS permet de données les informations de chaque éolien planté. …….…….77

Figure 5.10 : Un exemple de prompt avec son résultat donné par le Chatpot. …….77

Figure 5.11 :Capture de simulation en 3d de l'implantation des éoliennes ……...79

Liste des tableaux

Tableau 4.1 : Matrice d'évaluation et performances des critères.(Topsis)……..……..62

Tableau 4.2 : Matrice de comparaison par paire (AHP)……. 64

Introduction Générale

Introduction Générale

Face aux défis croissants du changement climatique et à l'épuisement progressif des ressources fossiles, la transition vers des sources d'énergie renouvelables s'impose aujourd'hui comme une nécessité stratégique mondiale. L'énergie éolienne, en particulier, occupe une place de choix dans cette mutation énergétique profonde, grâce à son caractère inépuisable, propre et de plus en plus compétitif.

Dans ce contexte, l'Algérie, pays riche en ressources solaires et éoliennes encore largement sous-exploitées, a engagé depuis 2011 un Programme National de Développement des Énergies Renouvelables. Ce programme ambitionne d'atteindre une puissance installée de 22 000 MW d'origine renouvelable à l'horizon 2030, dont 5 010 MW d'origine éolienne **[06]**. Pour concrétiser ces objectifs, l'identification rigoureuse et scientifique des sites d'implantation optimaux constitue une étape décisive et incontournable.

Cependant, la planification d'un parc éolien à grande échelle se heurte à la complexité inhérente de l'évaluation territoriale. L'énergie éolienne dépend d'une ressource naturelle par nature aléatoire et intermittente. De surcroît, le choix du site idéal ne peut se résumer à la seule analyse du gisement de vent ; il doit obligatoirement concilier des critères techniques, topographiques, environnementaux et réglementaires souvent antagonistes. Dans le cas spécifique de la plaine de la Mletta (wilaya d'Oran), zone à fort intérêt socio-économique et agricole, la présence de contraintes majeures telles que la Sebkha d'Oran ou la proximité des zones urbanisées accentue le défi d'aménagement.

Dès lors, les questions centrales auxquelles ce travail tente de répondre sont les suivantes : *Comment structurer et hiérarchiser une multitude de critères physiques et environnementaux pour localiser les zones de moindre contrainte et de plus forte aptitude ? Comment s'affranchir de la subjectivité des décideurs pour garantir un choix scientifiquement neutre ? Par quelle approche algorithmique automatisée peut-on optimiser l'agencement géométrique spatial des aérogénérateurs afin de maximiser la production tout en respectant les distances de sécurité aérodynamique ? Enfin, comment valoriser ces modélisations complexes sous forme d'un outil interactif et accessible aux décideurs non-géomaticiens ?*

Pour répondre à ces interrogations, le présent mémoire s'est fixé pour objectif principal de développer et d'implémenter une méthodologie géo-décisionnelle hybride, combinant les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et l'Analyse Spatiale Multicritère (ASMC), et automatisée permettant d'identifier, de valider et de concevoir le plan d'implantation optimal d'un macro-parc éolien dans la plaine de la Mletta à Oran.

La démarche adoptée repose sur deux méthodes décisionnelles complémentaires : la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), développée par Thomas Saaty, qui permet de structurer et de pondérer les critères d'évaluation de manière rationnelle, et la méthode TOPSIS (Technique for Order

of Preference by Similarity to Ideal Solution), qui classe les alternatives selon leur proximité avec la solution idéale. Ces deux approches ont été intégralement implémentées sous forme d'extensions Python personnalisées au sein du logiciel ArcMap 10.8, garantissant ainsi l'automatisation, la répétabilité et la rigueur scientifique de l'ensemble du processus.

De surcroît, afin de valoriser, diffuser et rendre pleinement exploitables les résultats de nos simulations, ce travail franchit le cap du SIG de bureau en intégrant le développement d'une application WebGIS d'aide à la décision spatiale baptisée **FMGEOTOPSIS**. Ce système permet de centraliser, traiter et visualiser de manière interactive les données multicritères nécessaires à l'évaluation du potentiel d'implantation, tout en intégrant un assistant intelligent (IA) pour guider l'utilisateur.

L'étude s'articule autour de cinq chapitres complémentaires :

- **Le premier chapitre** pose le cadre théorique des énergies renouvelables, en détaillant leurs typologies, leurs avantages et leur importance stratégique pour l'Algérie.
- **Le deuxième chapitre** présente le cadre méthodologique SIG et AMC, en exposant les fondements théoriques des outils mobilisés.
- **Le troisième chapitre** est consacré à la présentation exhaustive de la zone d'étude, la plaine de la Mletta à Oran, à travers ses caractéristiques physiques, climatiques et humaines.
- **Le quatrième chapitre** détaille l'approche algorithmique mise en œuvre, de la modélisation des contraintes à l'implémentation des extensions Python.
- **Enfin, le cinquième chapitre** restitue l'ensemble des résultats cartographiques, confronte les modèles décisionnels et présente le plan d'implantation final des 300 aérogénérateurs simulés, pour une puissance installée totale de 750 MW ainsi que la conception architecturale et technique détaillée de la plateforme WebGIS **FMGEOTOPSIS**.

Ce travail se veut ainsi une contribution concrète et opérationnelle à la planification des projets éoliens en Algérie, démontrant que des outils géomatiques avancés, couplés à une rigueur méthodologique, peuvent transformer des données géographiques brutes en décisions d'aménagement fondées et durables.

Chapitre 1

Les énergies renouvelables

1.1 Introduction

Les enjeux énergétiques mondiaux actuels soulignent l'urgence de réduire notre dépendance aux ressources non renouvelables, telles que les combustibles fossiles et l'uranium, dont les réserves sont limitées et dont l'exploitation contribue au changement climatique. Les énergies renouvelables, ou « vertes », offrent une alternative durable, propre et inépuisable, issue de phénomènes naturels constants comme le rayonnement solaire, le vent, ou la chaleur interne de la Terre. Ce chapitre explore la définition, l'importance mondiale et nationale, ainsi que les principales familles technologiques de ces sources d'énergie, tout en insistant sur le rôle stratégique que joue leur développement dans la transition énergétique, notamment en Algérie.

1.2 Définition des énergies renouvelables

Selon l'Organisation des Nations Unies (ONU), « les énergies renouvelables sont des énergies dérivées de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. Le soleil et le vent, par exemple, constituent de telles sources qui se renouvellent constamment » **[1]**.



Figure 1.1 : Principales sources d'énergie renouvelable et non renouvelables.**[28]**

1.3 Rôle des énergies renouvelables dans la transition énergétique

Dans un contexte marqué par l'urgence climatique et la nécessité de protéger l'environnement, le concept de développement durable s'est imposé comme un pilier fondamental régissant désormais les stratégies industrielles et économiques mondiales **[02]**. La transition énergétique actuelle répond à une volonté globale de réduire la dépendance aux

combustibles fossiles, dont l'exploitation est indissociable des émissions massives de gaz à effet de serre et d'une instabilité croissante des prix sur les marchés internationaux **[01], [02]**. Face à l'épuisement programmé de ces ressources polluantes, les énergies renouvelables apparaissent comme l'alternative indispensable pour répondre durablement à une demande énergétique mondiale en pleine expansion, portée par la croissance démographique **[02], [03]**.

L'énergie éolienne occupe une place prépondérante dans cette mutation. Historiquement exploitée pour le pompage d'eau, notamment en Amérique du Nord dès 1920 et en Algérie durant les années 1950, elle est aujourd'hui considérée comme l'une des filières les plus prometteuses pour substituer le charbon, le pétrole et le gaz **[04]**. Son essor fulgurant s'explique par des avancées technologiques majeures, tant au niveau de l'aérodynamisme des turbines que de la gestion des fréquences et des vitesses variables, permettant d'intégrer efficacement cette électricité propre et abondante aux réseaux électriques **[03], [05]**.

À l'échelle nationale, l'Algérie a amorcé une dynamique volontaire de transition vers une "énergie verte". Cette stratégie, inscrite dans le cadre du Programme National Climat (PNC) et des orientations de la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée et de la Valorisation des Déchets (SNGID)2035, vise non seulement à répondre aux enjeux environnementaux, mais aussi à assurer un rééquilibrage territorial et une diversification économique **[06], [07]**. Le gouvernement algérien ambitionne ainsi d'atteindre une puissance installée d'origine renouvelable de 22 000 MW à l'horizon 2030, en s'appuyant massivement sur la mise en valeur des gisements inépuisables que représentent le solaire et l'éolien **[06]**.

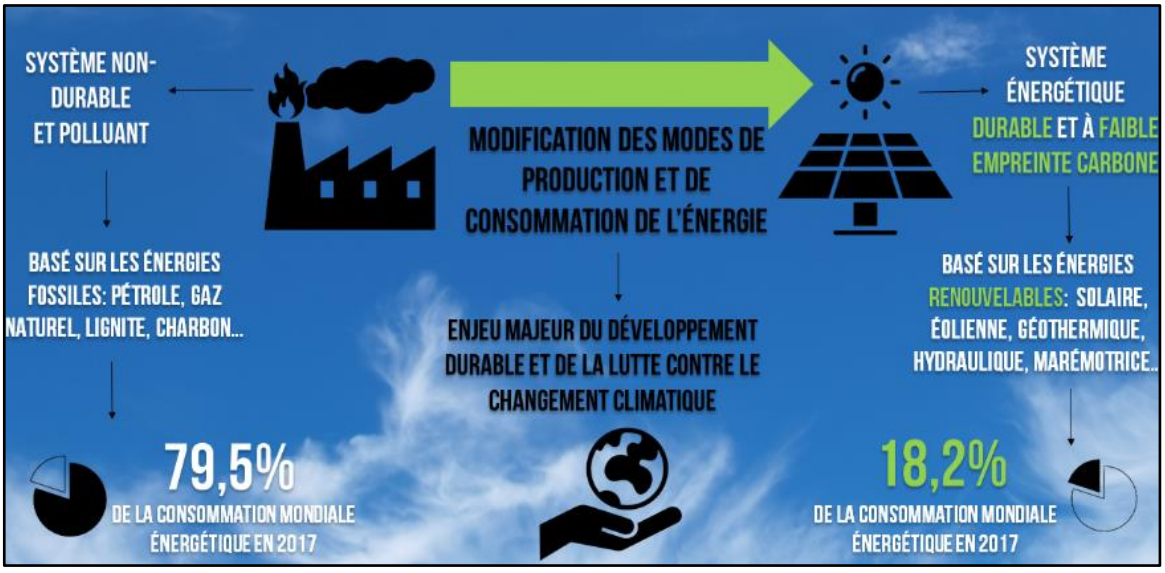


Figure 1.2 : Schéma de la transition d'un système énergétique basé sur les énergies fossiles vers les énergies renouvelables. **[29]**

1.4 Importance mondiale et nationale

À l'échelle internationale, la production d'énergie représente l'un des défis majeurs des décennies à venir. Cette problématique est accentuée par une croissance continue des besoins énergétiques, tant au sein des sociétés industrialisées que dans les pays en développement, parallèlement à une augmentation constante de la population mondiale **[03], [05]**. Le modèle énergétique traditionnel, largement dominé par les ressources fossiles, atteint aujourd'hui ses limites en raison de l'épuisement des réserves naturelles et de l'impact environnemental critique lié aux émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) **[02], [05]**. Dans cette optique, les énergies renouvelables s'imposent comme une solution incontournable grâce à leur souplesse d'exploitation et leur capacité à répondre aux enjeux du développement durable **[02], [03]**. Plus spécifiquement, la filière éolienne connaît une expansion mondiale remarquable, portée par des innovations aérodynamiques majeures, atteignant une puissance installée globale de 369,6 GW dès la fin de l'année 2014 **[03]**.

Au niveau national, l'Algérie s'inscrit pleinement dans cette dynamique de transition énergétique. Bien que sa responsabilité historique dans les émissions mondiales de GES soit marginale, le pays a réaffirmé son engagement international via sa Contribution Déterminée au niveau National (CDN), visant une réduction des émissions de 7 % à 22 % d'ici 2030 selon l'appui international reçu **[07]**. Historiquement, l'expérience Algérienne dans l'éolien remonte à 1957 avec une première installation de 100 kW sur le site des Grands Vents à Alger **[03]**. Plus récemment, la mise en service en 2014 de la ferme éolienne d'Adrar (10 MW) a marqué une étape concrète, bien que la puissance totale installée reste encore modeste par rapport au potentiel national **[08]**.

Pour pallier ce retard et répondre aux contraintes économiques liées à la fluctuation des prix du pétrole, le gouvernement a actualisé son programme national de développement des énergies renouvelables. L'objectif est d'atteindre une puissance globale de 22 000 MW à l'horizon 2030, au sein de laquelle l'énergie éolienne occupe une place stratégique avec une part de 5 010 MW **[03], [06], [08]**. Cette ambition s'appuie sur une baisse significative des coûts de production de la technologie éolienne et sur une volonté politique forte de valoriser les gisements naturels inépuisables du territoire **[03], [06]**.



Figure 1.3 : Production électrique issue des énergies renouvelables en 2023. **[30]**

1.5 Comparaison Energie renouvelable / énergies fossiles

Le système énergétique mondial actuel repose majoritairement sur les énergies dites de « stock » (pétrole, gaz ou charbon), qui représentent plus de 80 % de la consommation globale. Ces ressources, issues de gisements limités, sont par définition épuisables et leur exploitation massive constitue la principale source d'émissions de GES et de polluants **[02], [03], [05]**. À l'inverse, les énergies renouvelables sont qualifiées d'énergies de « flux » car elles proviennent de sources naturelles inépuisables, comme le vent ou le soleil, dont la transformation en électricité ne génère quasiment aucun déchet ni émission nocive **[03], [09]**.

Sur le plan économique et technique, l'énergie éolienne s'impose désormais comme une alternative compétitive face aux combustibles fossiles grâce aux progrès technologiques qui ont considérablement réduit son coût de production **[04]**. Bien que la variabilité de ce flux naturel pose un défi de régulation par rapport à la stabilité des sources conventionnelles, elle offre l'avantage majeur de garantir une sécurité d'approvisionnement stable, affranchie de la volatilité des prix du baril de pétrole **[05], [09]**. Ainsi, la transition vers ces énergies de flux constitue la solution durable pour satisfaire les besoins énergétiques futurs tout en préservant l'environnement **[02], [03]**.

1.6 Types principaux d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables se définissent par leur capacité à être régénérées naturellement, offrant ainsi une ressource virtuellement illimitée contrairement aux énergies fossiles et nucléaires **[02], [06]**. Leur exploitation permet de lutter efficacement contre l'effet de serre tout en favorisant une gestion intelligente des ressources locales **[03]**. Selon l'Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables (IRENA), « ces technologies sont au cœur de la transition énergétique mondiale, offrant des solutions décentralisées et durables pour répondre à la demande croissante » **[10]**. On distingue généralement cinq familles principales :

- **L'énergie solaire :** Elle exploite le rayonnement du soleil pour produire de l'électricité via des panneaux photovoltaïques ou de la chaleur à travers des centrales thermiques **[03]**.
- **L'énergie éolienne :** Issue de la force cinétique du vent, elle est transformée en énergie mécanique ou électrique au moyen d'aérogénérateurs **[03]**. L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) la définit comme « une source d'électricité à faible émission de carbone, essentielle pour atteindre la neutralité climatique » **[11]**.

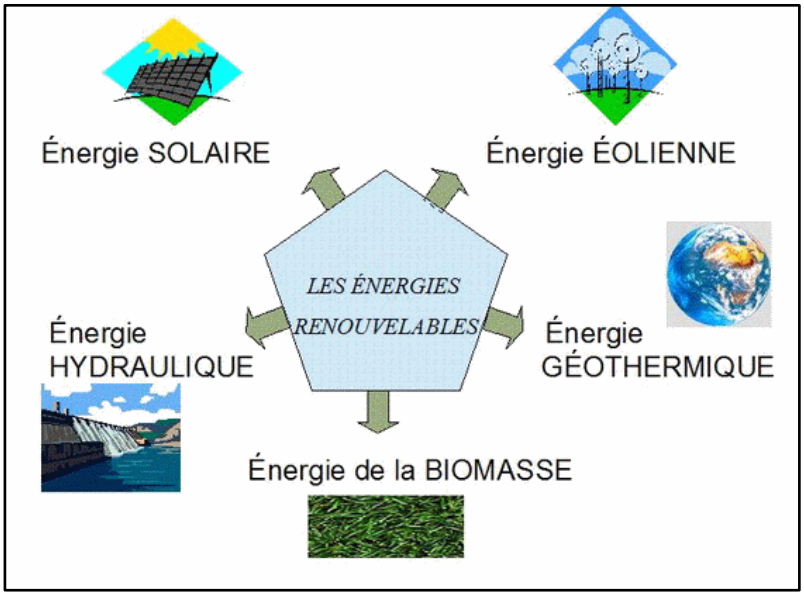


Figure 1.4 : Les différentes filières de production d'énergie renouvelable. **[31]**

- **L'énergie hydraulique :** Produite par les mouvements de l'eau (chutes, marées), elle est une source propre dont la puissance dépend du débit et de la hauteur de chute **[03], [06]**.

- **La biomasse :** Elle dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale. C'est la forme d'énergie la plus ancienne, utilisée depuis la préhistoire **[03], [06]**.
- **La géothermie :** Elle consiste à exploiter la chaleur stockée dans le sous-sol terrestre pour la production d'électricité ou de chaleur **[03], [12]**.

1.6.1 Énergie solaire

L'énergie solaire est une source de rayonnement issue du soleil qui, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres, fournit à la surface de la Terre une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) **[03], [06]**. Ce flux énergétique annuel représente environ 8 400 fois la consommation mondiale de l'humanité, ce qui en fait une ressource gratuite, inépuisable et disponible partout dans le monde **[03], [06]**. En tant qu'énergie propre, elle ne génère aucune émission de gaz à effet de serre lors de sa phase de production **[03]**.

On distingue principalement deux modes de conversion de cette énergie :

- **L'énergie solaire photovoltaïque :** Fondée sur l'effet photovoltaïque découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, cette technologie transforme directement une partie du rayonnement solaire en électricité au moyen d'une cellule photovoltaïque **[06]**. Schématiquement, l'énergie des photons incidents permet de mettre en mouvement des électrons, générant ainsi un courant électrique continu **[03, 06]**. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, cette solution est devenue l'un des piliers de la neutralité carbone grâce à sa modularité **[11]**.

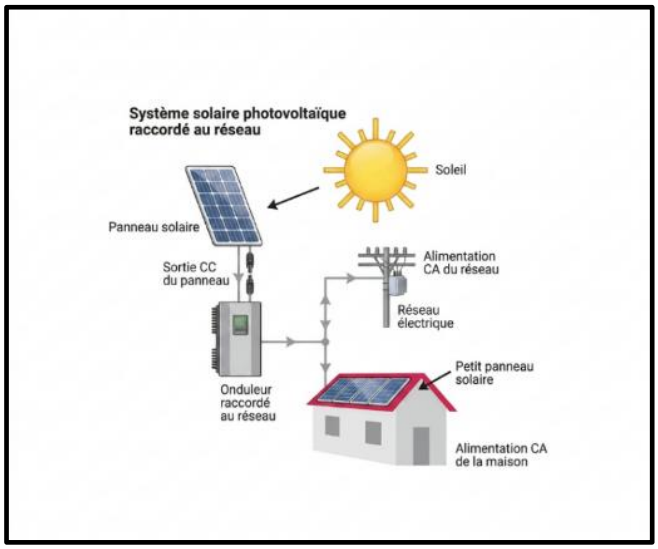


Figure 1.5 : Schéma de principe de l'énergie solaire photovoltaïque. (Schéma adaptés par les auteurs)

- **L'énergie solaire thermique :** Ce principe consiste à capter la chaleur du rayonnement solaire pour chauffer un fluide circulant dans des panneaux exposés au soleil **[02], [06]**. Cette forme de conversion peut être directe, pour le chauffage des bâtiments ou de l'eau sanitaire, ou indirecte lorsqu'elle utilise des générateurs comme des moteurs à air chaud) pour transformer l'énergie thermique collectée en électricité **[02], [06]**.

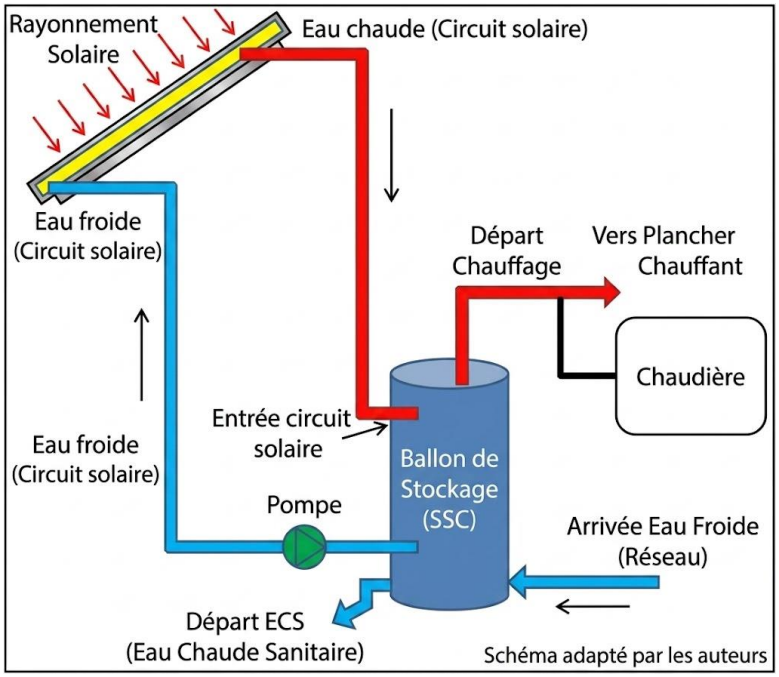


Figure 1.6 : Schéma de principe de l'énergie solaire thermique. (Schéma adaptés par les auteurs)

L'UNESCO souligne que la maîtrise de ces technologies permet non seulement de réduire la dépendance aux combustibles fossiles, mais constitue également un levier majeur pour le développement durable des zones isolées **[12]**.

1.6.2 Énergie éolienne

L'énergie éolienne, dont le nom est hérité d'Éole, dieu des vents dans la mythologie grecque, représente l'énergie cinétique d'une masse d'air en mouvement **[03]**. Historiquement utilisée depuis l'Antiquité pour la navigation à voile ou le fonctionnement des moulins, elle est aujourd'hui la forme d'énergie renouvelable connaissant le développement le plus rapide, avec une croissance moyenne de 30 % par an sur la dernière décennie **[02], [04]**. Contrairement aux

ressources fossiles dites « énergies stock », l'éolien est une « énergie flux », 100 % propre et inépuisable **[02], [09]**.

Techniquement, la récupération de cette énergie se fait au moyen d'un **aérogénérateur**, plus communément appelé éolienne. Le processus de conversion suit une chaîne précise :

1. **Conversion cinétique en mécanique :** Le vent exerce une force aérodynamique sur les pales du rotor, ce qui déclenche sa rotation. Cette force motrice est alors transformée en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission **[04], [13], [14]**.
2. **Conversion mécanique en électrique :** Cette énergie mécanique est ensuite convertie en électricité par l'intermédiaire d'une génératrice couplée au système **[04], [05], [13]**.

Les progrès technologiques récents ont permis d'augmenter la productivité des machines de plus de 55 % tout en réduisant considérablement les nuisances sonores **[04]**. Outre la production électrique massive injectée sur les réseaux, l'énergie éolienne conserve des applications directes essentielles, notamment pour le pompage de l'eau ou le broyage des grains dans les zones rurales **[06]**. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, l'optimisation des rotors et de la gestion des flux fait de l'éolien un pilier indispensable de la transition vers un système à faible émission de carbone **[11]**.

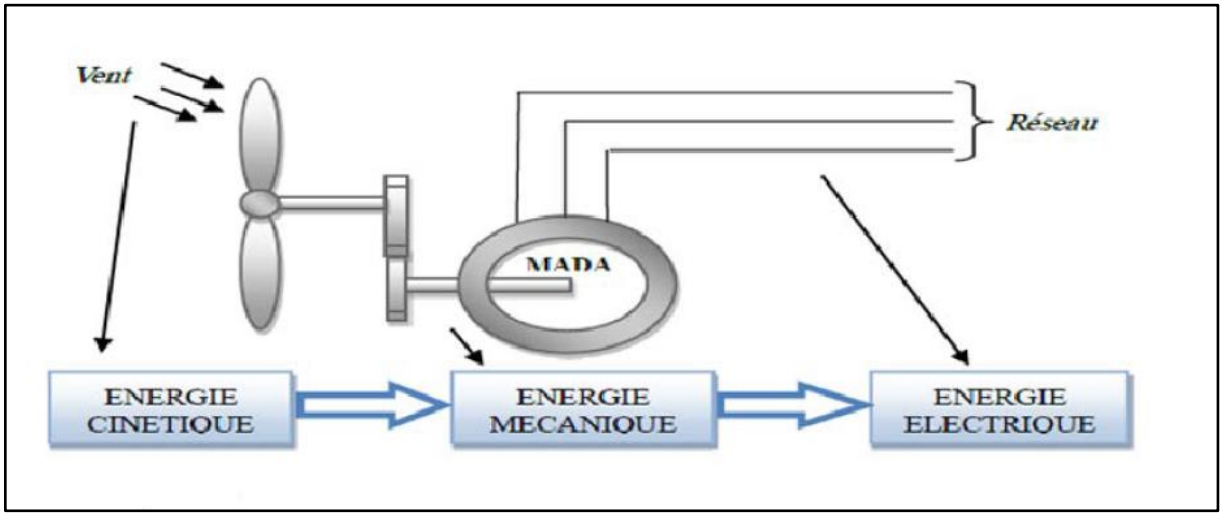


Figure 1.7 : Schéma de principe d'une éolienne. **[02]**

1.6.3 Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique, ou hydroélectricité, exploite l'énergie mécanique issue du cycle naturel de l'eau, qu'elle soit actionnée par la gravité (chutes et cours d'eau) ou par l'influence

des astres (marées et vagues) **[03]**. Sa puissance exploitable est déterminée par deux facteurs clés : la hauteur de chute et le débit du courant **[02], [03]**.

On distingue l'utilisation **directe**, héritée de l'Antiquité pour actionner des moulins ou des norias, de l'utilisation **indirecte**, devenue prédominante au XXe siècle pour la production d'électricité **[03]**. Ce procédé repose sur l'entraînement de turbines par un flux d'eau, convertissant l'énergie cinétique en électricité via des générateurs **[02]**. En raison de sa maturité technologique, l'UNESCO la classe aujourd'hui comme la première source d'énergie renouvelable pour la production électrique centralisée à l'échelle mondiale **[12]**.

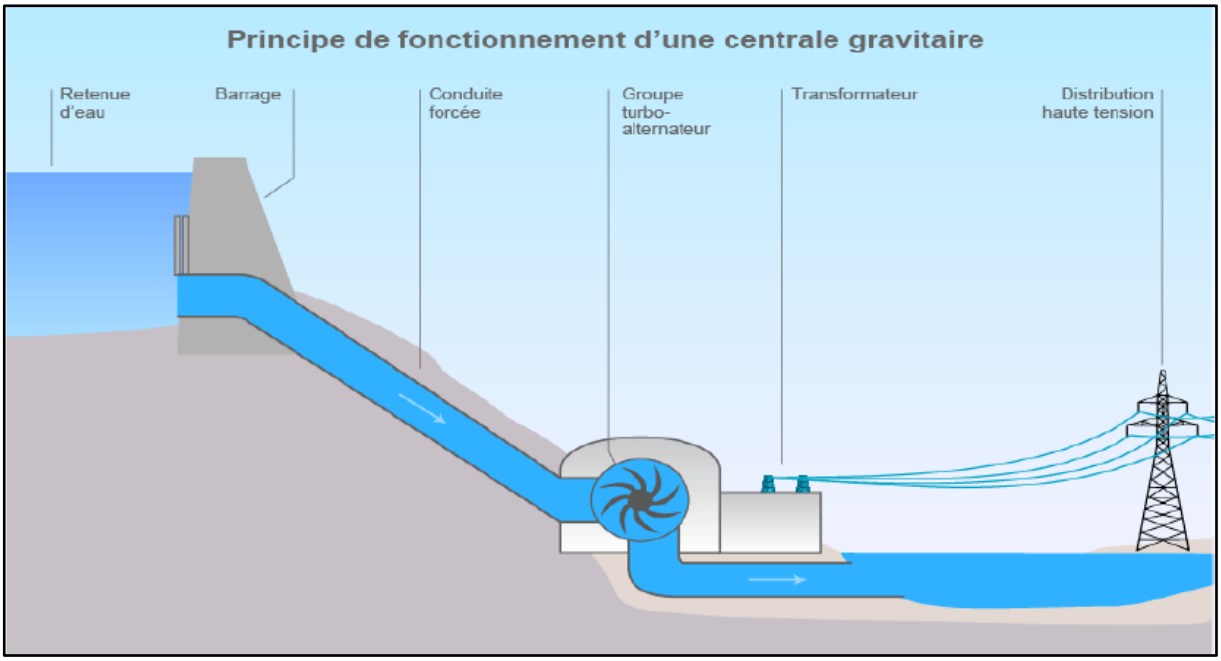


Figure 1.8 : Schéma de principe de L'énergie hydraulique. **[32]**

1.6.4 Biomasse

La biomasse est la source d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme, reposant sur l'exploitation du cycle de la matière vivante végétale, animale ou fongique **[02], [03]**. Souvent appelée « houille verte », elle regroupe le bois, les biocarburants, ainsi que les déchets organiques et agricoles **[03]**.

Cette ressource permet de produire de l'énergie selon deux procédés principaux : la **combustion** directe de matières solides (bois, végétaux) pour dégager de la chaleur, ou la **méthanisation**, qui transforme les déchets en **biogaz** par fermentation **[02], [03]**. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, cette polyvalence permet à la biomasse de générer aussi

bien de l'électricité que de la chaleur ou des carburants, en faisant un complément indispensable aux énergies intermittentes **[11]**.

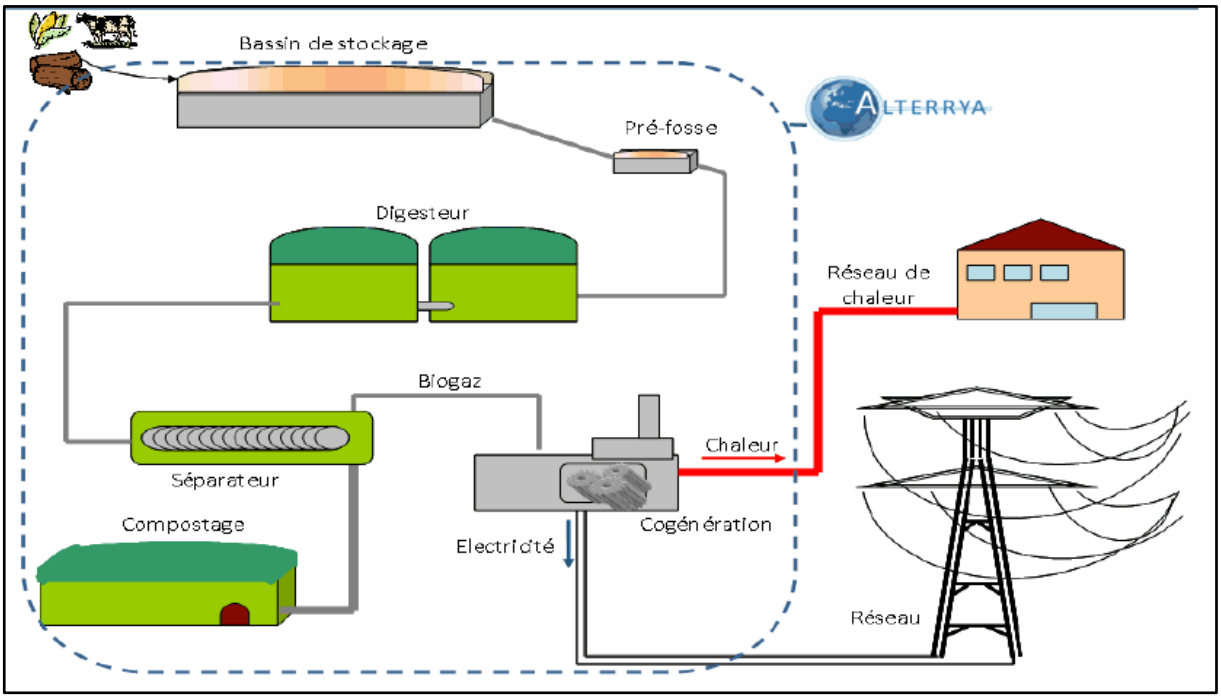


Figure 1.9 : Schéma de principe de L'énergie de Biomasse. **[02]**

1.6.5 Géothermie

La géothermie consiste à exploiter la chaleur naturelle stockée dans le sous-sol terrestre, provenant de réservoirs de vapeur, d'eau chaude ou de roches profondes **[02], [03]**. Contrairement aux autres flux renouvelables qui dépendent du soleil, la géothermie tire son énergie directement du noyau de la Terre, ce qui lui confère l'avantage majeur d'être indépendante des conditions atmosphériques (vent, pluie ou soleil) **[02], [03]**.

L'utilisation de cette ressource est classée selon quatre niveaux de température :

- **Haute et moyenne énergie (90 à >150°C) :** La vapeur ou l'eau extraite est utilisée pour faire tourner des turbines et produire de l'électricité **[02], [03]**.
- **Basse et très basse énergie (<30 à 90°C) :** La chaleur est exploitée directement pour le chauffage urbain ou des bâtiments **[03]**.

Bien que l'investissement initial soit élevé en raison des coûts de forage, l'exploitation est quasi gratuite et inépuisable **[02], [05]**. Le risque environnemental, lié au rejet de métaux lourds contenus dans l'eau extraite, est aujourd'hui maîtrisé par la réinjection systématique des fluides dans le sous-sol **[02]**. Selon l'UNESCO, cette stabilité de production fait de la géothermie une énergie de base essentielle pour la transition énergétique durable **[12]**.

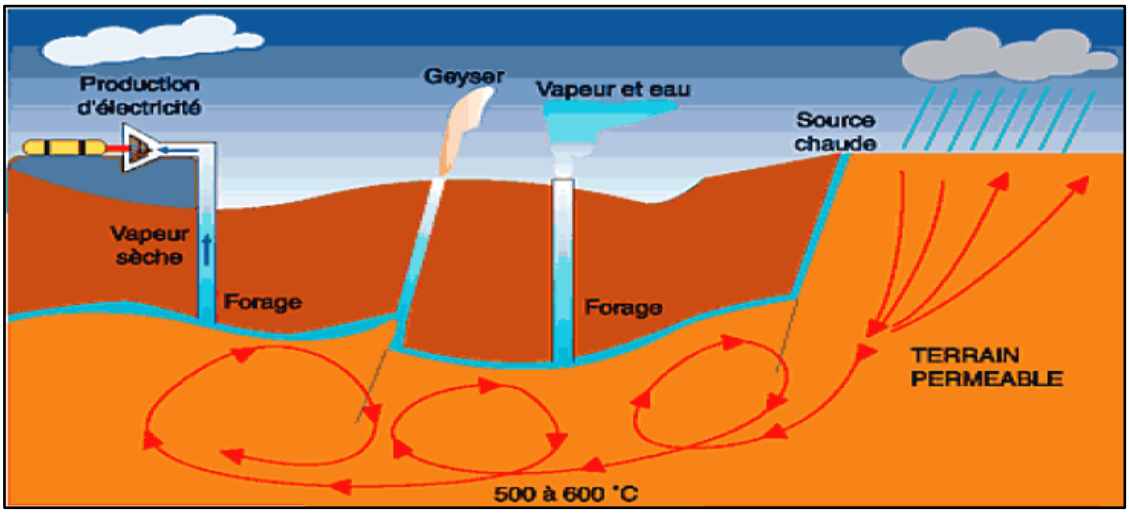


Figure 1.10 : Schéma de principe de L'énergie Géothermie. **[02]**

1.7 Importance et potentiel des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie traverse une phase charnière de son histoire énergétique, marquée par la volonté de substituer progressivement les ressources fossiles par des énergies de flux, inépuisables et propres **[01]**. Selon les orientations nationales, cette transition est une « nécessité stratégique pour garantir la sécurité énergétique des générations futures » **[05]**. Dans la réalité nationale, en analysant comment le potentiel naturel du pays est transformé en objectifs industriels concrets à l'horizon 2030-2050 **[10]**. Nous explorerons ici la répartition spatiale de ces ressources, les premières réalisations concrètes sur le territoire, ainsi que le cadre réglementaire qui définit les règles du jeu pour l'implantation des futurs parcs éoliens **[11]**.

L'Algérie jouit d'une situation géographique privilégiée, lui offrant l'un des gisements solaires les plus importants du bassin méditerranéen **[06]**. Bien que le rayonnement littoral soit soumis aux variations saisonnières, les régions sahariennes reçoivent une densité énergétique exceptionnelle, malgré des températures de l'air plus élevées qui influencent les conditions d'exploitation **[06]**.

Sur le plan éolien, la ressource est issue des mouvements de masses d'air générés par les différences de pressions thermiques à la surface du globe **[06]**. La cartographie nationale révèle un potentiel très diversifié, structuré par la topographie complexe du pays (littoral, Atlas Tellien et Saharien, Hauts Plateaux et Sahara) **[03], [05]** :

- **Le Nord et les Hauts Plateaux :** La vitesse moyenne du vent y oscille généralement entre 2 et 4 m/s. Cependant, des microclimats favorables, où la vitesse excède les 5 m/s, ont été identifiés dans les régions de **Tiaret**, **Tindouf** et **Oran [09]**.
- **Le Sud et le Sud-Ouest :** C'est ici que se concentre le meilleur potentiel. Les vitesses moyennes annuelles sont supérieures à 4 m/s et atteignent un maximum de **6,5 m/s** dans la région d'**Adrar [02], [09]**.

1.8 Objectifs stratégiques de l'Algérie (2030 – 2050)

L'Algérie a amorcé une dynamique d'énergie verte ambitieuse en adoptant le Programme National de Développement des Énergies Renouvelables (PNDER), approuvé en 2011 et actualisé en 2015 **[03], [06]**. Cette stratégie repose sur la mise en valeur de ressources inépuisables pour répondre aux difficultés économiques liées à la volatilité des prix du pétrole et à la nécessité de réduire les émissions de GES **[02], [03]**.

Les principaux objectifs quantitatifs et engagements climatiques se structurent comme suit :

- **Capacité installée :** L'objectif central est d'atteindre une puissance d'origine renouvelable de **22 000 MW à l'horizon 2030 [03], [06]**. À cette échéance, environ 40% de l'électricité destinée à la consommation nationale devra être issue de sources propres **[02]**.
- **Mix technologique :** Le solaire photovoltaïque (PV) domine le programme avec une prévision de 13 575 MW. L'énergie éolienne occupe une place stratégique avec un objectif de **5 010 MW** d'ici 2030, portée par une baisse significative des coûts de production estimée entre 26 % et 35 % sur la décennie 2015-2025 **[03], [08]**.
- **Engagements climatiques (CDN) :** Dans le cadre de son Plan National Climat (PNC), l'Algérie s'engage à réduire ses émissions de GES de **7 % d'ici 2030** sur ses ressources propres, un objectif pouvant atteindre **22%** en cas d'appui international **[07]**.

Ce déploiement ne se limite pas aux grandes installations connectées au réseau ; il intègre également le "petit éolien" destiné au pompage de l'eau et à l'électrification des localités isolées

[08]. Cette vision s'inscrit en cohérence avec les instruments de haute importance tels que le Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT-2030) et la Stratégie Nationale pour l'Environnement et le Développement Durable (SNEDD) **[07]**.

La région d'Adrar présente un intérêt stratégique majeur : outre son gisement éolien, elle bénéficie de la proximité de la nappe albienne. La faible profondeur du réservoir d'eau favorise le couplage de l'énergie éolienne au pompage hydraulique, offrant une solution technico-économique performante pour le développement des zones sahariennes **[15]**.

1.9 Projets réalisés et projets en cours

L'expérience Algérienne dans l'éolien, bien qu'ancienne avec des essais dès 1957 à **Grand Vent (Alger)** et un usage agricole historique pour le pompage de l'eau, a franchi un cap industriel majeur en juin 2014 **[03], [08]**. La mise en service de la **ferme pilote d'Adrar (Kabertène)** constitue la réalisation de référence : dotée de 12 turbines pour une puissance de 10 MW, elle couvre environ 5 % des besoins électriques locaux **[02], [03]**. Ce dynamisme s'étend désormais à d'autres régions comme **Tindouf** et s'articule avec des projets de développement intégrés. C'est le cas de l'aménagement de la **Plaine de Mletta (Oran)**, où des infrastructures de pompage et de transfert d'eau, liées à la station d'épuration d'El Kerma, visent l'irrigation de plus de 5 000 hectares pour renforcer la sécurité alimentaire et créer des milliers d'emplois **[07]**.



Figure 1.11 : Première ferme éolienne en Algérie d'Adrar (Kabertène). **[33]**

1.9.1 Limites et obstacles

Malgré ce potentiel, l'intégration massive de l'éolien se heurte à des contraintes techniques et environnementales significatives. Le principal défi réside dans la **nature stochastique du vent**, dont l'intermittence complique la stabilité et la qualité de la puissance injectée sur le réseau électrique **[05], [09]**. De plus, l'estimation précise du gisement sur un site donné reste complexe sans mesures locales rigoureuses, les données météorologiques standards ayant tendance à sous-estimer la ressource réelle **[15]**. Sur le plan environnemental, bien que l'impact sur la biodiversité aviaire reste statistiquement faible, les nuisances sonores et l'impact visuel des turbines demeurent des facteurs de résistance sociale **[04], [09]**. Enfin, les coûts d'investissement initiaux élevés et les limites de certaines technologies, comme les éoliennes à axe vertical sensibles aux turbulences près du sol, imposent une planification rigoureuse pour garantir la rentabilité à long terme **[03], [13]**.

1.10 Concepts fondamentaux liés à l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes forces motrices exploitées par l'humanité, utilisée dès l'Antiquité pour la navigation et les moulins à vent. Son nom dérive d'Éole (*Αἴολος*), divinité des vents dans la mythologie grecque **[03]**. Aujourd'hui, elle s'affirme comme une ressource de « flux » propre et inépuisable, capable de substituer durablement les énergies de stock (fossiles) **[01], [10]**.

1.10.1 Principes de conversion énergétique

Le vent tire sa genèse du rayonnement solaire : le réchauffement inégal de la surface terrestre crée des écarts de pression atmosphérique qui déplacent les masses d'air, transformant l'énergie thermique en énergie cinétique **[06], [11]**. Sur le plan technique, un **aérogénérateur** capte cette force pour la convertir en énergie mécanique, puis en électricité via une génératrice **[02]**.

L'éolien est toutefois une source **intermittente**, car sa production dépend strictement des conditions météorologiques et non de la demande, ce qui impose des contraintes de stockage ou de production d'appoint **[05], [09]**. Malgré cela, son bénéfice écologique est majeur : chaque mégawatheure (MWh) produit évite le rejet de **0,8 à 0,9 tonne de CO_2** dans l'atmosphère **[12]**.

1.10.2 Paramètres physiques essentiels : Vitesse, densité et turbulence

L'efficacité de la conversion énergétique repose sur trois variables critiques :

- **La vitesse du vent (v) :** C'est le paramètre prédominant, car la puissance extractible est proportionnelle au cube de la vitesse ($P \propto v^3$). Une variation mineure du flux multiplie ainsi considérablement la production **[09], [14].** Pour filtrer les fluctuations, les mesures de gisement sont moyennées sur des intervalles de dix minutes.
- **La densité de l'air (rho) :** Elle agit comme un multiplicateur direct de la puissance. Si la valeur standard est de **1,225 kg/m³** (à 15°C au niveau de la mer), elle diminue avec l'altitude et l'élévation de la température, influençant directement le rendement final des turbines **[14]**.
- **La turbulence :** Correspondant aux fluctuations de courte durée (< 10 min), elle génère des charges dynamiques fatiguant les composants mécaniques. On distingue la turbulence naturelle (due au relief) de la **turbulence de sillage** induite par les machines en amont **[09]**.

Pour minimiser ces interactions et optimiser le gisement, une règle de disposition spatiale est appliquée dans les parcs éoliens : un espacement minimal de **3 à 4 fois le diamètre du rotor (D)** est requis entre les machines d'une même rangée, et de **5 à 7 fois D** entre les rangées successives **[03]**.

1.10.3 Carte du potentiel éolien en Algérie

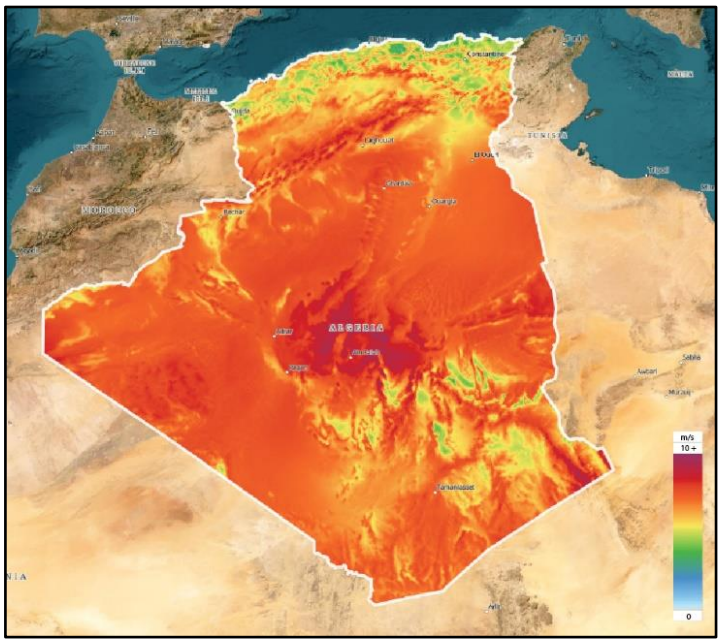


Figure 1.12 : Carte annuelle des vents (m/s) à 100 m du sol. **[34]**

Cette carte met en évidence la distribution spatiale de la vitesse du vent en Algérie, qui s'intensifie nettement dans le sens Nord-Sud-Ouest. L'analyse visuelle révèle ainsi que les zones à fort potentiel, à des vitesses supérieures à 9 m/s, se localisent dans la région d'Adrar et le plateau du Tademaït, qui constituent ainsi des zones à fort potentiel pour l'implantation des parcs éoliens. La zone septentrionale et les reliefs des monts de l'Atlas, quant à elles, ont des vitesses modérées, où la topographie et la rugosité des sols jouent un rôle dans la circulation des masses d'air. Bref, la cartographie des vents en Algérie constitue une aide à la décision essentielle pour la détermination des zones d'exclusion dans le cadre de la transition énergétique en Algérie.

1.10.4 Contraintes techniques, environnementales et sociales

Malgré ces atouts, la filière éolienne fait face à des défis intrinsèques, au premier rang desquels figure l'intermittence. La ressource étant stochastique, la production dépend des aléas météorologiques et ne peut être stockée sous sa forme primaire, ce qui impacte la qualité de la puissance injectée sur le réseau **[02], [05]**. La durée de vie d'une installation, bien que comparable aux technologies conventionnelles, est limitée à environ 20-25 ans, avec un rendement moyen de production oscillant entre 20 % et 60 % selon le gisement **[03], [05]**.

Sur le plan des nuisances, le bruit (mécanique au niveau du multiplicateur ou aérodynamique au bout des pales) et l'impact visuel sur le paysage restent des points de friction sociale et de santé publique, imposant des distances minimales vis-à-vis des zones résidentielles **[03], [09], [15]**. L'impact sur la biodiversité, notamment les risques de collisions pour l'avifaune et les chauves-souris, nécessite des études d'impact rigoureuses avant toute implantation **[04], [05]**. Enfin, des contraintes techniques spécifiques subsistent : les éoliennes peuvent générer des interférences électromagnétiques (ondes hertziennes) et les modèles à axe vertical, bien qu'existant, restent marginaux à cause de leur sensibilité aux turbulences près du sol et de problèmes d'aéroélasticité **[03], [13]**.

1.11 Fonctionnement d’une éolienne

La transformation de l’énergie cinétique du vent en électricité suit une chaîne de conversion complexe (aérodynamique, mécanique et électromagnétique) validée par les standards de l'IEA **[11]**. Ce processus permet d'optimiser la capture du gisement éolien via les étapes suivantes :

1.11.1 Composantes principales

Une éolienne est un convertisseur électromécanique articulé autour de quatre organes majeurs (Figure 1.13) :

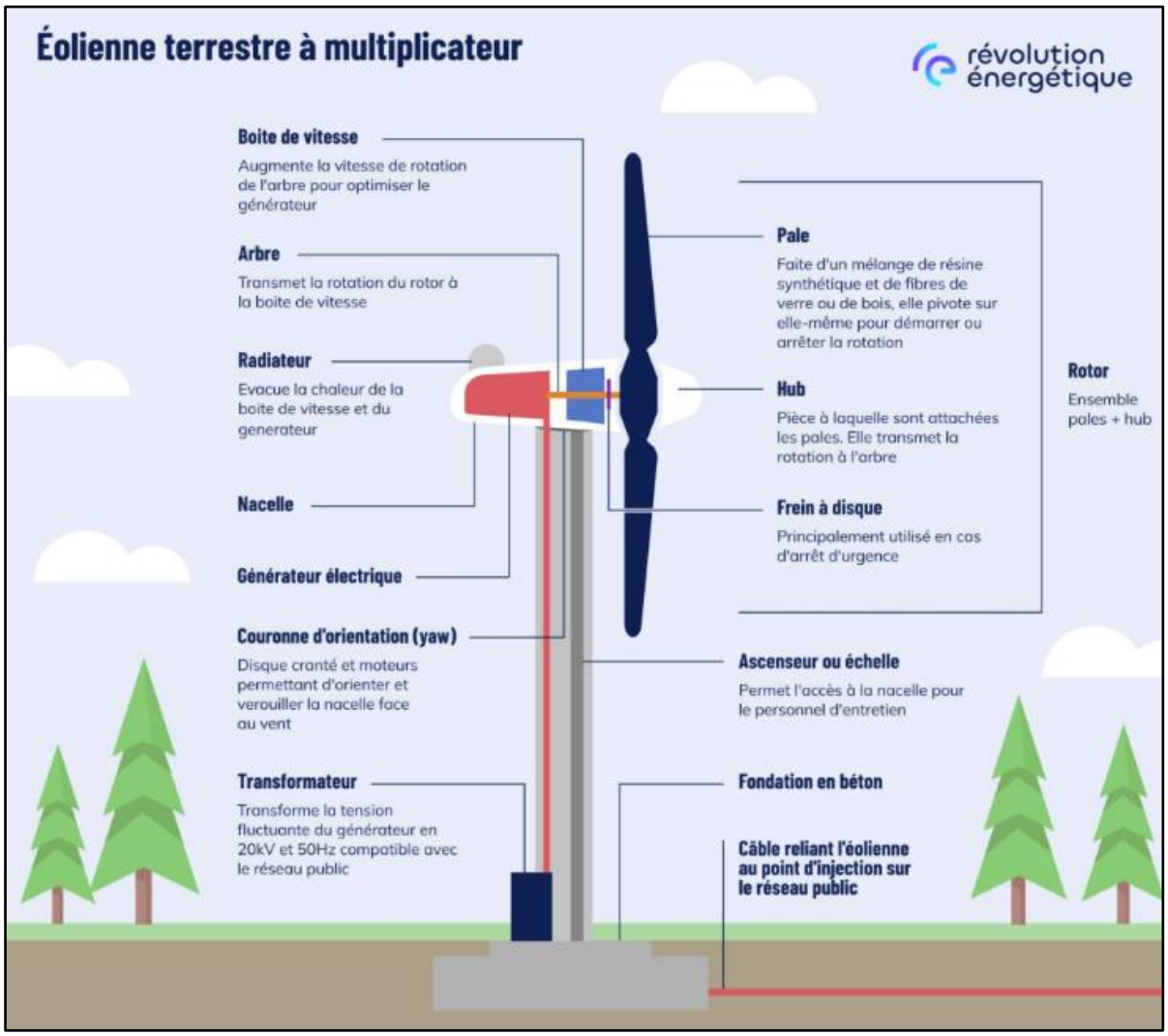


Figure 1.13 : Structure et principaux éléments d'une éolienne. **[35]**

- **Le mât (ou tour) :** Structure de 80 à 120 m en acier ou béton. Sa hauteur est stratégique pour capter un vent **laminaire** et puissant, loin des turbulences du sol **[04], [14]**.
- **Le rotor et les pales :** Composé de trois pales en composites, il utilise la **portance aérodynamique** pour créer un couple de rotation. Le modèle tripale offre le meilleur compromis stabilité/rendement **[02], [13]**.
- **La nacelle :** Véritable cœur technique abritant **[14]** :
    - **L'arbre primaire :** Tourne à basse vitesse (10-25 tr/min).
    - **Le multiplicateur (Gearbox) :** Élève la rotation à environ **1500 tr/min** pour la génératrice.

- **La génératrice :** Transforme l'énergie mécanique en électricité.

- **Systèmes de contrôle et sécurité :**
  - **Orientation (Yaw) :** Maintient le rotor face au vent.
  - **Régulation (Pitch) :** Ajuste l'angle des pales pour optimiser la prise au vent ou sécuriser la machine (mise en drapeau) en cas de tempête (> 25 m/s) **[04], [14]**.

L'énergie produite est ensuite acheminée par câbles vers un transformateur avant injection sur le réseau national.

1.11.2 Principe de conversion : Énergie cinétique → Énergie électrique

La transformation du vent en électricité n'est pas directe ; elle suit une chaîne de conversion rigoureuse divisée en deux étapes fondamentales **[03], [05], [13]** :

1. **Conversion Aérodynamique (Cinétique → Mécanique) :** Le vent, qui est une masse d'air en mouvement possédant une énergie cinétique, rencontre les pales du rotor. Grâce à leurs profils aérodynamiques, les pales extraient une partie de cette énergie pour créer une force de poussée. Cette force entraîne l'arbre de transmission en rotation, transformant ainsi le flux d'air en énergie mécanique **[03], [10], [13]**.
2. **Conversion Électromagnétique (Mécanique → Électrique) :** L'énergie mécanique est transmise à la génératrice (souvent via un multiplicateur qui ajuste la vitesse à environ **1500 tr/min** pour une performance optimale **[02]**). La génératrice utilise alors le phénomène d'**induction électromagnétique** : l'interaction entre la partie mobile (rotor) et la partie fixe (stator) crée un champ magnétique qui génère le courant électrique **[04]**.

1.12 Classification des éoliennes

Le marché de l'énergie éolienne se divise en deux grandes familles technologiques, distinguées par l'orientation de leur axe de rotation : les éoliennes à axe horizontal (**HAWT**) et les éoliennes à axe vertical (**VAWT**) **[03], [13]**.

A. Les éoliennes à axe horizontal (HAWT)

C'est la technologie largement dominante aujourd'hui, inspirée des moulins à vent ancestraux et de l'aéronautique **[04], [13]**.

- **Structure :** Le rotor est installé au sommet d'un mât. L'axe de rotation est parallèle à la direction du vent.
- **Avantages :** Elles captent des vents plus stables et puissants en altitude, offrant un rendement (coefficient de puissance Cp) bien supérieur. Le modèle **tripale** est le standard industriel car il offre le meilleur compromis entre coût, vitesse de rotation et stabilité mécanique **[04], [14]**.
- **Contraintes :** Elles nécessitent un système d'orientation pour rester face au vent et l'installation des composants lourds (génératrice, multiplicateur) en hauteur pose des défis de maintenance **[05]**.

B. Les éoliennes à axe vertical (VAWT)

Bien qu'elles soient historiquement les premières structures développées pour l'électricité, elles restent aujourd'hui marginales dans les projets industriels **[04], [13]**.

- **Structure :** L'axe de rotation est perpendiculaire au sol. On distingue principalement les rotors de type Savonius (basé sur la traînée) et Darrieus (basé sur la portance) **[02]**.
- **Avantages :** Elles sont omnidirectionnelles, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. De plus, les organes de commande et la génératrice sont situés au niveau du sol, facilitant grandement la maintenance **[04], [05]**. Elles sont adaptées aux vents turbulents des milieux urbains.
- **Inconvénients :** Leur efficacité est limitée car le capteur est exposé aux turbulences près du sol (gradient de vent). Cette technologie est aujourd'hui quasi abandonnée pour la production à grande échelle au profit de l'axe horizontal **[04], [13]**.

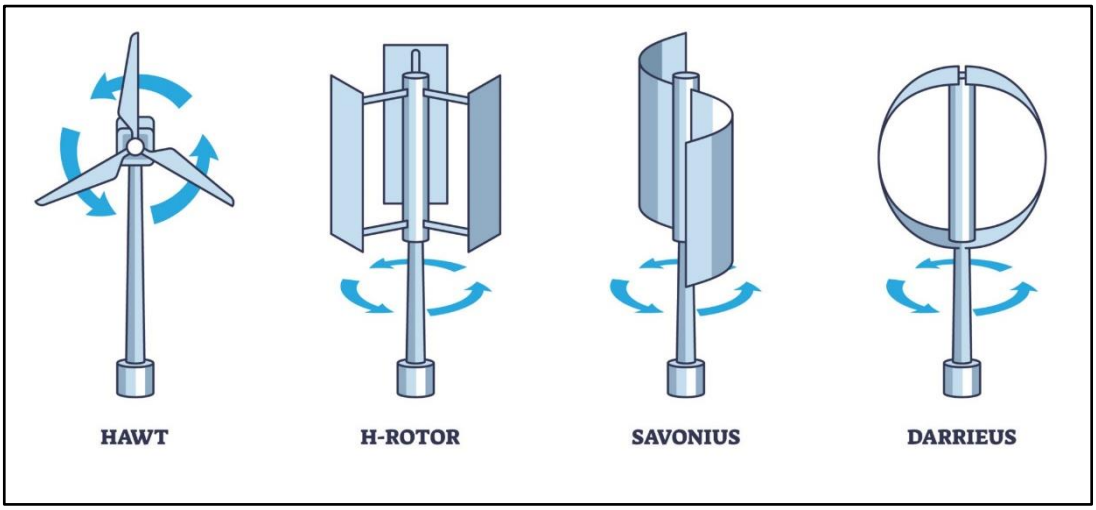


Figure 1.14 : Classification des éoliennes selon l'orientation de l'axe de rotation. **[36]**

1.13 Avantages et limites de l'énergie éolienne.

L'énergie éolienne s'est imposée comme l'une des sources de production d'électricité ayant le plus fort taux de croissance mondial. Bien qu'elle ne puisse remplacer totalement les sources traditionnelles, elle constitue une alternative durable et stratégique **[04], [03]**.

1.13.1 Les avantages

L'éolien présente des atouts environnementaux, économiques et techniques majeures :

- **Impact environnemental minimal :** C'est une énergie propre, gratuite et inépuisable. Elle ne produit ni déchets toxiques, ni émissions de CO2 (réduction de 0,8 à 0,9 tonne de CO2 par MWh produit par rapport au thermique) **[04], [09]**.
- **Flexibilité opérationnelle :** Contrairement au nucléaire ou au thermique, les éoliennes peuvent être arrêtées instantanément, évitant les pertes d'énergie inutiles. De plus, les parcs sont facilement démontables et ne laissent aucune trace durable sur le site **[04], [02]**.
- **Atouts économiques et locaux :** C'est l'une des énergies renouvelables les moins chères (coût réduit de 90 % depuis les années 80). Elle stimule l'économie rurale et réduit les pertes en ligne en répondant directement aux besoins locaux **[04], [13]**.
- **Double usage du sol :** Dans les grands parcs, seulement 2 % de la surface est occupée par les fondations, laissant le reste disponible pour l'agriculture ou l'élevage **[09]**.

1.13.2 Limites et contraintes de l'énergie éolienne

Malgré ses nombreux atouts, l'exploitation de l'énergie éolienne fait face à des défis techniques, environnementaux et sociaux qu'il est nécessaire de maîtriser :

- **Variabilité et intermittence :** C'est le principal inconvénient. Le vent est une ressource stochastique (aléatoire) et instable, rendant la puissance produite difficilement prévisible. Cette inconstance pèse sur la qualité du courant et impose des contraintes strictes aux gestionnaires du réseau électrique pour maintenir l'équilibre entre production et consommation **[02], [04], [09]**.
- **Occupation des sols et interférences :** Bien que l'emprise au sol des fondations soit faible (environ 2 %), l'installation de parcs nécessite de grands espacements (3 à 4 fois le diamètre du rotor) pour éviter l'effet de sillage et les turbulences entre machines **[03],**

[09]. De plus, les éoliennes peuvent générer des interférences électromagnétiques perturbant certains signaux de communication **[09]**.

- **Nuisances sonores et visuelles :** Le bruit (mécanique et aérodynamique) a été fortement réduit grâce aux nouveaux profils de pales, atteignant 50-60 dB (soit une conversation normale). À une distance de huit fois le diamètre du rotor, ce bruit devient indiscernable du bruit naturel du vent **[03], [04]**. L'impact visuel, quant à lui, reste un sujet subjectif d'acceptation par les populations locales **[03], [05]**.
- **Impact sur la biodiversité :** Les éoliennes peuvent représenter un risque pour l'avifaune et les chauves-souris, notamment lors des migrations nocturnes ou par mauvais temps. Ce risque est toutefois limité par une planification rigoureuse des sites d'implantation hors des zones sensibles **[04], [05], [09]**.

1.14 Cadre juridique et réglementaire de l'implantation éolienne

L'implantation d'un parc éolien en Algérie est soumise à un cadre légal et normatif rigoureux :

1.14.1 Lois nationales et objectifs stratégiques

L'Algérie a lancé un programme de développement des énergies renouvelables visant 22 000 MW d'ici 2030, dont 5 010 MW pour l'éolien **[06]**. Ce cadre est renforcé par la ratification de l'Accord de Paris en 2016 (Décret présidentiel du 13 octobre 2016), engageant le pays à réduire ses émissions de GES de 7 % à 22 % d'ici 2030 **[07]**.

1.14.2 Réglementation environnementale

Tout projet doit faire l'objet d'une Étude d'Impact sur l'Environnement (EIE) et d'une étude de dangers. Ces évaluations portent sur la protection de la biodiversité (avifaune), l'impact paysager et la conformité aux conventions internationales (Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) , Convention sur la Diversité Biologique (CBD) ratifiées par l'Algérie **[03], [07]**.

1.14.3 Normes de distance et d'implantation

- **Entre les machines :** Un espacement de 3 à 4 fois le diamètre du rotor (DT) est nécessaire pour limiter l'effet de sillage **[03], [13]**. Une distance de 200 à 400 m doit être assurée entre les éoliennes **[14]**.
- **Sécurité et obstacles :** Les éoliennes doivent respecter une distance de 10 fois la hauteur pour une maison et 6 fois pour des arbres **[03]**.

- **Nuisances sonores :** À une distance de 8 fois le diamètre, le bruit devient inférieur à 40 dB **[04]**.

1.14.4 Gestion foncière et réversibilité

L'accès au terrain peut se faire sur le domaine public ou privé via un contrat de bail de 20 ans minimum **[03]**. L'exploitant a l'obligation de démanteler le parc en fin de vie, avec des garanties financières prévues en cas de défaillance **[04]**.

1.15 Conclusion

Le développement des énergies renouvelables constitue une étape cruciale vers un avenir énergétique plus durable, écologique et sécurisé. En exploitant des ressources naturelles inépuisables, ces technologies contribuent non seulement à limiter l'impact environnemental, notamment en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, mais elles favorisent aussi la diversification économique et la création d'emplois. Pour l'Algérie, ces enjeux prennent tout leur sens dans le cadre de ses objectifs nationaux et internationaux, où le potentiel solaire et éolien représente une opportunité majeure de sécuriser l'avenir énergétique tout en participant activement à la lutte contre le changement climatique.

Chapitre 2

SIG et Analyse Multicritères.

2.1 Introduction

Le choix d'un site optimal pour l'implantation d'un parc éolien est une problématique multidimensionnelle qui nécessite une analyse rigoureuse de données géographiques, techniques et environnementales. L'objectif de ce chapitre est de présenter le cadre méthodologique et les outils technologiques mobilisés pour mener à bien cette étude.

La démarche repose sur l'exploitation des Systèmes d'Information Géographique (SIG), véritables plateformes de gestion et d'analyse spatiale, couplés aux méthodes d'Analyse Multicritère (AMC). Ce chapitre détaille dans un premier temps les principes et composantes du SIG, avant d'exposer les fondements théoriques des méthodes de décision AHP et TOPSIS. Enfin, nous verrons comment l'intégration de ces deux approches permet de transformer des données brutes en une aide à la décision concrète pour la localisation des zones les plus aptes à accueillir le projet.

2.2 Le Système d'Information Géographique (SIG)

L'identification de sites favorables à l'implantation d'un parc éolien nécessite la manipulation d'une multitude de données spatiales (vitesse du vent, topographie, réseaux électriques, contraintes environnementales). Pour traiter cette complexité, le recours à un outil capable de croiser ces informations est indispensable : le Système d'Information Géographique (SIG).

2.2.1 Définition et rôle du SIG

Le SIG est un outil aux multiples facettes dont la définition varie selon le niveau de perception (informaticien, utilisateur ou décideur).

- **Approche fonctionnelle :** « C'est un système qui permet de recueillir, stocker, mettre en forme, structurer puis traiter et analyser des données géographiques sous forme de couches numériques. » **[03]**
- **Définition de DIDIER (1990) :** Il définit le SIG comme « un ensemble de données repérées dans l'espace, et structurées de façon à pouvoir en extraire des synthèses utiles à la décision » **[03]**.
- **Définition technique (ESRI) :** « C'est une technologie conçue pour créer, gérer et analyser spatialement toutes sortes de données. Elle associe des données à une carte en combinant des informations de localisation et des données descriptives. » **[16]**

Les 5 questions fondamentales **:** Selon ESRI, un SIG doit répondre à cinq questions quel que soit le domaine d'application **[03]** :

1. Où : où se situe le domaine d'étude et quelle est son étendue géographique ?
2. Quoi : quels objets peut-on trouver sur l'espace étudié ?
3. Comment : comment les objets sont-ils répartis et quelles sont leurs relations ?
4. Quand : quel est l'âge d'un objet ou d'un phénomène ?
5. Et si : que se passerait-il si tel événement se produisait ?

2.2.2 Les composantes d'un SIG [16], [17]

Le bon fonctionnement d'un SIG repose sur l'interaction de cinq composantes majeures, illustrées par la Figure 2.1, qui permettent de transformer une donnée brute en une information exploitable pour la décision :

- **Les Données :** C'est la composante centrale. Elles modélisent le territoire via des cartes, des images satellites ou des relevés de terrain.
- **Les Logiciels :** Ils fournissent les outils pour stocker et analyser l'espace (ex : ArcGIS)**.**
- **Le Matériel :** Il comprend l'infrastructure physique (ordinateurs, serveurs, GPS, drones)**.**
- **Les Moyens Humains :** Cela va des spécialistes qui maintiennent la base de données jusqu'aux décideurs qui utilisent les cartes finales.
- **Les Méthodes :** Ce sont les règles et les modèles de calcul qui garantissent la qualité des résultats produits.

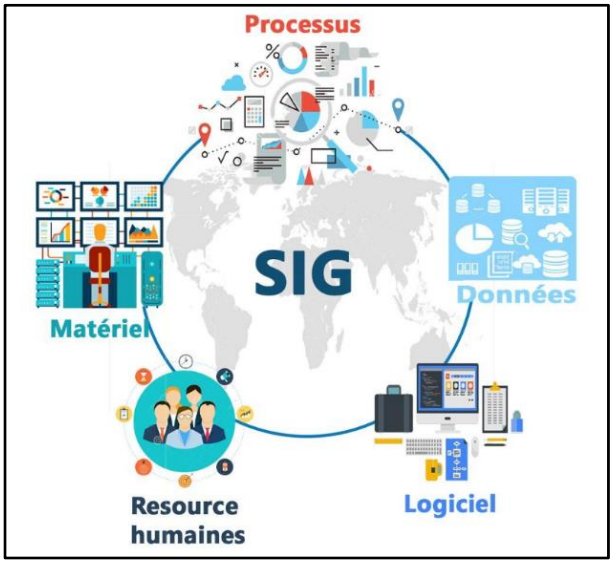


Figure 2.1 : Les cinq composantes fondamentales d'un Système d'Information Géographique (SIG)

2.2.3 Modes de représentations et types de données utilisées

Dans un SIG, l'information géographique est structurée en deux modes de représentation complémentaires (Figures 2.2) :

- **Le mode Vectoriel [03], [16], [17] :** Le modèle vectoriel formalise les entités du monde réel par des primitives géométriques discrètes basées sur des couples de coordonnées (x, y) :
  - **Le Point :** Entité sans dimension spatiale apparente (ex. : l'implantation précise d'un aérogénérateur).
  - **La Ligne (Polyligne) :** Succession de segments linéaires connectés (ex. : axes routiers, réseaux de transport d'électricité).
  - **Le Polygone (Surface) :** Espace bidimensionnel fermé délimité par des contours (ex. : zones urbanisées, périmètres de la Sebkha).

  Chaque entité vectorielle est liée de manière biunivoque à un enregistrement au sein d'une table attributaire relationnelle.

- **Le mode Raster :** Représente l'espace sous forme d'une grille de pixels (cellules). Chaque pixel contient une valeur numérique (ex : altitude ou vitesse du vent) **[16], [17]**.

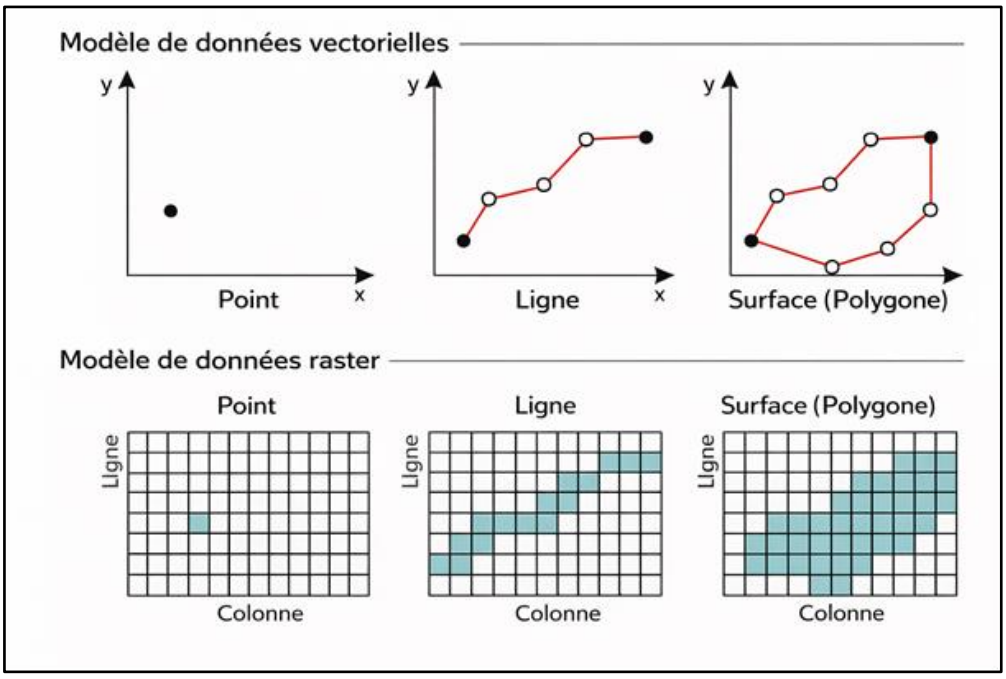


Figure 2.2 : Les modes de représentation dans les S.I.G **[37]**

2.2.4 La superposition de couches (Overlay)

Le SIG organise l'information sous forme de couches thématiques superposables. La technique de l'Overlay permet de croiser ces couches (Ex. vent, relief, routes) pour créer des cartes de synthèse et identifier les meilleures zones d'actions potentielles **[16], [17], [19]**.

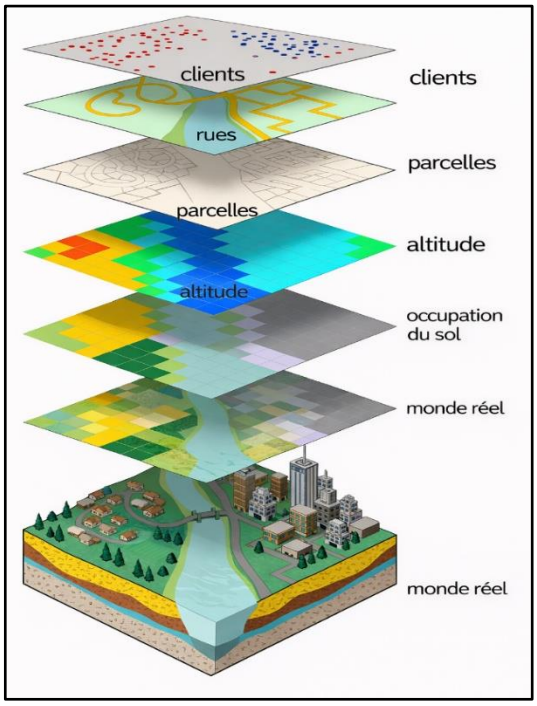


Figure 2.3 : Principe de la superposition de couches thématiques.

2.2.5 L'Analyse Spatiale et les Géo-traitements

Les fonctions spécifiques du SIG permettent de résoudre des problèmes analytiques complexes **[19]** :

- **Analyse de tampon (Buffer) :** Création de zones de protection ou d'exclusion autour d'obstacles (routes, habitations) **[18], [19]**.
- **Union et Merge :** Combinaison de plusieurs couches de données en une seule **[19]**.
- **Zonal Statistics :** Calcul de moyennes ou de statistiques sur une zone précise (ex : vent moyen sur un site) **[19]**.

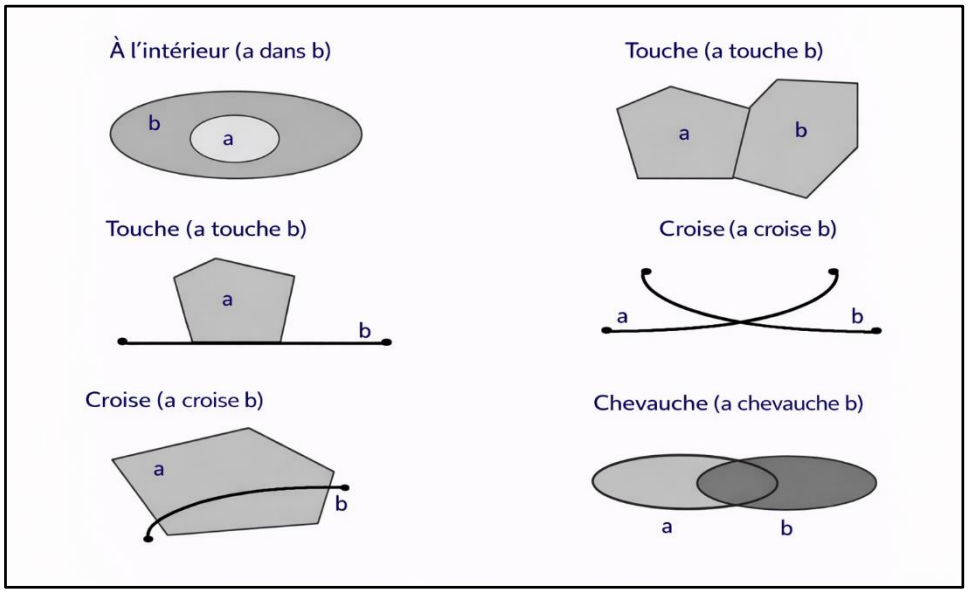


Figure 2.4 : Relations spatiales entre objets géographiques. **[38]**

2.3 Les Méthodes d'Analyse Multicritère (AMC)

« L'Analyse Multicritère (AMC) est un outil scientifique qui aide le décideur à trouver un compromis rationnel entre ces différents points de vue pour choisir la meilleure alternative possible » **[17], [18], [19]**. Différentes méthodes existent parmi elles :

2.3.1 La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) [17], [18], [19]

Conçue par Thomas Saaty, la méthode AHP formalise la détermination des coefficients de pondération associés aux critères par une approche de décomposition hiérarchique et de comparaison bilatérale.

1. **Décomposition hiérarchique :** Le problème décisionnel est structuré en niveaux successifs (Objectif global → Critères → Sous-critères → Alternatives).
2. **Comparaison par paires :** Les critères sont comparés deux à deux au sein d'une matrice de décision carrée $A = [a_{ij}]$ en appliquant l'échelle sémantique de Saaty (valeurs discrètes de 1 à 9).
3. **Calcul des poids et validation de la cohérence :** Les poids relatifs w_i sont dérivés du vecteur propre principal de la matrice. Afin de valider la rationalité des jugements, le Ratio de Cohérence (*CR*) est calculé via l'Indice de Cohérence (*CI*) :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Où λ_{max} représente la valeur propre maximale de la matrice, n l'ordre de la matrice, et RI l'indice aléatoire de cohérence théorique. Un CR < 10% valide la cohérence interne de la matrice.

2.3.2 La méthode TOPSIS [18], [21]

La méthode TOPSIS classe les alternatives en se basant sur le concept géométrique de distance euclidienne aux bornes idéales du problème.

1. **Construction de la matrice normalisée pondérée** : Les valeurs de performance sont adimensionnées puis multipliées par les poids w_i issus de l'AHP pour obtenir la matrice $V = [v_{ij}]$.
2. **Détermination des solutions idéales** : Identification de la solution idéale positive (A+) et de la solution idéale négative (A-) :

$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \ldots, v_n^+\}, \quad \text{où } v_j^+ = \max_i(v_{ij})$ pour un critère à maximiser

$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \ldots, v_n^-\}, \quad \text{où } v_j^- = \min_i(v_{ij})$ pour un critère à minimiser

3. **Calcul des distances et du score de proximité (C^i) :**

Les distances euclidiennes de chaque alternative *i* aux idéaux ($\boldsymbol{S_i^+}$et $\boldsymbol{S_i^-}$) permettent de déduire le coefficient de proximité relative :

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

Le score C_i^*, compris strictement entre 0 et 1, dicte le classement final de l'aptitude territoriale des sites : l'alternative présentant la valeur la plus proche de 1 constitue la solution optimale.

2.4 Vers une approche intégrée SIG-AMC

L'intégration du Système d'Information Géographique (SIG) et de l'Analyse Multicritère (AMC) constitue une approche puissante pour l'évaluation de l'aptitude des terres **[17].** Utilisés individuellement, ces outils présentent des limites :

- **Les limites du SIG seul :** Bien que performant pour le géo-traitement et la cartographie, le SIG ne possède pas nativement les fonctions nécessaires pour établir une grille de pondération rigoureuse. Il a tendance à traiter les critères de manière trop technique, sans pouvoir intégrer facilement les jugements subjectifs des experts ou des décideurs **[17]**.
- **Les limites de l'AMC seule :** À l'inverse, les méthodes AMC sont capables de gérer la complexité des décisions et des poids, mais elles sont souvent incapables de "spatialiser" leurs résultats. Elles produisent des classements sous forme de tableaux, mais ne disent pas "où" se situent ces solutions sur le terrain **[17]**.

La plus-value du couplage : L'approche intégrée SIG-AMC (ou Analyse Spatiale Multicritère - ASMC) permet de combler les lacunes de l'un par les forces de l'autre. Le SIG sert à créer les "cartes de critères" (vitesse du vent, pentes, distances), tandis que l'AMC est utilisée pour l'agrégation et la pondération de ces couches en fonction des objectifs du projet **[16], [17], [19]**. Dans le secteur de l'énergie, cette fusion facilite la planification stratégique et la rationalisation des investissements **[18]**.

2.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de mettre en évidence la puissance opérationnelle du couple SIG-AMC. Si le SIG, à travers le logiciel ArcMap, offre les capacités nécessaires pour structurer et manipuler l'information spatiale, les méthodes d'analyse multicritères apportent la rigueur décisionnelle indispensable à la gestion de critères contradictoires.

L'approche intégrée retenue permet de dépasser les limites de chaque outil pris isolément : elle spatialise la décision tout en garantissant une pondération objective des enjeux grâce à l'AHP et un classement précis des sites via la méthode TOPSIS. Cette structure méthodologique constitue le socle sur lequel repose l'identification des sites potentiels qui sera détaillée dans la partie expérimentale de ce travail.

Chapitre 3
Présentation de la zone d'étude.

3.1 Introduction

Ce chapitre présente la zone d'étude de la plaine de Mletta, en décrivant son contexte géographique, physique et climatique. Située dans un large couloir dépressionnaire entouré de massifs montagneux et littoraux, cette zone offre une topographie favorable à l'écoulement stable des vents. L'analyse détaillée des altitudes, pentes, expositions et paramètres climatiques permet de cerner le potentiel éolien du site tout en intégrant les contraintes géologiques, environnementales et humaines indispensables à la planification du projet.

3.2 Présentation du contexte géographique de la plaine de Mletta

La plaine de la Mletta est une plateforme dépressionnaire orientée Est-ouest, constituée de dépôts terrigènes provenant de l'érosion des montagnes bordières du Tessala et de dépôts éoliens (Figure 3.1). Au sud de la plaine, les Tessalas sont constitués d'un massif complexe long d'une cinquantaine de kilomètres. Ils culminent à 1061 *m* et surplombent vers 800 *m* la plaine de la Mletta, Les massifs littoraux constituent une limite Nord du sillon, ils culminent à 530m et offrent des reliefs plus restreints a la morphologie bien accusée **[22]**.

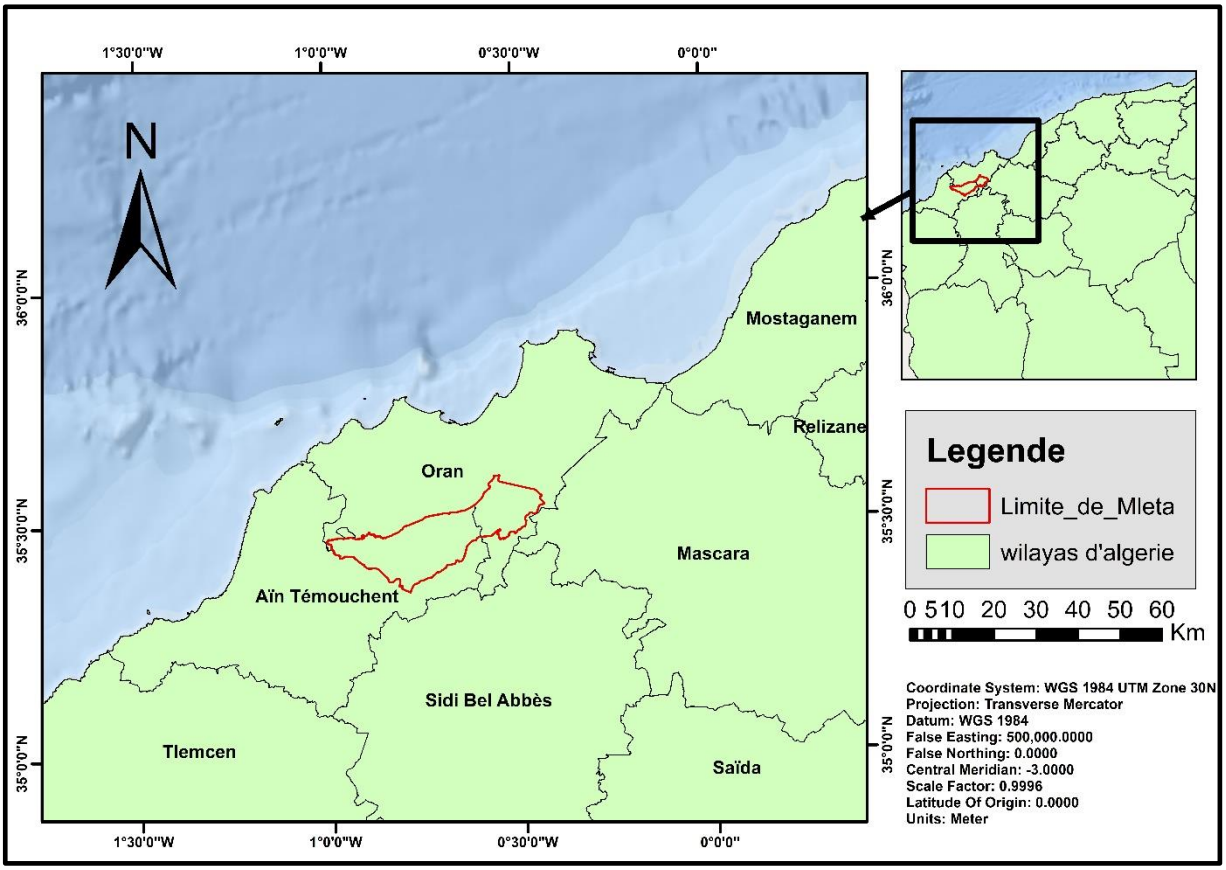


Figure 3.1 : Carte de situation géographique et délimitation de la plaine de la Mletta.

3.3 Cadre physique et naturel

L'évaluation de la faisabilité technique de notre projet repose prioritairement sur l'analyse des caractéristiques physiques du territoire. Cette section examine la configuration topographique et morphologique de la Plaine de Mletta à travers l'étude de ses altitudes, de ses pentes et de l'exposition de ses versants, des facteurs déterminants pour l'écoulement des flux d'air et la planification du génie civil.

3.3.1 Les Altitudes

En ingénierie éolienne, l'altitude et la topographie générale influencent directement le comportement de la couche limite atmosphérique. L'analyse de la carte des altitudes montre que la plaine de Mletta constitue un vaste couloir bas et plan, avec des altitudes très régulières comprises entre 56 et 189 mètres (nuances de vert clair) (Figure 3.2). Ce fossé d'effondrement est flanqué au nord par des massifs côtiers et au sud par les barrières montagneuses de l'Atlas Tellien dépassant les 700 mètres (zones brunes et blanches). Cette configuration topographique crée un effet de couloir naturel, idéal pour guider et accélérer les masses d'air de manière stable à basse altitude, sans générer les turbulences excessives que l'on retrouverait en sommet de montagne rugueux.

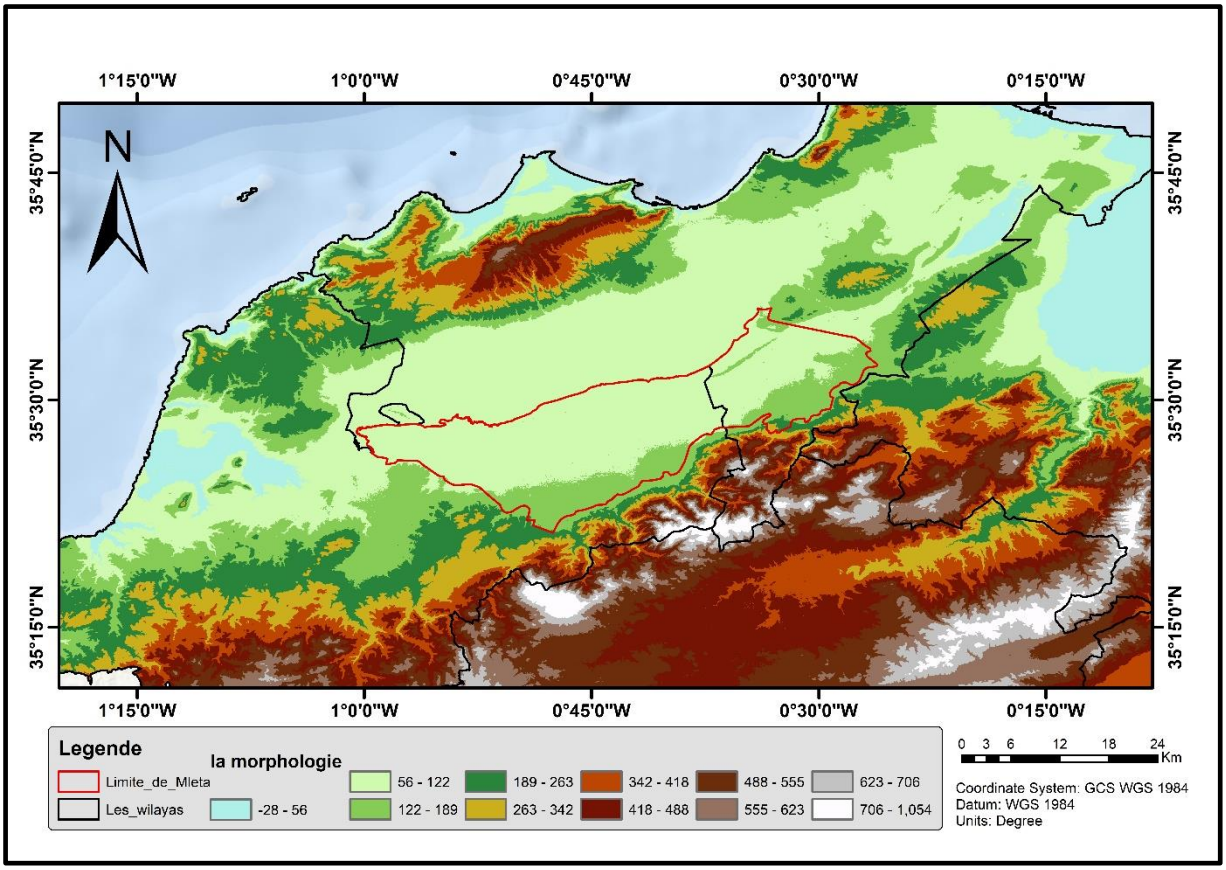


Figure 3.2 : Carte des altitudes de la zone d'étude.

3.3.2 Les Pentes

L'analyse de la pente du terrain est un facteur restrictif majeur pour les travaux de génie civil et l'acheminement des composants lourds des aérogénérateurs. L'examen de la carte des pentes met en évidence un relief globalement plat sur l'ensemble de la zone d'étude, avec des valeurs très faibles majoritairement inférieures à 2 % (Figure 3.3). Cette planéité remarquable élimine les risques d'instabilité des versants et simplifie grandement l'accessibilité des engins de chantier pour le transport des pales et des mâts. Seules les bordures sud, correspondant aux contreforts du massif du Tessala, affichent des pentes plus prononcées qui seront automatiquement écartées lors de la phase de filtrage spatial.

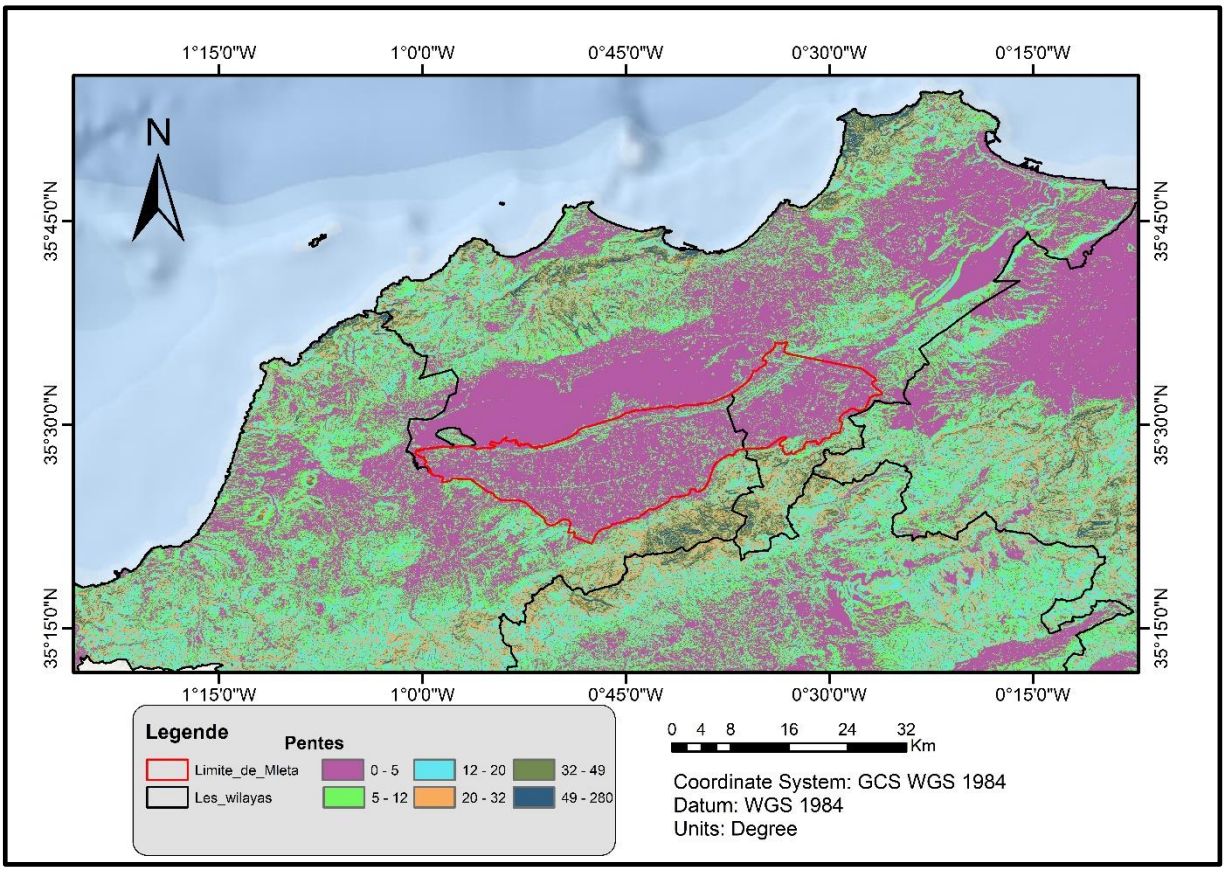


Figure 3.3 : Carte des pentes de la plaine de la Mletta.

3.3.3 L'Exposition

L'orientation des versants (l'exposition) joue un rôle indirect mais important dans l'analyse du relief, puisqu'elle permet d'identifier l'alignement des pentes face aux vents dominants. L'examen de la Figure 3.4 met en évidence la topographie globalement plane et régulière de la plaine de Mletta. À l'intérieur du périmètre d'étude (délimité en rouge), l'exposition se traduit par une imbrication diffuse et homogène de toutes les directions (mosaïque de pixels Nord, Sud, Est, Ouest), ce qui confirme l'absence de versants ou de barrières topographiques majeures capables de bloquer ou de dévier localement les flux d'air au niveau du sol.

Cette uniformité globale au centre garantit que les éoliennes ne subiront pas d'effets d'ombrage aérodynamique liés au relief environnant. En revanche, les seules variations topographiques nettes et structurées (versants bien définis) apparaissent nettement à l'extérieur de la plaine, notamment sur les reliefs du massif du Tessala au sud et des massifs côtiers au nord, matérialisant des lignes de crêtes contrastées qui n'impactent pas la zone d'implantation potentielle.

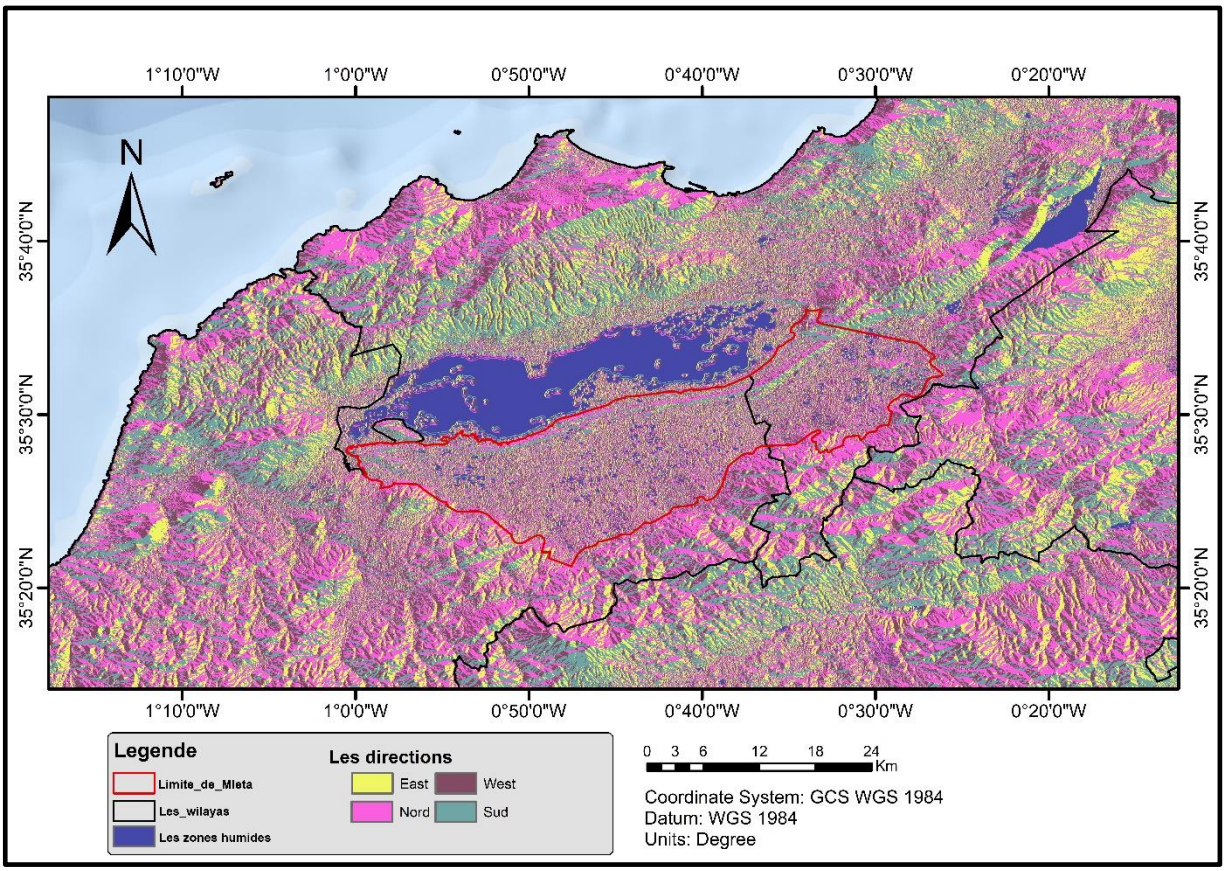


Figure 3.4 : Carte de l'exposition des versants.

3.4 Cadre climatique

L'analyse des paramètres climatiques constitue le cœur moteur de notre étude, déterminant directement la viabilité technique et la rentabilité économique du futur parc éolien. La plaine de la Mletta est soumise à des dynamiques atmosphériques locales bien particulières, marquées par une forte influence semi-aride et des circulations de masses d'air spécifiques au couloir oranais **[23]**. Cette section est consacrée à l'examen approfondi du gisement aérologique du site en évaluant la vitesse, la répartition spatiale et la direction des vents dominants afin de justifier le choix des technologies à implémenter et l'orientation optimale des futures installations.

3.4.1 Les Vents

C'est la carte maîtresse pour évaluer la productivité du futur parc éolien (Figure 3.5). L'analyse aérologique montre que la plaine de Mletta est balayée par des vents de direction prédominante Ouest à Ouest-Sud-Ouest, ce qui impose d'ores et déjà une orientation des lignes d'aérogénérateurs selon un axe Nord-Sud pour capter au mieux l'énergie cinétique.

Sur le plan de la vitesse, on observe un gradient spatial d'Est en Ouest. La zone occidentale (côté Aïn Témouchent) enregistre les vitesses les plus importantes du secteur (4.57 m/s, en bleu foncé), tandis que la vitesse décroît vers l'Est (4.05 m/s, en bleu clair). Bien que ces vitesses moyennes au sol semblent modérées pour de l'éolien de grande puissance, elles justifient l'étude de l'utilisation d'éoliennes de classe III (adaptées aux vents faibles à modérés) ou nécessitent une extrapolation de ces vitesses à la hauteur du moyeu (80 ou 100 mètres de haut) où le vent est nettement plus fort.

Le graphique de Figure3.6 montre une concentration exclusive des flux dans le secteur **Ouest (W)** à **Ouest-Sud-Ouest (WSW)**. Cette régularité directionnelle est idéale pour stabiliser le rendement du gisement éolien et impose d'aligner les futures turbines selon un axe **Nord-Sud** pour capter le vent de face de manière optimale.

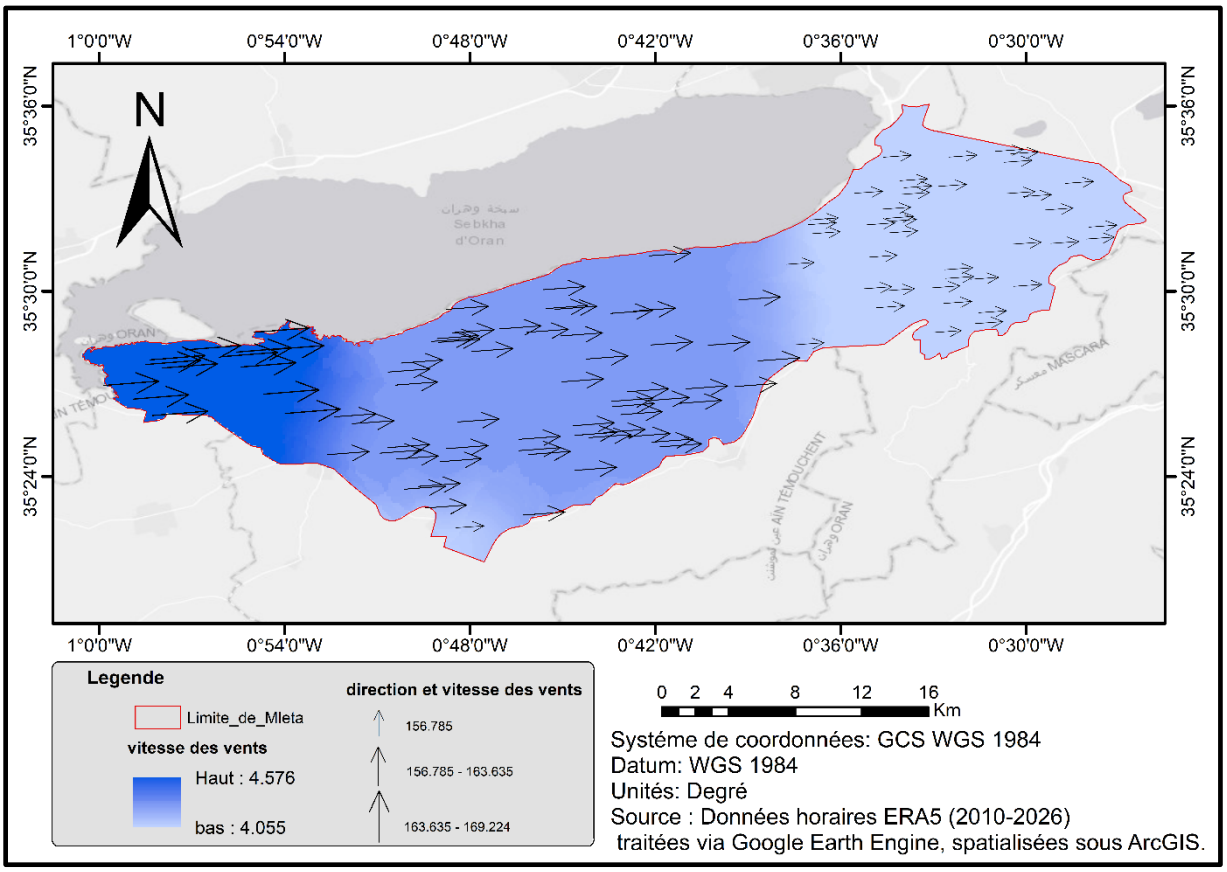


Figure 3.5 : Répartition spatiale de la vitesse et de la direction des vents dominants.

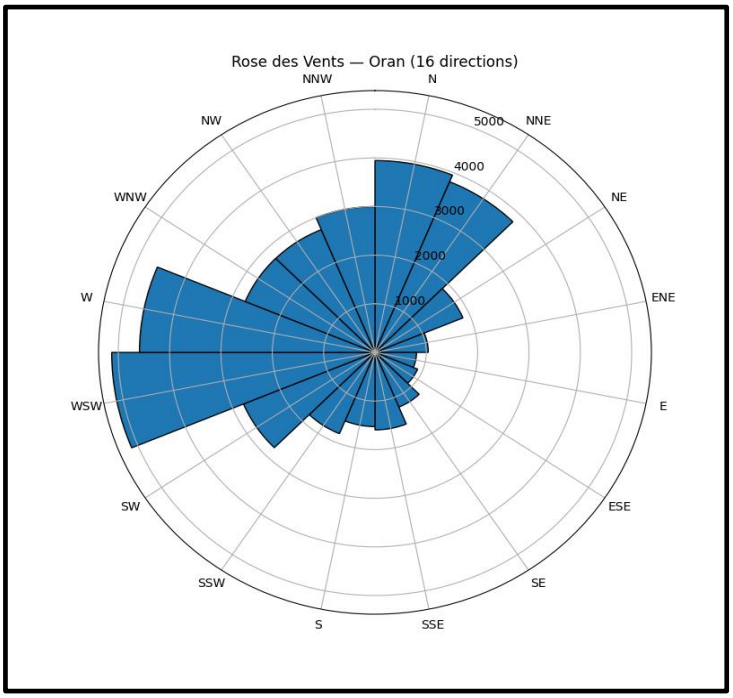


Figure 3.6 : Rose des vents de la plaine de la Mletta.

3.4.2 Modélisation algorithmique et structuration de la base de données éolienne ERA5

L'évaluation du potentiel éolien à la hauteur réglementaire de moyeu (100 mètres) requiert une approche méthodologique rigoureuse capable de gérer d'immenses volumes de données climatiques. Pour dépasser les limites des stations météorologiques au sol — souvent incomplètes, localisées ou mesurées à seulement 10 mètres de hauteur —, nous avons mis en place une chaîne de traitement automatisée basée sur l'informatique en nuage (*Cloud Computing*) via la plateforme **Google Earth Engine (GEE)**.

```
// ============================================================
// CODE PFE MLETTA - GRILLE DE POINTS COMPLÈTE (ERA5)
// ============================================================

// 1. Définition de la zone d'étude (Plaine de la Mletta)
var region = ee.Geometry.Rectangle([-1.1, 35.35, -0.4, 35.65]);
Map.centerObject(region, 10);

// 2. Chargement et filtrage de la collection historique ERA5 (2010 - 2026)
var dataset = ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5/HOURLY")
  .filterDate('2010-01-01', '2026-01-01')
  .filterBounds(region)
  .filter(ee.Filter.inList('hour', [0, 6, 12, 18]))
  .select(['u_component_of_wind_10m', 'v_component_of_wind_10m', 'u_component_of_wind_100m',
'v_component_of_wind_100m']);

// 3. Traitement mathématique et calcul des variables aérologiques
var processed = dataset.map(function(img) {
  // Calcul des vitesses réelles brutes (Norme du vecteur par Pythagore)
  var s10 = img.expression('sqrt(u*u + v*v)', {
    'u': img.select('u_component_of_wind_10m'),
    'v': img.select('v_component_of_wind_10m')
  }).rename('speed_10m_ms');

  var s100 = img.expression('sqrt(u*u + v*v)', {
    'u': img.select('u_component_of_wind_100m'),
    'v': img.select('v_component_of_wind_100m')
  }).rename('speed_100m_ms');

  // Extrapolation physique à 50m (Loi de puissance de Hellmann - exposant de rugosité standard 0.14)
  var s50 = s10.multiply(1.251).rename('speed_50m_ms');

  // Calcul trigonométrique des directions de provenance (Correction de l'ordre atan2(v, u))
  var d10 = img.expression('(atan2(v, u) * 180 / pi + 180) % 360', {
    'u': img.select('u_component_of_wind_10m'),
    'v': img.select('v_component_of_wind_10m'),
    'pi': Math.PI
  }).rename('dir_10m_deg');

  var d100 = img.expression('(atan2(v, u) * 180 / pi + 180) % 360', {
    'u': img.select('u_component_of_wind_100m'),
    'v': img.select('v_component_of_wind_100m'),
    'pi': Math.PI
  }).rename('dir_100m_deg');

  var d50 = d10.add(d100).divide(2).rename('dir_50m_deg');

  // Division sectorielle pour la rose des vents (16 directions de 22.5°)
  var sector = d100.divide(22.5).round().int().mod(16).rename('sector');
```

```
  return img.addBands([s10, s50, s100, d10, d50, d100, sector]);
});

// 4. Calcul de la moyenne temporelle globale (2010-2026)
var moyenneImg = processed.mean().clip(region);

// 5. Génération de la grille d'échantillonnage de points réguliers (Maillage de ~4km)
var gridPoints = region.coveringGrid(region.projection(), 4000);

// 6. Extraction des valeurs moyennes sur la grille de points
var spatialPoints = moyenneImg.reduceRegions({
  collection: gridPoints,
  reducer: ee.Reducer.first(),
  scale: 1000
}).map(function(f) {
  var coords = f.geometry().centroid().coordinates();
  return f.set({
    'COORD_X_Lon': ee.Number(coords.get(0)),
    'COORD_Y_Lat': ee.Number(coords.get(1))
  });
}).filter(ee.Filter.notNull(['speed_10m_ms'])); // Élimination des points en dehors des limites

// 7. Configuration de l'exportation automatique vers Google Drive (Format CSV)
Export.table.toDrive({
  collection: spatialPoints,
  description: 'GRILLE_POINTS_MLETTA_ERA5_FINAL',
  fileFormat: 'CSV',
  selectors: ['COORD_X_Lon', 'COORD_Y_Lat', 'speed_10m_ms', 'speed_50m_ms', 'speed_100m_ms', 'dir_10m_deg',
'dir_50m_deg', 'dir_100m_deg', 'sector']
});
```

Le processus global s'articule autour de quatre grandes phases interconnectées :

1. **Le filtrage spatial et temporel :** Nous interrogeons la base de données mondiale de réanalyse ERA5-Hourly (produite par le CEPMMT / ECMWF) sur une fenêtre historique de 16 ans (2010 à 2026). Le script restreint l'analyse géographique aux coordonnées exactes de la plaine de la Mletta et cible quatre horaires stratégiques par jour (00h, 06h, 12h, 18h UTC) afin de capter la variabilité diurne du vent.
2. **Le calcul vectoriel et trigonométrique :** Les données brutes d'ERA5 fournissant le vent sous forme de composantes vectorielles horizontales (u pour l'axe Est-Ouest et v pour l'axe Nord-Sud), le script applique le théorème de Pythagore pour reconstituer la vitesse réelle ($v = \sqrt{u^2} + v^2$). Parallèlement, la fonction trigonométrique `atan2(v, u)` est mobilisée pour recalculer avec exactitude l'angle de provenance des flux d'air (direction).
3. **L'extrapolation verticale :** Bien que les données à 10m et 100m soient issues de mesures directes du modèle, une variable intermédiaire à 50 mètres est générée par le script en appliquant la loi de puissance de Hellmann (profil vertical du vent). Cela

permet d'analyser le comportement du fluide à différentes altitudes de la couche limite atmosphérique.

4. **Le maillage et l'exportation SIG :** Au lieu d'extraire des données ponctuelles isolées, l'algorithme génère une grille systématique et régulière sur l'ensemble de la plaine. Pour chaque intersection de cette grille, la moyenne temporelle de l'ensemble des variables sur 16 ans est calculée. Ce processus permet de transformer des millions de données horaires lourdes en un fichier final unique au format CSV, structuré, léger et prêt à être spatialisé par interpolation (IDW ou Krigeage) dans notre environnement SIG.

3.5 Cadre physique et facteurs d'éligibilité techniques

L'analyse géologique est une composante majeure du génie civil pour l'ancrage des aérogénérateurs. Les structures éoliennes imposent des charges dynamiques et statiques massives au sol, exigeant des formations géologiques à forte capacité portante.

3.5.1 La Géologie

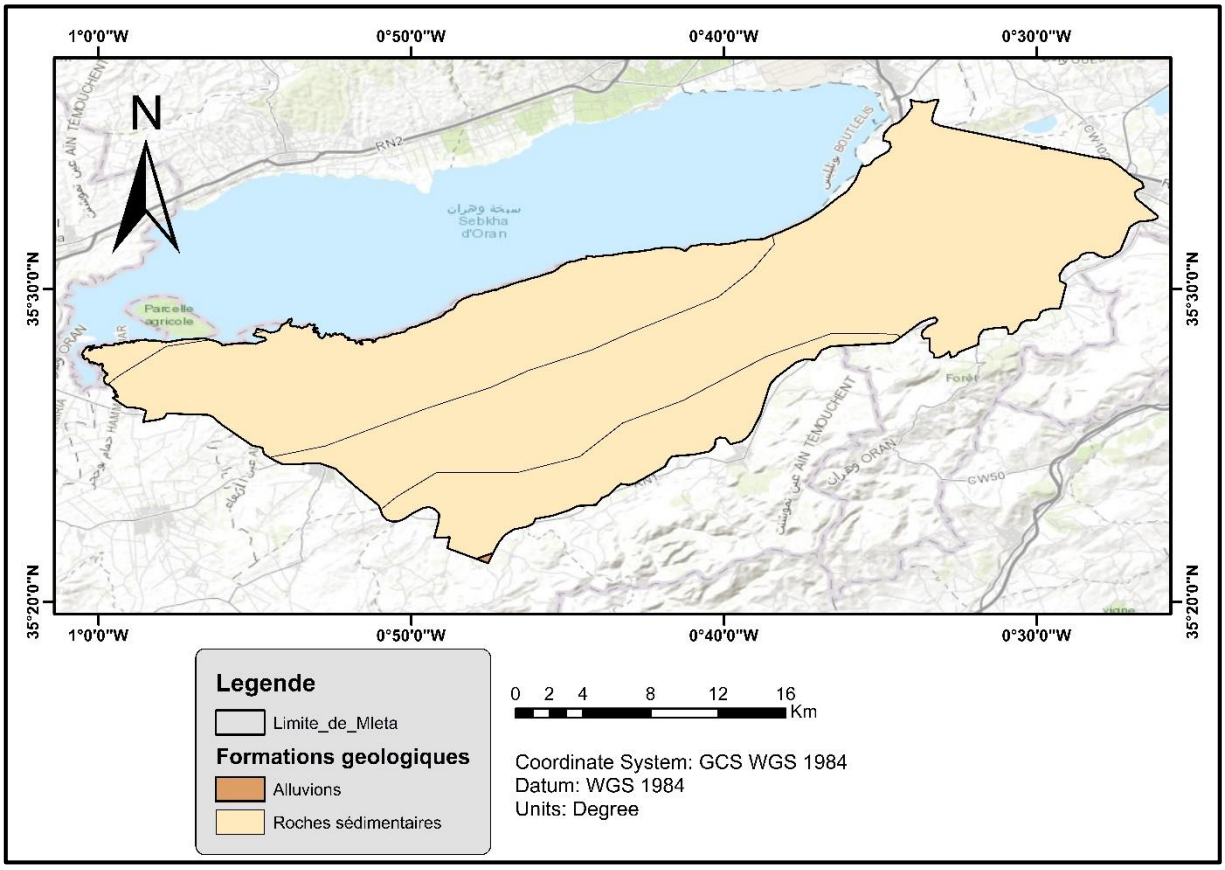


Figure 3.7 : Carte géologique de la plaine de la Mletta

La Figure 3.7 matérialise la constitution géologique de la plaine de Mletta. L'espace d'étude est majoritairement recouvert de formations sédimentaires, avec une apparition locale d'alluvions sur la frange méridionale. Ces alluvions représentent des dépôts de surface meubles (sables, limons et graviers) et non une roche compacte. Dans ce secteur, la roche mère stable se situe en profondeur, entre 20 et 50 mètres sous ces couches de surface.

Sur le plan de l'ingénierie, cette configuration n'oppose aucun obstacle majeur à la réalisation du projet. Bien que la zone sud en alluvions demande une vigilance accrue en raison de sa sensibilité à l'eau, l'ensemble de la plaine reste exploitable. L'absence de relief élimine les risques de glissement de terrain. Pour un projet d'une telle envergure, le bureau d'études devra simplement prévoir des fondations profondes par pieux ancrés dans la roche mère stable, ou des radiers renforcés après compactage du sol **[24]**. Cette solution technique standard, validée par les guides officiels de construction, garantit une sécurité absolue et une parfaite stabilité des éoliennes face aux forces du vent.

3.6 Cadre humains et contraintes environnementales d'exclusion

L'évaluation technique d'un territoire ne peut se détacher des réalités humaines, réglementaires et environnementales qui le composent. En effet, la plaine de la Mletta fait face à des enjeux environnementaux et anthropiques majeurs, notamment liés à la salinisation de ses sols, à la proximité de la Sebkha et à la gestion globale de son espace agraire **[23]**. Cette section s'intéresse à l'analyse fine de l'occupation du sol au sein de la plaine, un paramètre indispensable pour identifier les surfaces exploitables à fort potentiel, tout en définissant les zones tampons de sécurité réglementaires nécessaires à la protection des populations locales et des écosystèmes sensibles.

3.6.1 L'Occupation du Sol

Dans le cadre d'une analyse multicritère, l'occupation du sol sert à identifier les zones disponibles et à éviter les conflits d'usage.

La carte illustre dans la Figure 3.8 révèle l'omniprésence de la classe « Cultures » (en jaune), idéale pour l'éolien car la faible empreinte au sol des mâts permet une coactivité parfaite avec l'agriculture. En revanche, les « Zones bâties » (en rouge), représentant les douars, constituent des zones d'exclusion stricte pour éviter les nuisances sonores et visuelles pour les populations,

tandis que les « Sols nus » (en gris) en bordure de la Sebkha offrent une excellente disponibilité foncière

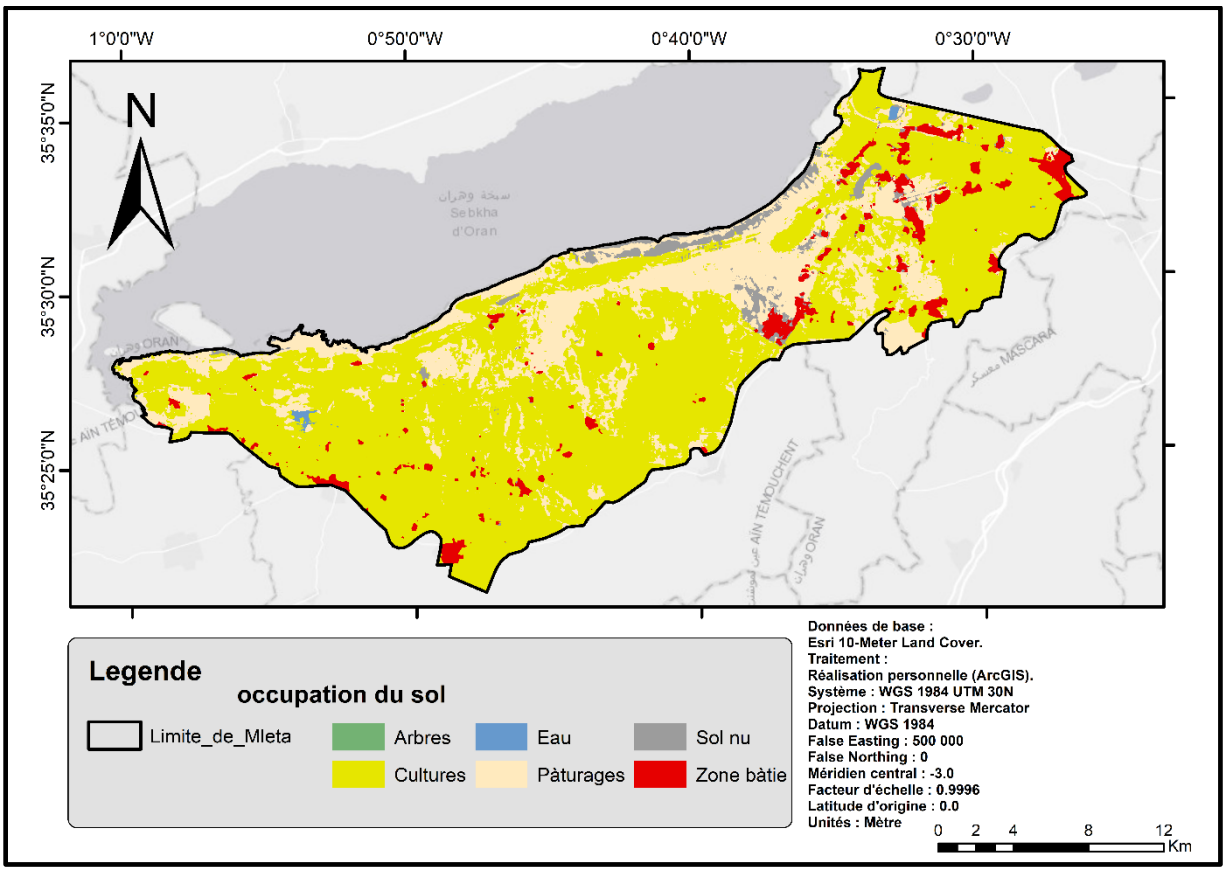


Figure 3.8 : Carte de l'occupation du sol de la plaine de Mletta.

3.6.2 Les zones de retrait, Carte des contraintes légales et environnementales:

Cette carte illustrée dans la Figure 3.9 est le produit final de la modélisation des contraintes environnementales et de sécurité. Les « zones de retrait » (buffers) hachurées appliquent les distances de sécurité réglementaires autour des enjeux majeurs : une zone tampon d'exclusion pour éloigner les turbines des habitations (nuisances acoustiques et sécurité en cas de rupture de pale), une zone de retrait le long des infrastructures routières et lignes électriques existantes, et enfin une zone de protection environnementale en bordure de la Sebkha d'Oran (protection de l'avifaune et des oiseaux migrateurs contre les risques de collision). Les espaces restés vierges sur cette carte représentent les zones propices finales (les sites d'implantation potentiels) pour le projet éolien.

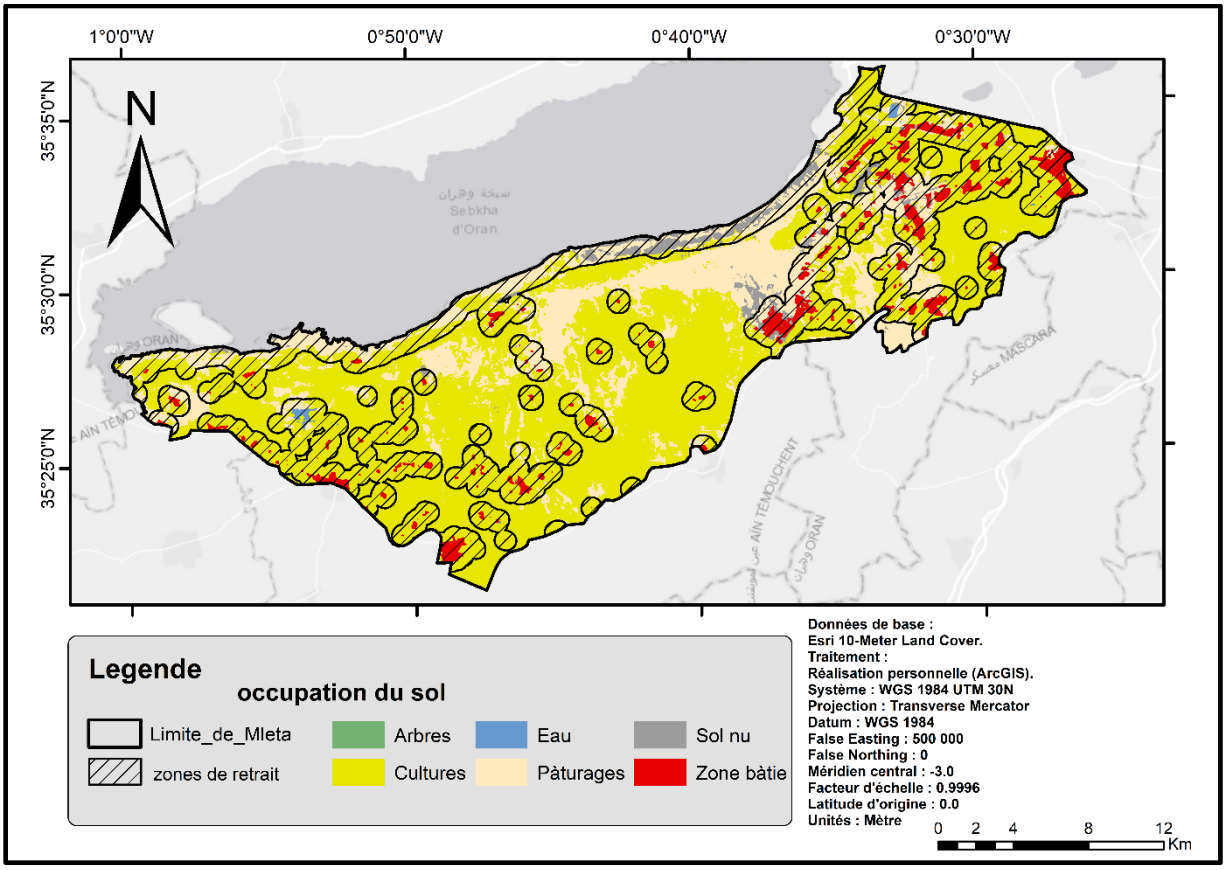


Figure 3.9 : Carte des contraintes d'aménagement

3.7 Conclusion

Ce troisième chapitre a permis de dresser un état des lieux complet et multidimensionnel de la plaine de Mletta, confirmant la pertinence de ce territoire pour l'implantation de notre projet. L'analyse topographique a mis en évidence un relief particulièrement plan, optimal pour la logistique et les travaux de génie civil. L'évaluation aérologique a validé la viabilité du gisement, révélant des flux stables et majoritairement orientés d'Ouest à Ouest-Sud-Ouest. Par ailleurs, l'étude de l'occupation du sol a montré une forte prédominance des surfaces agricoles favorables à une coactivité avec l'éolien, tout en identifiant clairement les zones bâties et environnementales à protéger. Cette approche intégrée prend en compte non seulement les atouts techniques, mais également les contraintes humaines et environnementales, essentiels à une planification durable. L'ensemble de ces données spatiales constitue désormais une base solide à exploiter dans la suite de notre étude, qui visera à optimiser précisément le positionnement des turbines via une modélisation multicritère, garantissant ainsi un équilibre entre performance énergétique et respect des écosystèmes locaux.

Chapitre 4

Approche méthodologique et conceptuelle.

4.1 Introduction

Ce chapitre constitue le cœur opérationnel de notre étude, visant à identifier le site optimal pour l'implantation des turbines éoliennes dans la plaine de la Mletta. Notre démarche débute par un filtrage rigoureux du territoire afin d'éliminer les zones d'exclusion absolues, notamment autour du tissu bâti et de la Sebkha d'Oran. Pour classer les sites restants, notre évaluation territoriale repose principalement sur l'approche multicritère TOPSIS, exécutée via une extension personnalisée que nous avons développée sous ArcMap 10.8. Afin de consolider et de valider scientifiquement ces résultats, nous confrontons cette approche à notre propre extension AHP. Enfin, nous appliquons notre outil dédié à l'implantation automatisée pour simuler la disposition optimale des aérogénérateurs. Cette méthodologie hybride garantit une validation rigoureuse et transparente du choix final avant d'aborder les résultats cartographiques.

4.2 Prétraitement et cartographie des contraintes

Cette phase consiste à traiter les données spatiales brutes pour délimiter précisément les surfaces exploitables au sein de la Plaine de Mletta.

4.2.1 Vectorisation des données d'occupation du sol

La première étape technique repose sur la conversion des données matricielles en entités vectorielles sous ArcMap 10.8 pour permettre des calculs géométriques précis. Nous avons ainsi utilisé l'outil "Raster to Polygon" pour transformer les classes d'occupation du sol (zones bâties et Sebkha d'Oran) en polygones exploitables.

D'un point de vue décisionnel, ces couches vectorielles représentent des zones de contraintes majeures régies par des servitudes d'utilité publique où toute proximité immédiate est proscrite. La structuration topologique de ces polygones s'avère donc indispensable pour automatiser, lors de l'étape suivante, le tracé des zones d'exclusion par mémoire tampon (*buffers*). L'application cartographique concrète de ces entités vectorisées sur le territoire de la Plaine de Mletta sera présentée en détail au Chapitre 5.

4.2.2 Modélisation Des Zones Tampons (Buffers)

Une fois les entités vectorisées, nous appliquons des contraintes spatiales basées sur des critères de sécurité et de protection environnementale. La création des zones tampons (*Buffers*) est essentielle pour respecter les distances réglementaires. Pour le bâti, un périmètre de sécurité variant entre 500m et 1km est établi afin de protéger les zones résidentielles. Concernant la Sebkha d'Oran, un retrait de 1km est appliqué pour préserver cet écosystème sensible.

Technique, ce géo-traitement est configuré via l'outil *Buffer* d'ArcMap, tel qu'illustré dans la Figure 4.1 . L'utilisation de l'option "Dissolve Type: ALL" (ou *LIST*) s'avère ici indispensable pour garantir une couche d'exclusion continue et fusionnée, évitant ainsi tout chevauchement topologique lors des calculs.

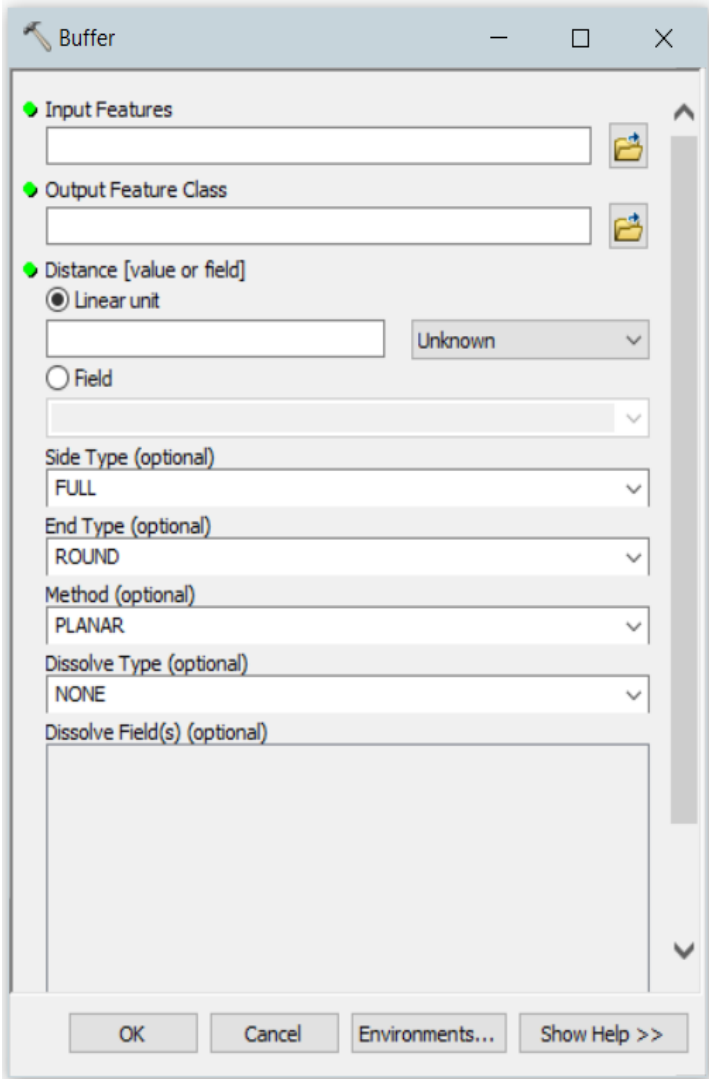


Figure 4.1 : Fenêtre de configuration de l'outil de géo-traitement Buffer sous ArcMap.

D'un point de vue méthodologique, cette couche combinée fait office de **masque d'exclusion absolu**. Elle permet d'éliminer directement et définitivement les surfaces inaptes des autres couches thématiques, restreignant ainsi l'analyse multicritère ultérieure aux zones réellement exploitables. La carte résultante de ces rayons de protection générés sur la Plaine de Mletta sera présentée au début du Chapitre 5.

4.2.3 Sélection et intégration des quatre critères de décision

Une fois le masque d'exclusion appliqué pour écarter définitivement les surfaces inaptes, l'étape suivante consiste à qualifier le potentiel du foncier restant (les zones favorables). Pour cela, notre modèle d'évaluation repose sur la sélection de quatre critères physiques et environnementaux majeurs.

Chaque couche d'information brute sera découpée selon ce filtre pour éliminer directement les zones non favorables, convertie au format raster sous ArcMap 10.8, puis intégrée dans nos outils d'analyse multicritère. Notre modèle s'articule ainsi autour des quatre facteurs suivants :

- **La vitesse du vent (Potentiel éolien) :** Variable maîtresse pour la rentabilité du projet, traitée comme un critère de profit pour valoriser les zones aux vitesses moyennes les plus élevées.
- **La pente du terrain (Contrainte topographique) :** Ce facteur quantifie la difficulté d'aménagement du relief. Les fortes pentes engendrent des surcoûts de génie civil, ce qui en fait un critère de coût à minimiser.
- **L'exposition des versants (Orientation) :** Paramètre crucial pour cibler l'orientation des reliefs par rapport aux vents dominants de la Plaine de Mletta afin de maximiser l'efficacité des aérogénérateurs.
- **L'altitude (MNT) :** Intégrée à partir du modèle numérique de terrain, elle permet d'identifier les variations d'élévation, les points hauts étant généralement privilégiés pour capter des flux de vent plus stables.

La carte d'exclusion finale isolant le foncier disponible (surfaces vertes) des zones strictement interdites (surfaces rouges) sera présentée en détail au début du Chapitre 5 comme point de départ des simulations.

4.3. Standardisation et reclassification thématique des critères d'entrée

La diversité des unités de mesure des facteurs d'entrée (la vitesse du vent en m/s, la pente du terrain en degrés, ou encore l'altitude en mètres) empêche toute comparaison géométrique ou combinaison directe. Pour s'affranchir de ces disparités d'échelles, il est indispensable de procéder à une phase de standardisation uniforme avant d'appliquer nos modèles décisionnels.

Nous utilisons pour cela l'outil Reclassify d'ArcMap 10.8 afin de discrétiser chaque couche raster continue en cinq classes d'aptitude distinctes, graduées sur une échelle commune allant de 1 (aptitude très faible) à 5 (aptitude très forte). L'importance fondamentale de cette reclassification réside dans sa capacité à traduire des valeurs physiques brutes en valeurs décisionnelles (scores d'attractivité). Elle permet d'établir un langage commun unique, éliminant la subjectivité des unités originales.

L'interface de ce traitement sous ArcMap est illustrée par la Figure 4.2.

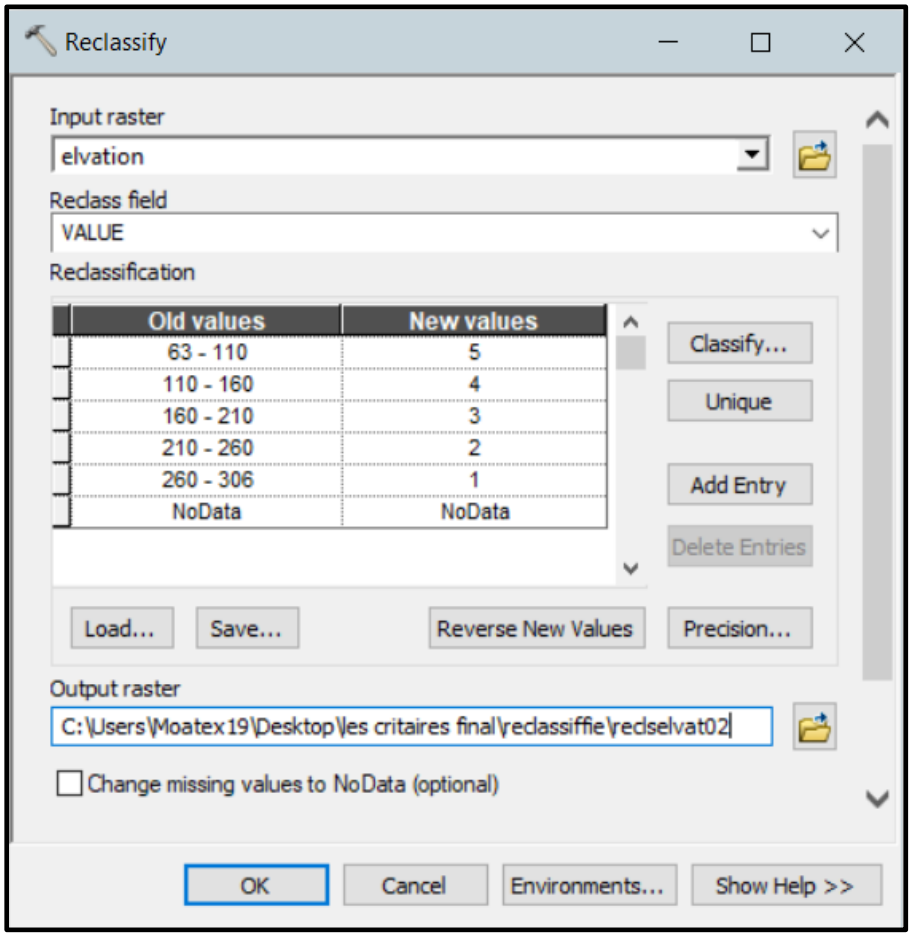


Figure 4.2 : Exemple de reclassification thématique des critères sous ArcMap 10.8.

Cette base de données reclassée et harmonisée constitue la source unique qui alimentera de manière synchrone nos deux moteurs de calcul : l'analyse hiérarchique (AHP) pour la validation et l'algorithme TOPSIS pour le classement final.

4.4 Analyse multicritère via l'extension "TOPSIS"

Cette section détaille le moteur de calcul principal de notre étude, développé spécifiquement pour répondre à nos besoins d'implantation.

4.4.1. Développement de l'outil TOPSIS

L'évaluation de l'aptitude territoriale de la Plaine de Mletta repose sur l'algorithme mathématique de TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution). Bien qu'ArcMap propose des fonctionnalités d'analyse multicritère classiques par somme pondérée, aucun outil natif standard n'intègre le calcul des distances géométriques par rapport aux solutions idéales positives et négatives.

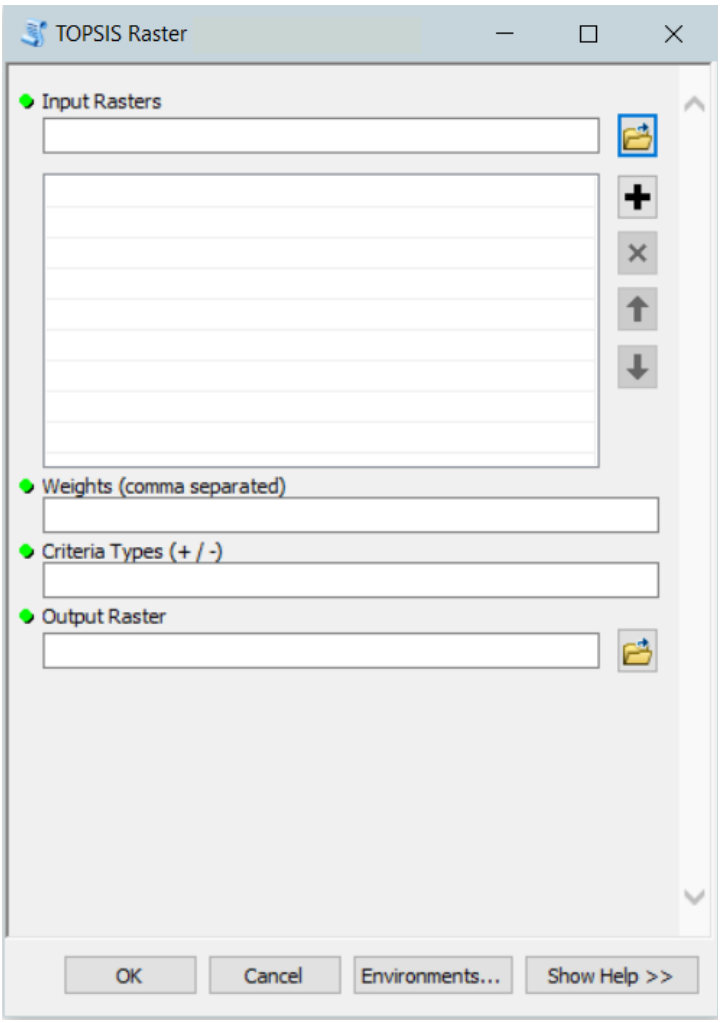


Figure 4.3 : Interface graphique de l'extension TOPSIS personnalisée développée sous ArcMap 10.8

Afin de combler ce manque méthodologique et d'automatiser la chaîne de traitement spatial, nous avons développé une extension dédiée (boîte à outils personnalisée) entièrement scriptée en Python via la bibliothèque ArcPy. Cet outil automatise le classement des sites en calculant, pixel par pixel sur l'ensemble de la grille raster, sa distance relative par rapport à une solution idéale positive (la configuration la plus favorable) et une solution idéale négative (la configuration la plus contraignante). L'intégration de scripts Python permet non seulement de s'affranchir des tâches répétitives, mais garantit également la répétabilité du modèle en cas de modification des poids ou des critères d'entrée.

L'interface graphique de l'outil, développée pour s'intégrer parfaitement dans l'environnement ArcToolbox, est présentée dans la (Figure 4.3).

4.4.2 Normalisation et traitement des critères

Une fois la standardisation préliminaire par reclassification (notes de 1 à 5) effectuée, les couches rasters sont injectées dans notre extension Python. Pour que l'algorithme TOPSIS puisse traiter les données de manière mathématiquement rigoureuse, l'outil exécute automatiquement une **normalisation vectorielle interne** pixel par pixel.

Ce processus convertit les scores reclassés en valeurs adimensionnelles comprises entre 0 et 1. L'algorithme calcule le rapport entre la valeur de chaque pixel et la racine carrée de la somme des carrés de toutes les cellules de la matrice raster correspondante. Ce traitement garantit que chaque facteur d'entrée est projeté sur une plage de variation strictement comparable avant l'application des coefficients d'importance.

Les spécifications géométriques des quatre critères retenus, leur orientation décisionnelle (profit à maximiser ou coût à minimiser), ainsi que le vecteur de poids synchronisés pour l'évaluation multicritère sont synthétisées dans le **Tableau 4.1**.

Critères	Poids	Nature du critère
Vitesse Des Vents	70% (0,70)	+ (À maximiser)
Altitude	15% (0,15)	+ (À maximiser)
Exposition Des Versants	10% (0,10)	+ (À maximiser)
Les Pentes	5% (0,05)	- (À minimiser)

Tableau 4.1 : Matrice d'évaluation et performances des critères.

4.5. Validation par la méthode AHP

L'utilisation de la méthode AHP vient consolider de manière rigoureuse les choix de pondération appliqués dans notre modèle TOPSIS. Dans toute analyse multicritère, la détermination du poids des facteurs est une phase critique où la subjectivité de l'analyste peut biaiser les résultats. L'intégration de l'approche AHP permet de rationaliser cette étape en convertissant des jugements qualitatifs en valeurs numériques objectives grâce à des comparaisons systématiques par paires.

4.5.1. Conception et développement de l'extension AHP :

Afin d'intégrer efficacement la méthode AHP dans notre flux de travail géomatique et d'assurer une cohérence absolue avec nos scripts précédents, nous avons développé une extension logicielle personnalisée entièrement intégrée à l'environnement ArcMap 10.8. Cet outil a été programmé en Python afin d'automatiser la saisie des matrices de comparaison et de calculer instantanément les vecteurs propres ainsi que le ratio de cohérence (CR).

Le premier niveau de l'arborescence correspond à l'objectif global de l'étude (l'identification des sites optimaux pour l'implantation du parc éolien de la Plaine de Mletta), tandis que le second niveau rassemble exclusivement nos quatre critères physiques, topographiques et environnementaux (Vitesse du vent, Pente, Exposition, Altitude). L'interface utilisateur de cette boîte à outils personnalisée, matérialisant la structure hiérarchique et la matrice d'évaluation, est illustrée par la Figure 4.4.

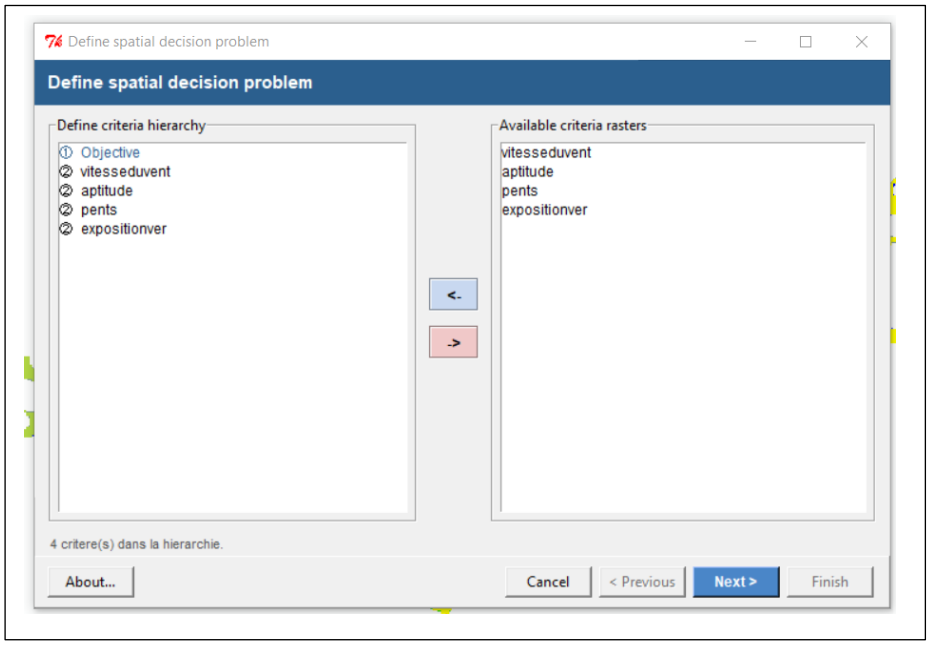


Figure 4.4 : Interface graphique de l'extension AHP personnalisée développée sous ArcMap 10.8.

4.5.2 Matrice de Saaty et calcul de la cohérence

La détermination des poids des critères repose sur l'établissement d'une matrice de comparaison par paires, où chaque facteur est évalué par rapport aux autres sur l'échelle numérique de Saaty allant de 1 (importance égale) à 9 (importance absolue). Dans le cadre de notre modèle, une priorité absolue a été attribuée à la ressource éolienne, exploitée à partir des données climatiques de référence (ERA5/NASA), car la vitesse du vent conditionne directement la rentabilité et la viabilité technique du futur parc.

Pour valider scientifiquement ces choix et éliminer toute subjectivité arbitraire, la cohérence globale des jugements portés a été vérifiée par le calcul du Ratio de Cohérence (CR). Conformément à la théorie mathématique de Saaty, la distribution des poids est considérée comme stable et valide si ce ratio est strictement inférieur à 10%. Les valeurs de notre matrice de comparaison par paires rééquilibrée, ainsi que les vecteurs de poids finaux générés pour nos quatre critères, sont synthétisées dans le Tableau 4.2.

.

	Vitesse Des Vents	Altitude	Exposition Des Versants	Les Pentes	Poids Émergents (Priorité)
Vitesse Des Vents	**1**	**5**	**6**	**8**	**70% (0,70)**
Altitude	**1/5 (0,2)**	**1**	**2**	**4**	**15% (0,15)**
Exposition Des Versants	**1/6 (0,17)**	**1/2 (0,5)**	**1**	**2**	**10% (0,10)**
Les Pentes	**1/8 (0,13)**	**1/4 (0,25)**	**1/2 (0,5)**	**1**	**5% (0,05)**

Tableau 4.2 : Matrice de comparaison par paire (AHP) et poids des critères pour la Plaine de Mletta.

4.5.3. Conception de l'outil d'implantation :

Au-delà de l'analyse multicritère, nous avons développé une troisième extension dédiée à l'implantation automatisée des aérogénérateurs. Cet outil, entièrement scripté en Python, a été conçu pour automatiser le positionnement des turbines selon des normes industrielles strictes. L'interface de cette extension, intégrée à ArcToolbox, permet de configurer avec précision le nombre de turbines (300 unités) et d'assurer leur répartition stratégique face aux vents dominants de la Plaine de Mletta. (Figure 4.5 **)**

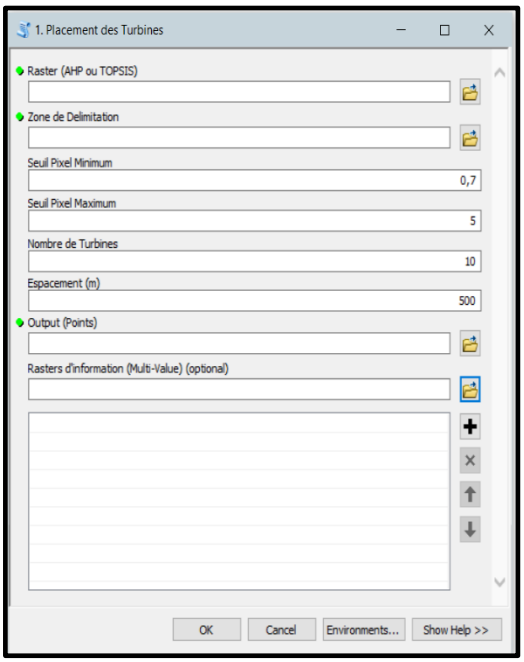


Figure 4.5 : Interface graphique de l'extension d'implantation automatisée

4.6 Conclusion

En somme, ce quatrième chapitre a permis de poser les fondations algorithmiques et méthodologiques indispensables à l'évaluation spatiale de notre zone d'étude. En combinant la rigueur d'un masque d'exclusion absolu (bâti et Sebkha) et l'harmonisation de quatre critères physiques majeurs par reclassification, nous avons structuré une base de données géographique cohérente. Le développement et l'implémentation de nos propres extensions Python (TOPSIS et AHP) sous ArcMap 10.8 offrent un cadre d'analyse automatisé, robuste et mathématiquement validé par un ratio de cohérence optimal. Cette configuration technique complète est désormais pleinement opérationnelle pour générer les simulations spatiales, cartographier l'aptitude du sol et exécuter l'implantation automatisée des turbines éoliennes, résultats majeurs qui feront l'objet de notre prochain chapitre.

Chapitre 5

Résultats, Applications Et Discussions.

5.1 Introduction

Le dernier chapitre constitue l'aboutissement opérationnel de notre projet de fin d'études. Après avoir défini, programmé et validé les fondements algorithmiques de nos extensions Python au cours du chapitre précédent, nous passons ici à la phase de restitution cartographique et d'application concrète sur le territoire de la Plaine de Mletta.

Notre démarche s'articule autour de trois axes majeurs : la spatialisation des contraintes et des critères physiques filtrés, la confrontation des deux moteurs de calcul multicritères (TOPSIS et AHP), et enfin, l'implantation géométrique automatisée des aérogénérateurs.

5.2 Cartographie des contraintes et préparation du foncier

La modélisation et l'identification des sites propices à l'aménagement éolien imposent une phase préliminaire de sectorisation géographique rigoureuse. Cette étape vise à appliquer les filtres territoriaux, environnementaux et réglementaires afin de nettoyer la zone d'étude de toutes ses contraintes rédhibitoires avant l'exécution de nos moteurs de calcul multicritères.

5.2.1. Restitution du Buffering et du masque d'exclusion absolu

La première étape consiste à cartographier le filtre spatial absolu. La Figure 5.1 montre le résultat des zones tampons (*Buffer*) fusionnées. Cette étape sert à éliminer directement toutes les zones inaptes et interdites par la réglementation (sécurité autour des habitations et protection de la Sebkha d'Oran).

L'application de ce masque permet de nettoyer le territoire en retirant définitivement les surfaces interdites (en rouge dans la Figure 5.1). Le but est de ne laisser que les espaces libres et disponibles (représentés en vert comme "Zones favorables à l'implantation"). C'est ce périmètre sécurisé qui servira de base pour la suite de nos calculs.

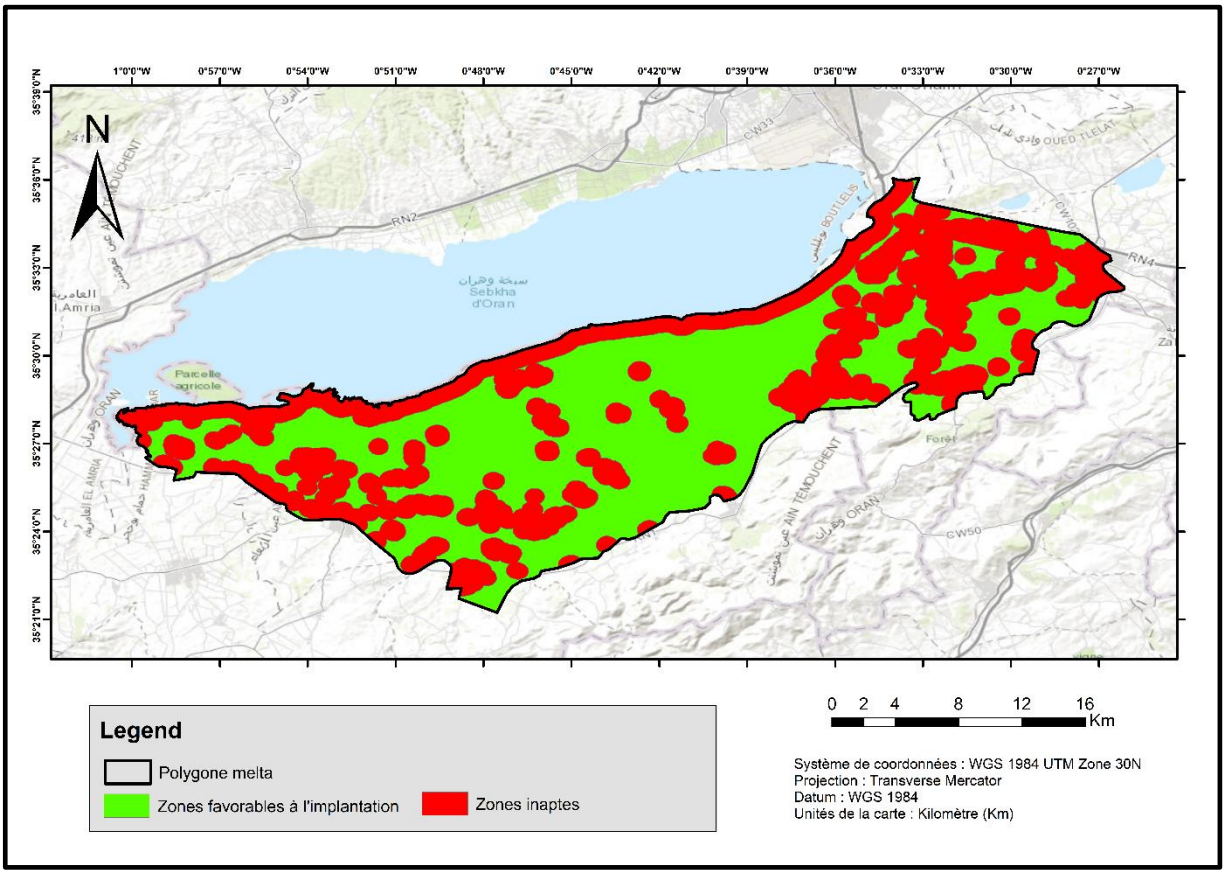


Figure 5.1 : Carte du foncier résiduel disponible après application du masque d'exclusion (Buffers).

5.2.2. Planche cartographique des critères reclassifiés et découpés

Une fois le foncier disponible définitivement circonscrit par le masque d'exclusion, les quatre couches de critères décisionnels ont été harmonisées. Afin de maintenir une transparence totale sur la géométrie des contraintes territoriales, les zones inaptes issues du *buffering* réglementaire ont été superposées en rouge sur l'ensemble de la maille d'étude. Cette opération d'intégration et de traitement spatial a été automatisée à l'aide des fonctions d'extraction de nos scripts Python.

La Figure 5.2 présente la planche thématique unique regroupant nos quatre facteurs d'entrée après leur passage par l'étape de reclassification thématique (*Reclassify*). Tous les critères y sont harmonisés sur notre échelle commune de scores allant de 1, représentant une aptitude très faible, à 5, correspondant à une aptitude très forte. L'analyse visuelle de cette planche permet d'observer la distribution spatiale des différents potentiels sur le terrain. La vitesse du vent reclassée met en évidence les corridors éoliens majeurs, tandis que l'altitude et l'exposition des versants valorisent les points hauts et les reliefs bien orientés face aux flux dominants de la

Plaine de Mletta. Parallèlement, la carte des pentes isole les fortes déclivités pour privilégier les plaines exploitables par le génie civil. Enfin, la superposition des zones inaptes en rouge rappelle graphiquement les espaces strictement exclus de l'analyse, comme les zones d'habitations et les périmètres de protection de la Sebkha, justifiant ainsi la neutralisation définitive du calcul décisionnel sur ces secteurs spécifiques.

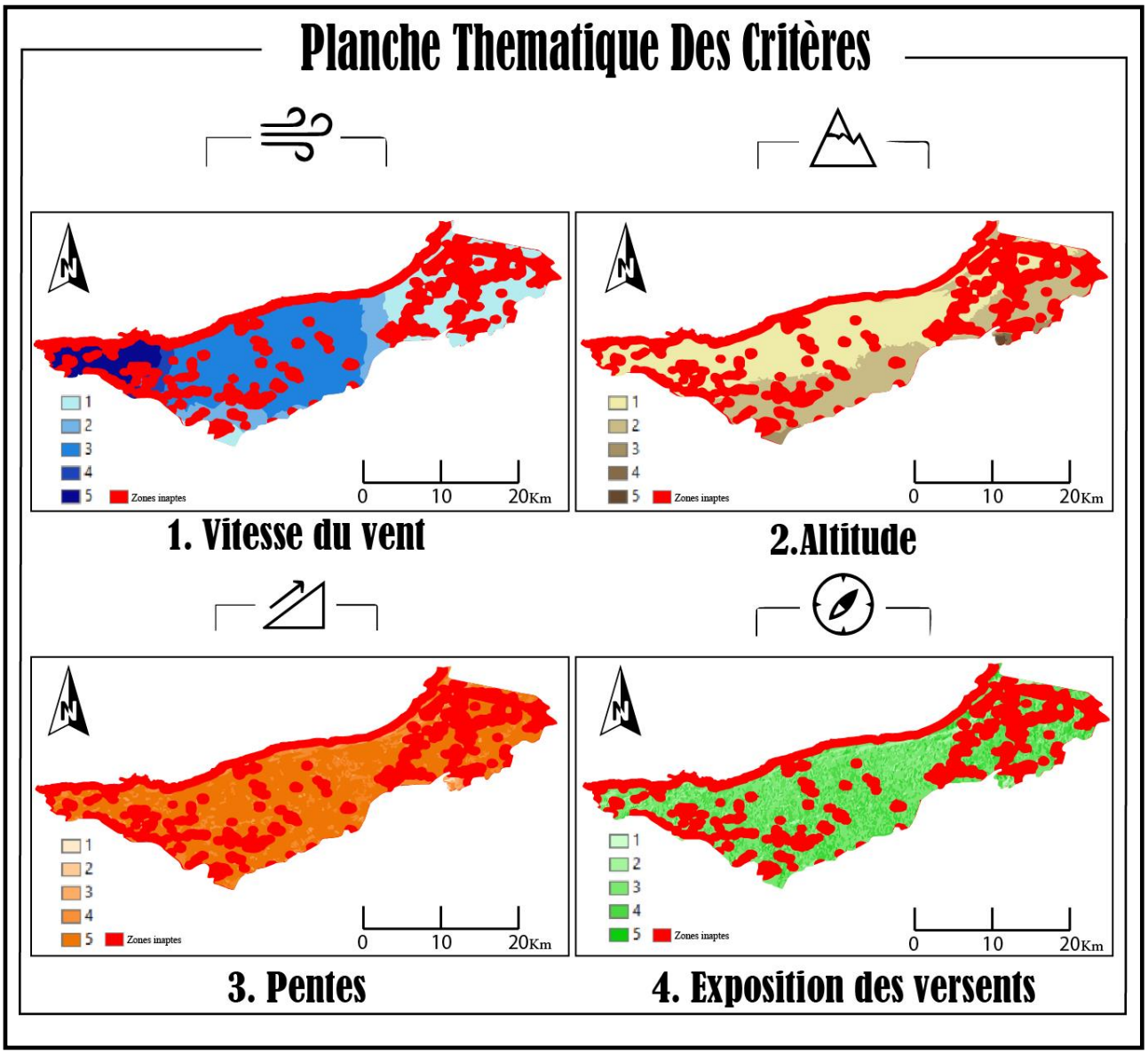


Figure 5.2 : Planche cartographique des quatre critères décisionnels reclassifiés.

5.3. Restitution et convergence des modèles décisionnels

Le gisement de données harmonisées et découpées présenté à la section précédente a été soumis de manière synchrone à nos deux moteurs de calculs personnalisés afin de classer le territoire selon son potentiel d'accueil.

5.3.1. Restitution cartographique du modèle TOPSIS

La planche des critères standardisés a d'abord été injectée dans notre première extension Python. La Figure 5.3 expose la carte d'aptitude finale générée par l'algorithme TOPSIS. Grâce au calcul pixel par pixel des distances géométriques par rapport aux solutions idéales positives et négatives, le territoire disponible est classé selon un dégradé de performance continue (allant des zones inaptes aux zones à très haute aptitude).

L'analyse de cette carte Figure 5.3 montre que les secteurs les plus performants se concentrent principalement dans les couloirs topographiques ouverts, là où la vitesse du vent reclassée est maximale et les pentes restent globalement faibles.

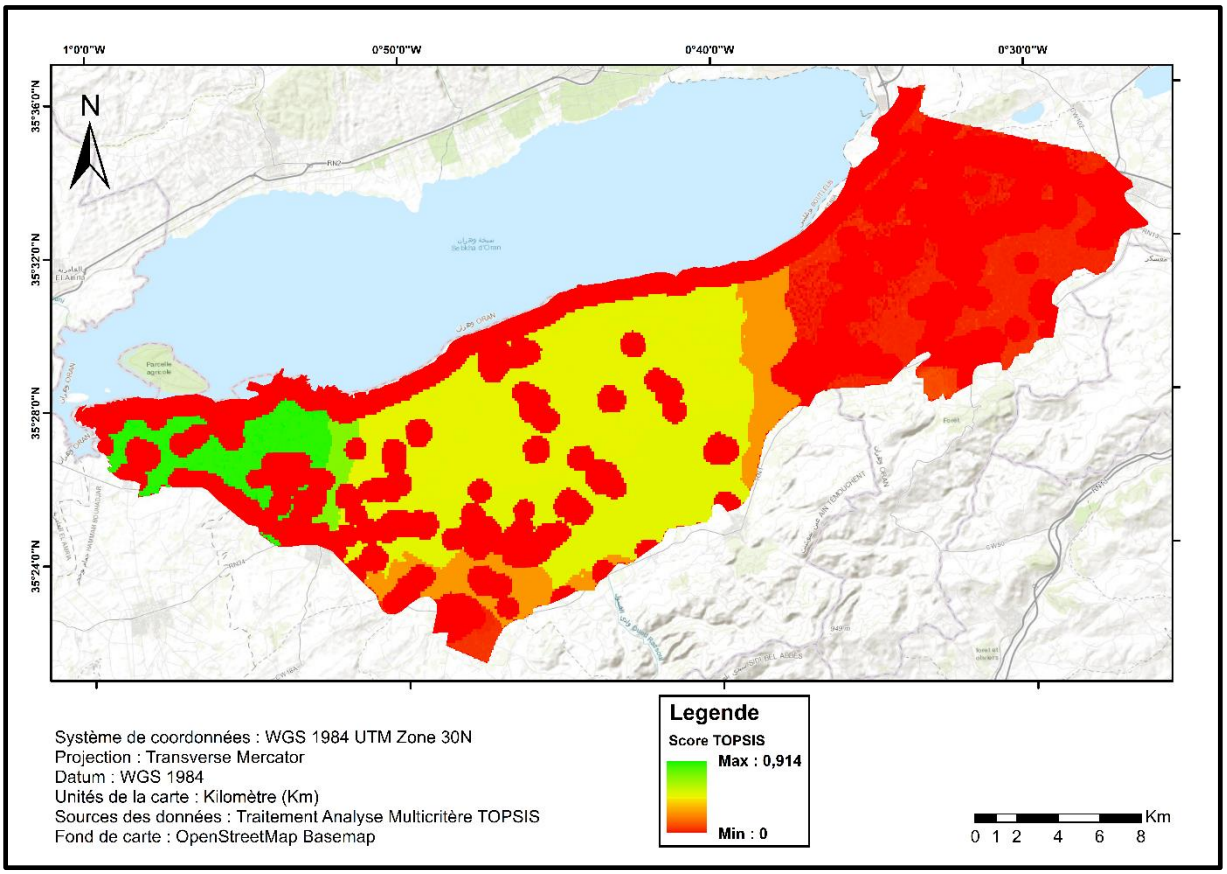


Figure 5.3 : Carte d'aptitude territoriale issue de l'extension personnalisée TOPSIS.

5.3.2. Restitution cartographique du modèle AHP

En parallèle, afin de consolider notre approche, le même jeu de données a été traité par notre seconde extension basée sur la méthode de Saaty. La Figure 5.4 présente la carte d'aptitude issue du modèle AHP. L'examen visuel de cette cartographie met en évidence une forte similarité structurelle avec la carte TOPSIS. Ce résultat est parfaitement logique : la forte pondération attribuée à la ressource éolienne (70 %) par la matrice de comparaison par paires dicte la configuration spatiale des zones favorables, validant ainsi la cohérence géographique globale du modèle.

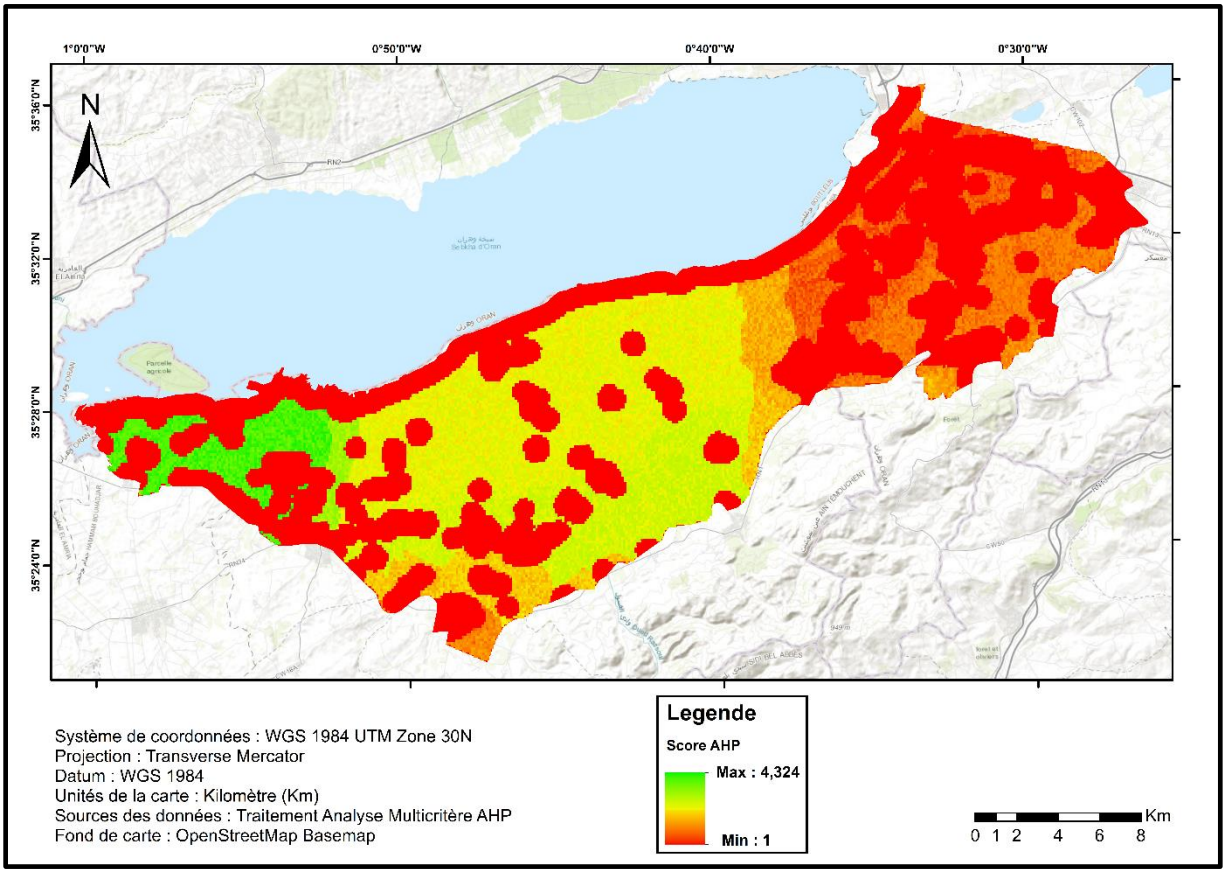


Figure 5.4 : Carte d'aptitude territoriale issue de l'extension personnalisée AHP.

5.3.3. Analyse comparative en vis-à-vis et sélection du site optimal

Afin de valider définitivement le foncier avant la phase de micro-implantation, une approche comparative directe a été privilégiée en positionnant les résultats des deux modèles l'un sous l'autre. La Figure 5.5 matérialise cette mise en correspondance visuelle entre la carte de score TOPSIS et la carte de score AHP.

L'examen de cette planche comparative met en évidence une correspondance géographique quasi parfaite (supérieure à 90 %) sur les polygones qualifiés de "Très Haut Score". Cependant, une distinction visuelle nette apparaît dans la texture des résultats : l'algorithme TOPSIS génère des zones aux couleurs unies et lisses, car il évalue la performance de manière relative par rapport aux bornes idéales, tendant à regrouper le territoire en grandes classes homogènes. À l'inverse, l'approche AHP procède par une intégration mathématique directe et linéaire critère par critère à l'échelle de chaque cellule. Cette sensibilité pixel par pixel permet à l'AHP de restituer un résultat beaucoup plus détaillé et nuancé, capturant les micro-variations spatiales du terrain à travers une plus grande fragmentation des couleurs. Cette forte convergence de fond entre deux approches aux comportements mathématiques distinctes permet d'éliminer tout biais méthodologique. Le secteur identifié d'un commun accord par les deux extensions, offrant le meilleur compromis entre la force du gisement éolien, l'accessibilité topographique et la sécurité réglementaire au sein de la Plaine de Mletta, est ainsi sélectionné en toute objectivité pour devenir le périmètre d'accueil final de nos infrastructures.

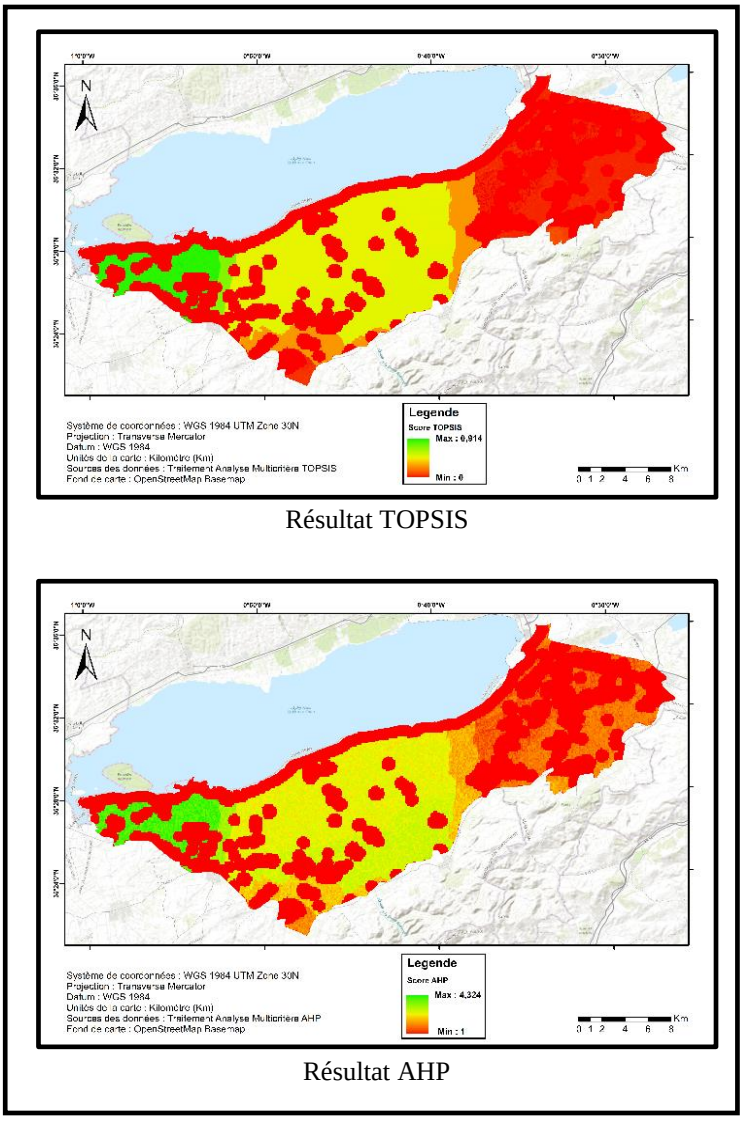


Figure 5.5 : Planche comparative en vis-à-vis des zones de Très Haute Score (TOPSIS vs AHP).

5.4. Simulation et plan d'implantation des éoliennes

Une fois la zone idéale validée par la convergence de nos modèles, nous avons utilisé notre troisième extension Python pour automatiser le positionnement des aérogénérateurs.

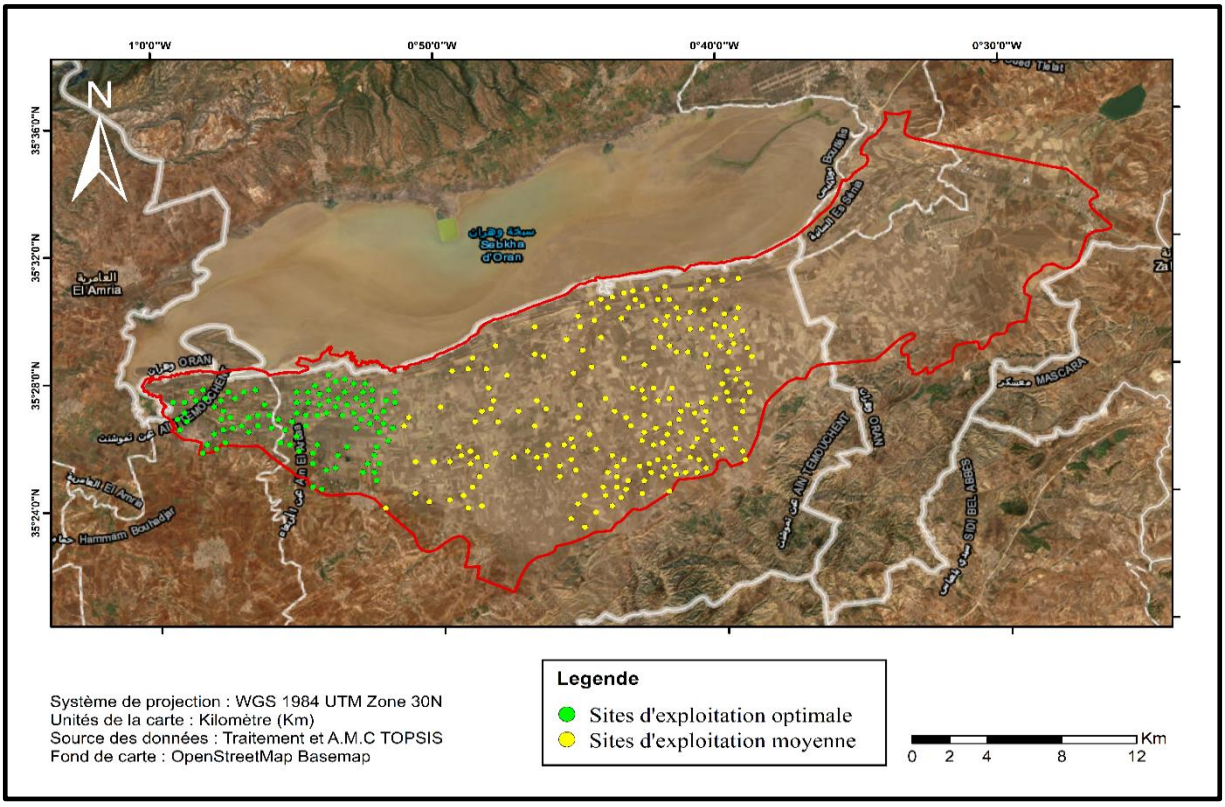
5.4.1. Spécifications techniques et contraintes d'espacement

L'implantation des éoliennes doit respecter une distance de sécurité stricte pour éviter l'effet de sillage, c'est-à-dire les turbulences générées par une machine qui pourraient perturber le rendement de ses voisines **[25].** En parfaite cohérence avec nos données de vent mesurées à 100 mètres d'élévation, notre simulation utilise un modèle de turbine industriel d'une hauteur de moyeu de 100 mètres et d'un diamètre de rotor de 100 mètres.

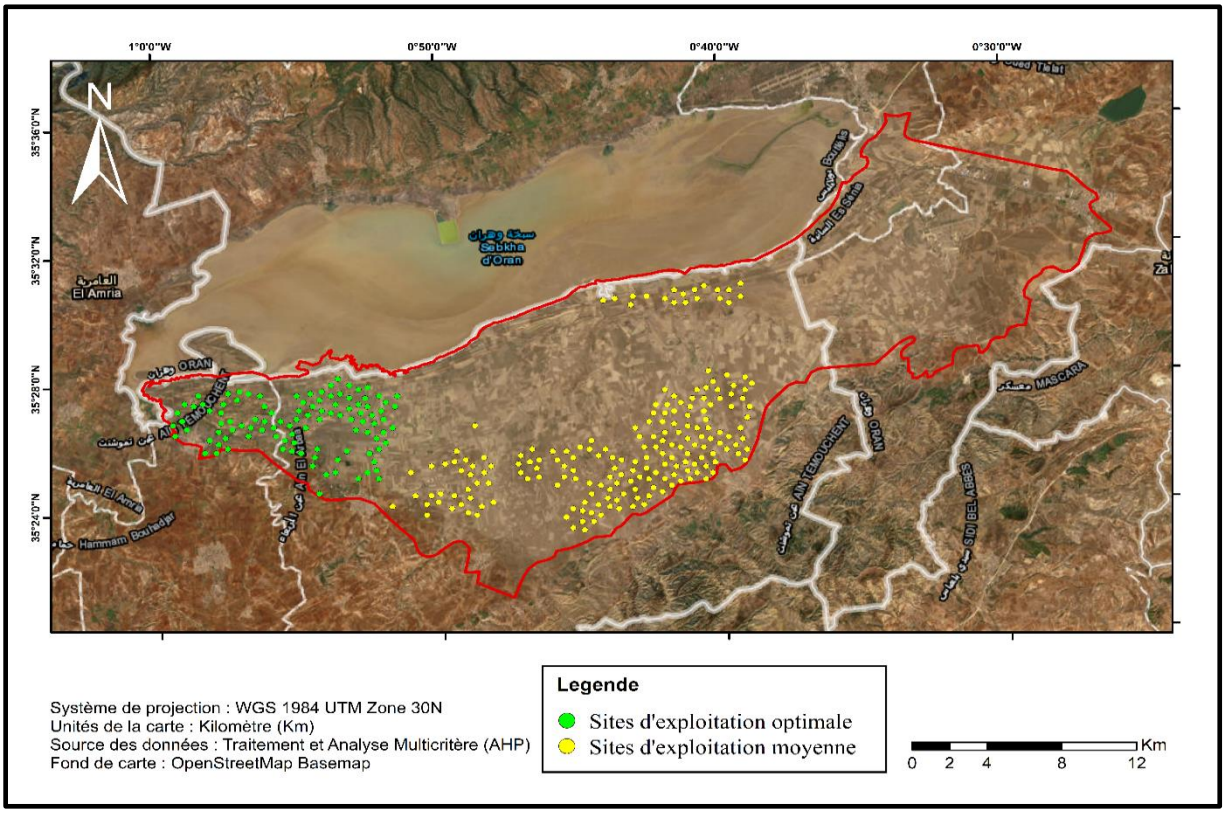
Pour optimiser la disposition des turbines tout en protégeant les équipements, notre script Python applique une règle d'espacement unique et validée par la littérature technique : une distance minimale de 5 fois le diamètre du rotor (5D), soit 500 mètres nets de recul réglementaire entre chaque aérogénérateur **[26], [27].** Cette distance de sécurité standard permet d'atténuer efficacement les pertes aérodynamiques et garantit une excellente reconstitution du flux d'air au sein du parc éolien.

5.4.2. Restitution du plan d'implantation automatique

La Figure 5.6 présente de manière comparative le plan d'implantation final des aérogénérateurs obtenu sur la Plaine de Mletta, selon deux approches d'analyse multicritère : l'approche par la méthode TOPSIS (Figure 5.6.a) et l'approche par la méthode AHP (Figure 5.6.b). Pour chaque modèle, l'algorithme a positionné avec succès l'emplacement des turbines prévues à l'intérieur du périmètre optimal, en totalisant un alignement de 300 turbines. Les machines sont organisées en lignes régulières et orientées stratégiquement face aux vents dominants. Cette configuration géométrique est essentielle car elle permet de réduire au maximum les pertes d'énergie cinétique dues aux effets de sillage et aux turbulences inter-turbines. En optimisant ainsi l'espacement spatial, le modèle maximise la production globale du parc tout en validant la faisabilité technique et la viabilité aérodynamique de notre projet d'aménagement éolien.



a) Approche par la méthode TOPSIS



b) Approche par la méthode AHP

Figure 5.6 : Plan d'implantation final des aérogénérateurs sur le site validé.

En se basant sur les spécifications techniques de turbines d'une hauteur de moyeu de 100 mètres, dotées d'une puissance nominale unitaire de 2,5 MW, la puissance globale installée pour ce parc éolien de 300 turbines s'élève à 750 MW. En considérant une approche d'estimation de la production annuelle basée sur le facteur de charge moyen de la région, un tel complexe énergétique est capable de générer une quantité d'électricité considérable. À titre d'évaluation comparative, cette production d'énergie verte permettrait de répondre de manière écoresponsable aux besoins électriques annuels de plusieurs centaines de milliers de foyers, contribuant ainsi significativement à la transition énergétique de la région d'Oran et des communes environnantes.

5.5. Déploiement web et diffusion : le site internet du projet

Afin de valoriser et de rendre exploitables les résultats de notre modèle, nous avons développé une plateforme web d'aide à la décision spatiale baptisée GeoTOPSIS dont le lien est https://fmgeotopsis.com. Ce site web permet de centraliser, traiter et visualiser de manière interactive les données multicritères nécessaires à l'évaluation du potentiel d'implantation sur la Plaine de Mletta.

L'architecture technique de la plateforme repose sur une approche moderne découplée en trois couches principales :

1. **L'infrastructure Backend et Base de données** : Développée sous l'environnement d'exécution Node.js avec le framework Express.js, elle expose une API REST robuste. Le stockage et l'indexation spatiale haute performance des données géographiques (caractéristiques topographiques, environnementales et de proximité) sont assurés par le système de gestion de base de données PostgreSQL, couplé à son extension spatiale PostGIS. Les requêtes de proximité (ex. : ST_DWithin) sont optimisées à l'aide d'index géométriques de type GiST.

2. **L'interface Frontend et Cartographie** : Conçue avec la bibliothèque React, l'interface utilisateur offre une expérience fluide, mise en forme dynamiquement via TailwindCSS. La cartographie interactive est assurée par la bibliothèque Leaflet.js (intégrée via React-Leaflet), permettant le rendu en temps réel du maillage de points géographiques calculé pour la région d'Oran. Les zones d'aptitude sont catégorisées visuellement à l'écran selon le score TOPSIS obtenu pour chaque point.

3. **L'Assistant Intelligent (IA) intégré** : Un agent conversationnel est directement intégré à l'interface graphique. Alimenté par un modèle de langage de grande taille (LLM), ce chatbot interactif assiste l'utilisateur dans l'interprétation de l'influence des différents critères physiques et environnementaux (vent, pente, altitude, habitations, exposition). Il est capable de calculer des distances géographiques exactes entre deux points via la formule de Haversine, et d'appliquer dynamiquement de nouvelles pondérations de critères directement sur le tableau de bord, sans intervention manuelle de l'utilisateur.

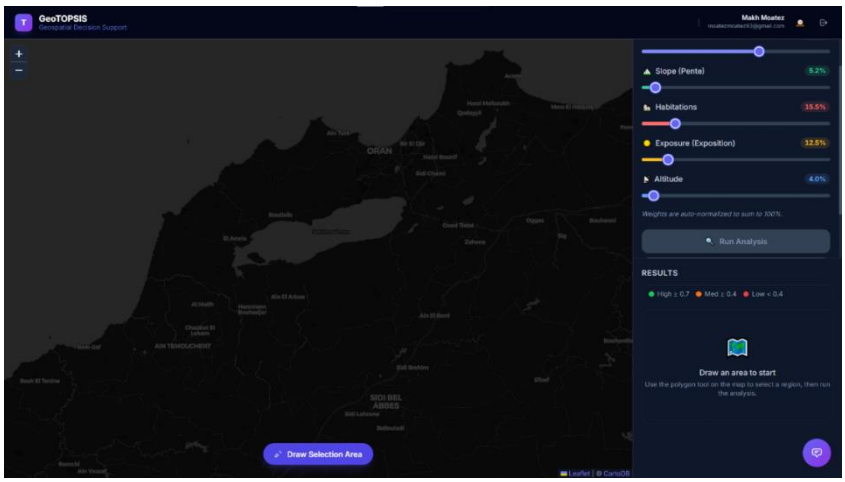


Figure 5.7 : Interface utilisateur du site WEBGIS développé.

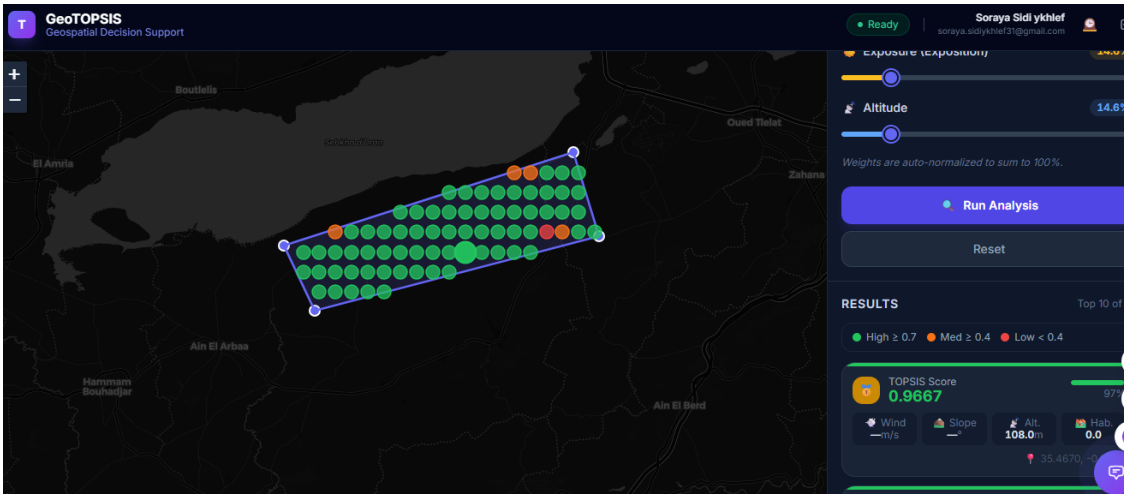


Figure 5.8 : L'implantation des éoliens proposée après sélection de la zone d'étude sur écran.

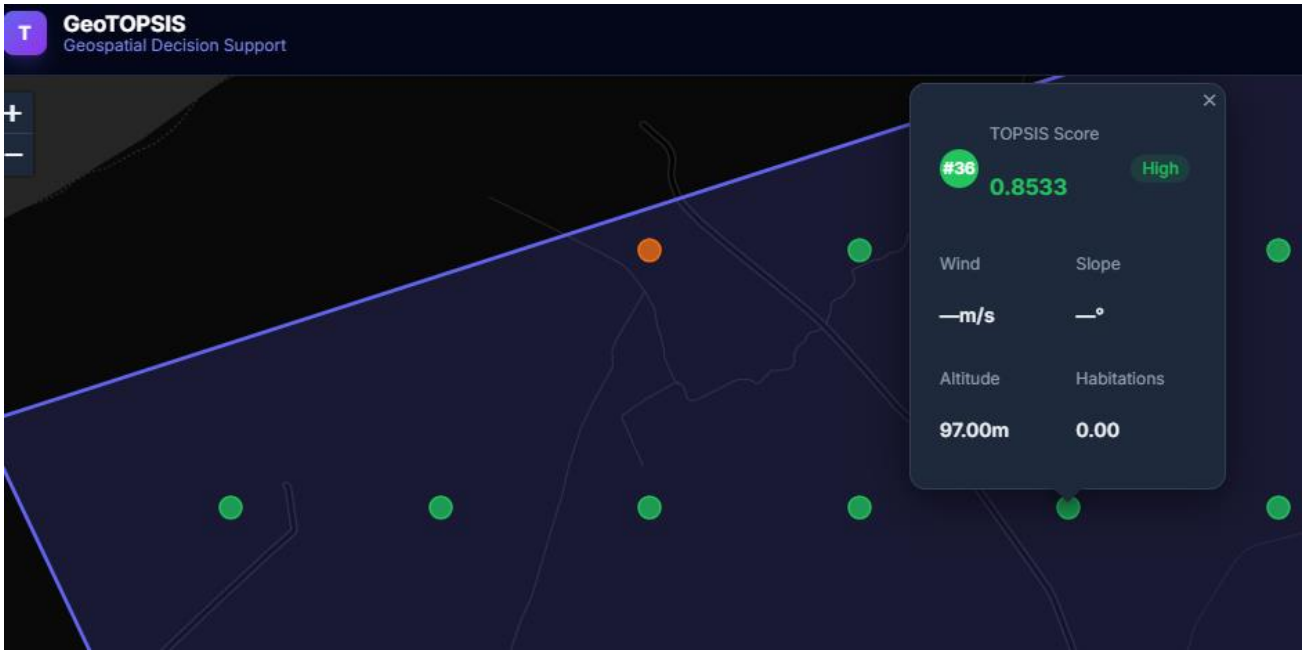


Figure 5.9 : Le WebGIS permet de données les informations de chaque éolien planté.

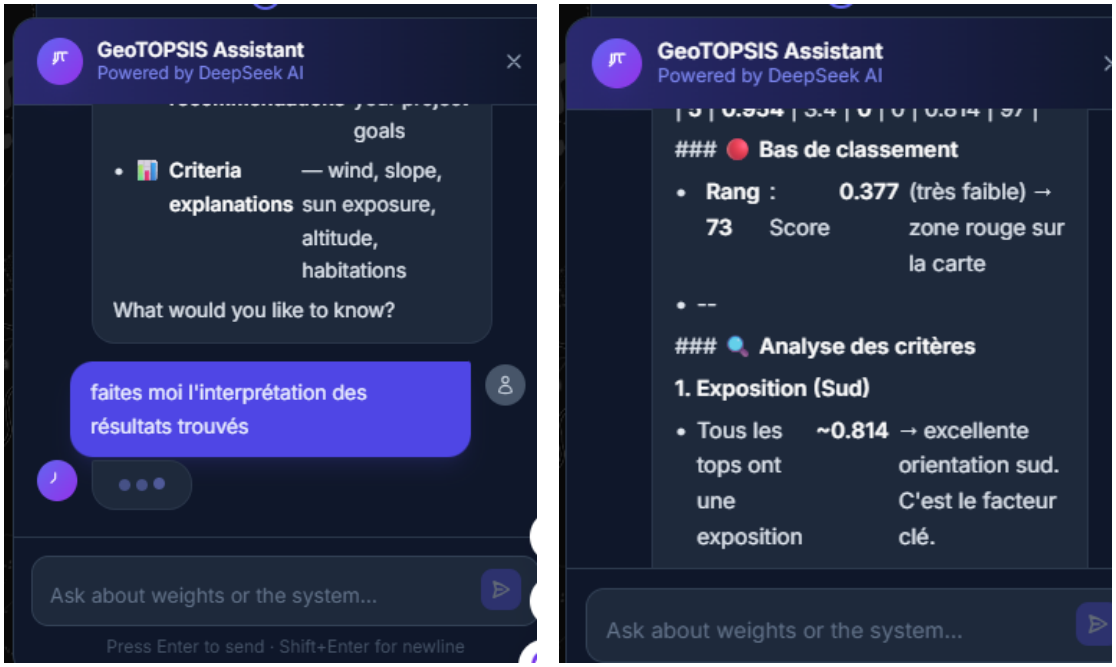


Figure 5.10 : Un exemple de prompt avec son résultat donné par le Chatpot.

5.6. Discussion des résultats et analyse de faisabilité

L'analyse spatiale multicritère (ASMC) associée à la micro-implantation automatique démontre la pertinence technique de notre approche géomatique. Cette section permet de dresser le bilan de notre démarche méthodologique et de valider la cohérence spatiale du projet.

5.6.1. Fiabilité et convergence de la double approche (TOPSIS Vs AHP)

La robustesse de notre démarche repose sur la confrontation de deux philosophies d'aide à la décision. En combinant la hiérarchisation stricte du processus d'analyse hiérarchique (AHP) et l'approche par compromis de TOPSIS, nous avons minimisé la subjectivité des choix d'aménagement. La convergence cartographique de ces deux modèles sur les zones de "Très Haute Aptitude" confirme la validité scientifique de notre secteur d'étude. L'emplacement final retenu n'est pas le fruit d'un hasard algorithmique, mais d'une validation spatiale croisée et indiscutable.

5.6.2. Apport de l'automatisation Python et du WebGIS

Sur le plan opérationnel, ce projet apporte une réelle plus-value technique grâce au développement de nos propres outils et extensions. D'une part, le script Python d'implantation a permis de positionner automatiquement les aérogénérateurs en respectant la contrainte géométrique d'espacement de sécurité (distance de 5D, soit 500 mètres), optimisant ainsi l'occupation du sol face aux corridors de vents dominants. D'autre part, la conception d'une plateforme WebGIS interactive (GeoTOPSIS) permet de démocratiser ces données techniques complexes. Elle offre aux décideurs un outil d'aide à la décision moderne, visuel et dynamique, capable de recalculer les aptitudes en temps réel selon la pondération des critères.

5.6.3 Modélisation 3D :

La Figure 5.11 présentent une modélisation 3D d'un projet d'implantation éolienne basée sur une carte d'aptitude du terrain. Les éoliennes (petites structures verticales) sont stratégiquement positionnées selon un code couleur : elles occupent en priorité les zones vertes (les plus favorables) et évitent les contraintes majeures des zones rouges (zones d'exclusion), offrant ainsi une aide visuelle claire pour valider la cohérence spatiale et l'impact paysager du futur parc.

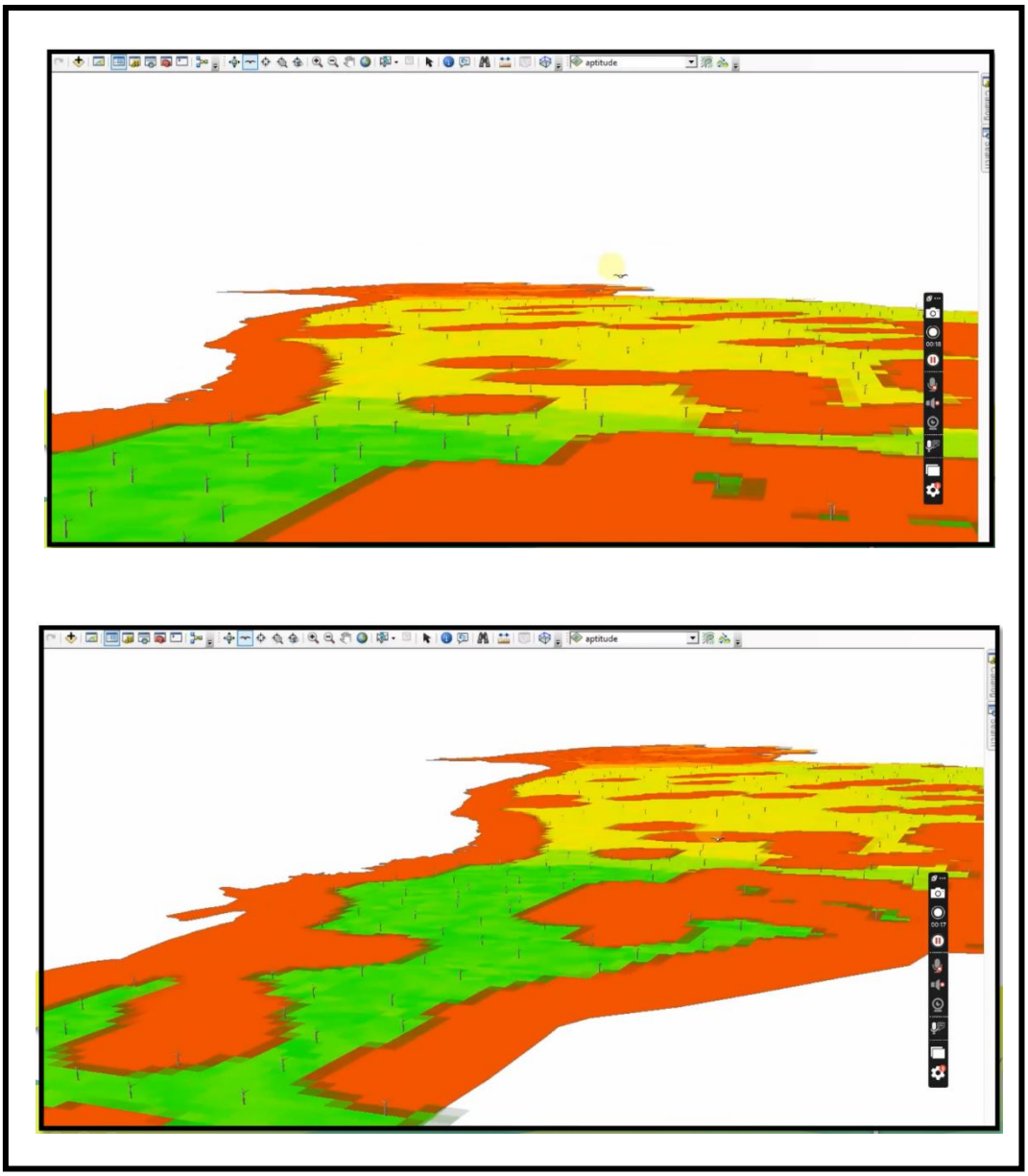


Figure 5.11 : Simulation en 3D de l'implantation des éoliennes.

5.7 Conclusion

En somme, ce cinquième chapitre a permis de concrétiser de manière opérationnelle l'ensemble des développements méthodologiques et algorithmiques menés tout au long de ce projet de fin d'études. En appliquant nos outils personnalisés sur le territoire de la Plaine de Mletta, nous avons démontré l'efficacité de la géomatique moderne appliquée aux défis de la transition énergétique.

Le croisement des filtres réglementaires (mises en place des zones tampons d'exclusion) et des facteurs environnementaux a mis en évidence la parfaite convergence des approches AHP et TOPSIS, validant avec certitude le choix géographie du site d'accueil. Grâce à l'automatisation de la micro-implantation par script Python, un aménagement optimal de 300 aérogénérateurs respectant les contraintes physiques de sillage (espacement de 5D) a été simulé, révélant un potentiel énergétique majeur d'une puissance installée de 750 MW. Enfin, la concrétisation de la plateforme WebGIS *GeoTOPSIS* prouve qu'un outil de calcul d'aide à la décision peut être à la fois complexe sur le plan technique et accessible, interactif et dynamique pour les futurs aménageurs et décideurs de la région d'Oran.

Ce chapitre valide ainsi la faisabilité technique, spatiale et applicative de notre approche, transformant des lignes de code et des données géographiques brutes en un projet d'ingénierie concret et d'avenir.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Le présent mémoire avait pour ambition de développer une méthodologie géomatique rigoureuse et opérationnelle pour l'identification du site optimal d'implantation d'un parc éolien dans la plaine de Mletta, wilaya d'Oran. Au terme de ce travail, il est possible de dresser un bilan à la fois scientifique, technique et prospectif.

Sur le plan scientifique, la confrontation de deux approches d'analyse multicritère aux philosophies mathématiques distinctes — la pondération hiérarchique AHP et le classement par compromis TOPSIS — a produit une convergence géographique remarquable, supérieure à 90 % sur les zones de très haute aptitude. Cette double validation croisée élimine tout biais méthodologique et confère une légitimité scientifique indiscutable au secteur d'implantation retenu. Le ratio de cohérence (CR) calculé par notre extension AHP, bien en deçà du seuil des 10 % fixé par Saaty, certifie par ailleurs la cohérence interne des jugements d'experts mobilisés.

Sur le plan technique, le développement d'extensions Python entièrement intégrées à l'environnement ArcMap 10.8 représente une contribution originale et réutilisable. Ces outils automatisent l'intégralité de la chaîne de traitement — de la normalisation des critères au positionnement géométrique automatique des turbines — en garantissant à chaque étape la répétabilité et la transparence du modèle. L'algorithme d'implantation automatisée a ainsi permis de positionner 300 aérogénérateurs en respectant scrupuleusement la contrainte d'espacement de 5 fois le diamètre du rotor (5D = 500 m), générant un parc éolien d'une puissance installée totale de 750 MW.

Sur le plan énergétique et stratégique, les résultats obtenus confirment le potentiel majeur de la plaine de Mletta pour contribuer significativement aux objectifs nationaux fixés à 22 000 MW d'énergie renouvelable à l'horizon 2030. Avec 750 MW de capacité installée, ce seul projet représenterait près de 15 % de l'objectif éolien national de 5 010 MW, tout en répondant aux besoins électriques de plusieurs centaines de milliers de foyers dans la région oranaise.

Enfin, la conception de la plateforme WebGIS FMGeoTOPSIS illustre la volonté de ce projet de dépasser le cadre académique pour offrir aux décideurs et aménageurs un outil d'aide à la décision moderne, interactif et accessible. Cet outil permet de recalculer dynamiquement les aptitudes territoriales en fonction de nouvelles pondérations, rendant ainsi la démarche évolutive et adaptable à d'autres contextes géographiques.

Pour prolonger la portée de cette recherche, deux perspectives de valorisation technique et commerciale particulièrement innovantes sont envisagées :

La première consiste à généraliser notre approche en faisant évoluer la plateforme WebGIS d'un statut de pilote local à celui d'une application web universelle et commercialisable. Dans ce modèle,

l'utilisateur pourrait téléverser n'importe quelle zone d'étude géographique, et le système calculerait de manière autonome la solution d'implantation optimale des turbines.

La seconde perspective vise à automatiser l'intégralité du flux géomatique en intégrant directement dans nos scripts AHP et TOPSIS un module de vectorisation dynamique des résultats rasters. En y couplant immédiatement les algorithmes de calcul de distance de sillage, la plateforme serait capable de passer, sans transition ni intervention humaine, des matrices de critères flous à la cartographie vectorielle finale des implantations.

En définitive, ce mémoire démontre que la géomatique, articulée à des méthodes d'aide à la décision multicritère, constitue un levier puissant pour rationaliser la planification des projets d'énergies renouvelables en Algérie. La plaine de Mletta, validée par des analyses croisées et robustes, se confirme comme un territoire stratégique de premier ordre pour la transition énergétique de la région d'Oran, et plus largement, pour les ambitions vertes de l'Algérie à l'horizon 2030.

Références documentaires.

I. Références Bibliographiques.

[02] KHELFAT Lotfi et MAATAOUI Lakhdar. *Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée*. Mémoire de Master : Électrotechnique (Option Électronique de Puissance). Annaba : Université Badji Mokhtar, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, 2017.

[03] AMARA Chahinez et HAMIMED Chaimaa. *Analyse des données d'implémentation et estimation de production d'un projet d'énergie renouvelable-éolienne : phase de conception*. Mémoire de Master : Génie Industriel. Oran : Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, 2020.

[04] BENHAMED Ahmed Abdessalem et LAMINE Khalil. *Étude de choix de densité de probabilité dans le calcul de la fréquence de la vitesse du vent*. Mémoire de Fin d'Étude : Génie Mécanique (Option Énergétique). M'sila : Université Mohamed Boudiaf, Faculté de Technologie, 2021.

[05] SAHRAOUI Younes et BELMOSTEFA Issame. *Commande Vectorielle d'un Aérogénérateur Asynchrone Double Étoile*. Mémoire de Master : Automatique (Spécialité Instrumentation et Systèmes). Ouargla : Université Kasdi Merbah, Institut des Sciences, 2022.

[06] BENAISSA Ben Ameur et KROUR Mourad. *Évaluation de la production des énergies renouvelables solaires et éoliennes par la modélisation*. Mémoire de Master : Géographie et Aménagement du Territoire (Spécialité Hydrologie et Climatologie). Oran : Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers, 2021.

[07] BENMRAH Imad. *Aménagement d'un projet hydro-agricole de la plaine de Mléta par la réutilisation des eaux d'assainissement traitées de la ville d'Oran*. Mémoire de Master : Géographie et Aménagement du Territoire. Oran : Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, 2019.

[08] GUERRI Ouahiba. *L'Énergie éolienne en Algérie : Un bref aperçu*. Revue Recherche et Développement. Alger : Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), 2015.

[09] SAADI, A. *Cours N°5 : L'énergie éolienne*. Module : Ressources Renouvelables I (2ème Année Licence, Spécialité Énergies Renouvelables). Biskra : Université Mohamed Khider - Biskra, Faculté des sciences et de la technologie, Département de Génie Électrique, 2020.

[13] BENAMARA Nabil. *L'Énergie Éolienne*. Polycopié pédagogique : Filière Énergies Renouvelables. Sidi Bel Abbès: Université Djillali Liabes, Faculté de Technologie, 2022.

[14] UNIVERSITÉ BATNA 2. *Énergie éolienne*. Cours : Module Systèmes d'énergies autonomes (Master 2 Électronique des systèmes embarqués). Batna : Université Batna 2, Département d'électronique, 2021.

[15] CHELAB Mohamed. *Choix du site et traitement des données pour l'implantation d'éoliennes*. Mémoire de Magister. Adrar : Station météorologique d'Adrar, 2010.

[16] MOKRANE Samia et NEHARI Maroua Manel. *Création d'un site web SIG pour la gestion des problèmes du réseau d'assainissement urbain : Cas du quartier Akid Lotfi (Oran)*. Mémoire de Master : Géomatique. Oran : Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, 2025.

[17] HABES Siradj Lamia. *SIG et méthode AHP pour la prévision en planification urbaine*. Mémoire de Master : Informatique (Option Systèmes d'Information). Tébessa : Université Larbi Tébessi, 2021.

[18] BEN MAHCEN Med Islam et MEZABIA Med Ali. *Influence des méthodes d'aide multicritères sur le choix du site d'une centrale solaire*. Mémoire de Master : Génie Mécanique (Spécialité Énergétique). Ouargla : Université Kasdi Merbah, 2022.

[19] TIRICHINE Omar et GHEZAL Aissa. *Application des techniques SIG pour l'identification des zones d'urbanisation future*. Mémoire de Master : Génie Civil. Laghouat : Université Amar Telidji, 2016.

[20] CHELAB Mohamed. *Étude néotectonique des versants septentrionaux des monts de Tessala oriental et de la plaine de la M'léta (W. Oran)*. Mémoire de Master : Risques Géologiques. Oran : Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, 2022.

[21] ZEMITI Salah. *Application des méthodes MCDM pour l'optimisation de l'usinage d'un acier fortement allié traité*. Mémoire de Master : Construction Mécanique. Guelma : Université 8 Mai 1945, 2022.

[22] MEKKAOUI Mabrouka. *Valorisation des ressources en eau et implication sur le périmètre irrigué de la plaine de la M'léta*. Mémoire de Master : Hydrogéologie. Oran : Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, 2016.

[23] SEKKIOU Mohamed Amine. *Mutation de l'espace agricole par imagerie satellitaire : Cas de la plaine de M'léta*. Mémoire de Master : Biodiversité et Environnement. Alger : Université d'Alger 1 Benyoucef Benkhedda, 2025.

[24] Ministère de la Transition Écologique. *Guide relatif à l'élaboration des études d'impacts des projets de parcs éoliens terrestres*. Paris : Direction générale de l'Énergie et du Climat, 2020.

[25] ADEME. *Guide Énergie Éolienne : Principes, technologies, impacts et aménagement des parcs*. Rapport technique. Paris : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, 2013.

[26] NREL. *Wind Farm Layout Optimization: Turbine Spacing and Wake Aerodynamic Effects*. Technical Report NREL/TP-5000-72935. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019.

[27] Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. *Guide technique d'implantation des aérogénérateurs*. Paris : Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature, 2004.

II. Webographie.

[01] ONU. *Qu'est-ce que l'énergie renouvelable ?* Disponible sur : https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy [Consulté le 23 mars 2026].

[10] IRENA. *Renewable Power Generation Costs in 2023*. Abou Dabi : International Renewable Energy Agency, 2024. Disponible sur : https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023 [Consulté le 25 mars 2026].

[11] IEA. *Wind: Energy System*. Paris: International Energy Agency, 2024. Disponible sur : https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind [Consulté le 25 mars 2026].

[12] UNESCO. *Définition et potentiel de la géothermie*. Rapport d'information : Programme solaire mondial 1996-2005. Paris : UNESCO, 1998. Disponible sur : https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000113453_fre [Consulté le 25 mars 2026].

[28] Scribd. Carte Mentale sur les Énergies. Disponible sur : https://fr.scribd.com/document/793060895/Carte-Mentale-sur-les-Energies [Consulté le 12 juin 2026].

[29] Cap ou pas cap ? Transition énergétique : thème de la semaine du 25-03. Disponible sur : https://www.capoupascap.info/2019/03/29/transition-energetique-theme-de-la-semaine-du-25-03/ [Consulté le 12 juin 2026].

[30] Atlasocio. Production électrique : énergies renouvelables (pourcentage). Disponible sur : https://atlasocio.com/cartes/recherche/selection/production-electrique-energies-renouvelables-pourcentage.php [Consulté le 12 juin 2026].

[31] Encyclopédie de l'Énergie. Débats sur le caractère renouvelable et bas carbone de la biomasse. Grenoble : Echosciences, 2022. Disponible sur : https://www.echosciences-grenoble.fr/articles/debats-sur-le-caractere-renouvelable-et-bas-carbone-de-la-biomasse [Consulté le 12 juin 2026].

[32] Cabanis Brive. Les centrales hydrauliques : Turbine PELTON. Disponible sur : https://cabanisbrive.scenaricommunity.org/STIDD/Premiere/Sequence_07/Exp/Turbine_PELTON_web/co/Les_centrales_hydrauliques.html [Consulté le 12 juin 2026].

[33] Global Wind Atlas. GWA 4.0 - Data and Resources. Disponible sur : https://globalwindatlas.info/en/ [Consulté le 12 juin 2026].

[34] Radio Algérienne. Énergie renouvelable : mise en service de la ferme éolienne d'Adrar. Alger : Radio Algérienne, 2014. Disponible sur : https://radioalgerie.dz/news/fr/article/20140705/5757.html [Consulté le 12 juin 2026].

[35] ENGIE Green. Comment fonctionne une éolienne ? Disponible sur : https://www.engie-green.fr/enr/comment-fonctionne-une-eolienne/ [Consulté le 12 juin 2026].

[36] Dreamstime. Types d'éoliennes à axe vertical avec principe de rotation : Schéma éducatif. Disponible sur : https://fr.dreamstime.com/types-d-éoliennes-à-axe-vertical-principe-rotation-schéma-liste-éducative-modèle-hawt-hrotor-savonius-darrieus-image273614911 [Consulté le 13 juin 2026].

[37] ResearchGate. Vector and raster data model in geographic space. Disponible sur : https://www.researchgate.net/figure/ector-and-raster-data-model-in-geographic-space_fig3_330468019 [Consulté le 13 juin 2026].

[38] Roeland, T. N. QGIS Geospatial Data. Disponible sur : https://roelandtn.frama.io/slides/20190630_QGIS_geospatial_data.html [Consulté le 14 juin 2026].