



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
كلية علوم الأرض والكون
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
قسم الجغرافيا والتهيئة الإقليمية
Département de Géographie et de l'Aménagement du Territoire

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention de diplôme de Master en
Géographie et aménagement du territoire

Domaine : Sciences de la terre
Filière : Géographie et aménagement du territoire
Spécialité : Géomatique

L'utilisation des SIG pour le placement des panneaux solaires dans la commune d'Es-Senia Oran.

Réalisé et présenté par l'étudiant :

Sbaa Malek

Sous la direction de Mme :

Khalfaoui Houria

Devant le jury composé de :

Mr.Brahmi Abderrazak	MCB	Université d'Oran 2 – Mohamed Ben Ahmed	Président
Mme.Khalfaoui Houria	MAA	Université d'Oran 2 – Mohamed Ben Ahmed	Encadrante
Mme . Allal nadir elouasini	MAA	Université d'Oran 2 – Mohamed Ben Ahmed	Examineur

Dédicace

Je dédie ce travail :

À mes très honorés parents, pour leur affection, leur soutien indéfectible et les nombreux sacrifices qu'ils ont consentis tout au long de mon parcours universitaire ;

À mon encadrante, pour la qualité de son accompagnement, sa disponibilité constante et la pertinence de ses précieux conseils ;

À mes frères, pour leur soutien moral et leurs encouragements réitérés ;

Et à moi-même, pour ma persévérance, ma patience et l'ensemble des efforts que j'ai déployés afin de mener à bien ce travail, nonobstant les difficultés rencontrées

Je leur exprime à tous ma sincère reconnaissance et mon profond respect.

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant qui m'a accordé la force, la patience et la détermination nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrante pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité constante, ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Mes sincères remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation et à l'enrichissement de mes connaissances.

Je remercie chaleureusement mes parents pour leur soutien moral indéfectible, leurs encouragements réitérés et les sacrifices qu'ils ont consentis.

Je tiens également à remercier mes frères pour leur soutien et leur présence à mes côtés.

Enfin, j'adresse ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

À tous, j'exprime ma sincère gratitude et mon profond respect.

Résumé :

Cette étude vise à identifier les sites favorables à l'implantation de panneaux solaires photovoltaïques dans la commune d'Es-Senia, wilaya d'Oran, en s'appuyant sur une approche géomatique hybride combinant les Systèmes d'Information Géographique, la télédétection et l'analyse multicritère AHP.

La chaîne de traitement s'organise de manière progressive. Tout commence par la sélection de sept critères fondamentaux issus de la littérature, englobant le rayonnement GHI, la pente, l'exposition, l'occupation du sol, le NDVI, la température de l'air et la température de surface (LST). Les données brutes, issues de sources d'autorité comme SoDa-CAMS, Sentinel-2, Landsat 8, ALOS PALSAR ou Dynamic World, ont d'abord été traitées sous Google Earth Engine pour exécuter les opérations de filtrage, de découpage et de rééchantillonnage systématique à une maille fine de 10 mètres. C'est à partir de ces couches propres qu'un diagnostic microclimatique a permis de modéliser les îlots de chaleur urbains, avant d'ajuster localement les classes sous ArcMap 10.8.1 et de faire tourner la matrice de comparaison par paires pour valider la cohérence des poids.

L'analyse spatiale finale montre que les zones affichant une aptitude forte à maximale se regroupent massivement dans les périphéries nord et ouest de la commune. Ces secteurs rassemblent en effet des conditions optimales, associant un excellent ensoleillement, un relief subhorizontal et des températures modérées. À l'inverse, le noyau urbain dense et le complexe aéroportuaire se détachent par une aptitude faible. Enfin, l'ensemble de ces résultats a été valorisé à travers le codage complet de la plateforme WebGIS SolarGIS, transformant ce diagnostic en un véritable outil interactif d'aide à la décision pour piloter la planification énergétique de la commune.

Mots clés : SIG, AHP, Énergie solaire photovoltaïque, Google Earth Engine, WebGIS, Es-Senia.

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد المواقع الملائمة لتركيبة الألواح الشمسية الكهروضوئية في بلدية السانية، ولاية وهران، وذلك باعتماد منهجية جيوماتيكية هجينة تجمع بين نظم المعلومات الجغرافية، الاستشعار عن بُعد، وتحليل التعدد المعياري، الانحدار، التوجيه، (GHI) تتضمن المنهجية ست مراحل متكاملة: مراجعة الأدبيات واختيار سبعة معايير AHP. بطريقة جمع البيانات من مصادر متعددة، المعالجة الأولية عبر (درجة حرارة الهواء LST، NDVI استخدام الأراضي، ثم تطوير ArcMap في AHP بدقة 10 أمتار، تشخيص جزر الحرارة الحضرية، نمذجة Google Earth Engine تفاعلية. كشفت النتائج أن مناطق الملاءمة العالية تتمركز في الأطراف الشمالية والغربية للبلدية، في WebGIS منصة حين تُظهر المنطقة الحضرية المكثفة وقطاع المطار ملائمة منخفضة. تُشكل المنصة المطوّرة أداة دعم قرار فعّالة للتخطيط الطاقوي المحلي.

الكلمات المفتاحية : نظم المعلومات الجغرافية , الطاقة الشمسية , بلدية السانية

Abstract:

This study aims to identify suitable sites for photovoltaic solar panel installation in the municipality of Es-Senia, Oran, using a hybrid geomatics approach combining Geographic Information Systems, remote sensing, and AHP multicriteria analysis. The methodology unfolds across six stages: literature review and selection of seven criteria (GHI, slope, aspect, land use, NDVI, LST, air temperature), acquisition of multi-source data (SoDa-CAMS, Sentinel-2, Landsat 8, ALOS PALSAR, Dynamic World), pre-processing in Google Earth Engine with resampling to 10 meters, urban heat island microclimatic diagnostics, AHP modeling in ArcMap 10.8.1, and deployment of the SolarGIS WebGIS platform. Results show that high and maximum suitability zones concentrate in the northern and western periphery of the municipality, while the dense urban core and airport sector exhibit low suitability. The developed platform serves as an operational decision-support tool for local energy planning.

Key words: GIS, AHP, Photovoltaic solar energy, Google Earth Engine, WebGIS, Es-Senia.

Table des matières

Dédicace	2
Remerciements	3
Résumé :	4
الملخص:	5
الكلمات المفتاحية	5
Introduction Générale :	14
Problématique :	15
Objectif de recherche :	16
Méthodologie de recherche :	17
Approche méthodologique globale de la recherche.....	17
ETAPE 01 : Phase conceptuelle et sélection des critères	18
ETAPE 02 : Acquisition et choix des données géospatiales brutes	19
ETAPE 03 : Pré-traitement lourd sur Google Earth Engine	20
ETAPE 04 : Diagnostic environnemental et microclimatique	21
ETAPE 05 : Analyse multicritère AHP locale	21
ETAPE 06 : Ingénierie serveur et développement de la plateforme WebGIS.....	22
Hypothèses de recherche :	16
Délimitation de l'étude :	23
Organisation du mémoire :	24
Chapitre 1 : Cadre théorique et conceptuel	28
Introduction :	28
SECTION 01 : Etat de l'art.....	29
1- 1- Approche classique de sélection des sites	29
1-2 intégration des SIG dans les étude solaire :	31
1.3 Limites des travaux existants :	33
Positionnement de notre étude	34
Section 2 : Concept et définition	36
1- Concept et définition	36
2- Énergies renouvelables	36
3- Potentiel solaire	36
4- Facteurs influençant l'implantation des panneaux solaires.....	37
Section 3 : Cadre juridique et institutionnel des énergies renouvelables en Algérie	38
3-1- Programme national des énergies renouvelables	38
3-2- Contexte et justification	38

3-3-Objectifs actualisés	39
3-4-L'évolution du programme par filière (vision de 2011).....	39
3-5-Ouverture aux investisseurs et retombées socio-économiques	40
3-6- Textes législatifs et réglementaires.....	41
3-7-Mécanismes de soutien	42
3-8-Acteurs institutionnels.....	42
Conclusion :	45
Chapitre 02 : Fondements géomatiques, analyse multicritère AHP et architecture WebGIS	47
Introduction :	47
Section 01 : Les Systèmes d'Information Géographique (SIG)	48
1-1-Définition du SIG	48
1-2-Les composants d'un SIG	48
1-3-Les deux formats de données	49
1-4-Organisation en couches	51
1-5-Système de coordonnées et projections.....	51
1-6-Les principales fonctionnalités des SIG	52
Section 02 : L'analyse multicritère et la méthode AHP	53
2-1 Analyse spatiale et analyse multicritère	53
2-1-Principe de l'analyse multicritère (Malczewski, 1999)	53
2-3-La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)	53
2-4-Calcul des priorités (vecteur propre).....	54
2-5-Vérification de la cohérence (RC)	55
2-6-Agrégation et synthèse finale	55
2-7-Intégration de l'AHP dans les SIG	56
2-8-Application dans notre étude.....	56
2-9-Relation entre les SIG et la planification des projets solaires.....	56
Section 03 : Architecture WebGIS et plateformes géospatiales en ligne.....	58
3-1-Définition et architecture du WebGIS	58
3-2-Différence entre SIG classique et WebGIS	58
3-3-Avantages du WebGIS	59
3-4-Enjeux stratégiques pour la gouvernance de la commune d'Es-Senia.....	59
3-5-Positionnement et objectifs de l'application développée	60
Conclusion.....	61
Chapitre 3 : Étude pratique — Modélisation spatiale, analyse multicritère et déploiement du WebGIS SolarGIS	63
Introduction :	63

Section 01 : Présentation de la zone d'étude, données et méthodologie	64
1-1-Présentation de la zone d'étude.....	64
1.1.1 Localisation géographique et situation administrative	64
1.1.2 Infrastructures, démographie et accessibilité	65
1.1.3 Relief et topographie	66
1.1.4 Justification du choix de la zone d'étude.....	66
1-1-5 Données et outils utilisés.....	67
2-1- Les Données utilisée.....	67
1.1.6 Méthodologie de travail	68
Section 02 : Extraction, traitement des critères, modélisation AHP et analyse environnementale	70
1-1-Extraction et traitement des critères.....	70
1-2- Analyse Spatiale du Critère Climatique	76
1-4- Analyse multicritère AHP	80
1-5- Carte finale d'aptitude : Synthèse globale et croisement multi-critères (Approche AHP)	83
1-6- Analyse environnementale complémentaire.....	85
Section 03 : Développement et déploiement de la plateforme WebGIS SolarGIS	89
3-1-Développement du WebGIS et diffusion cartographique	89
Conclusion.....	97
Conclusion Générale :	99
Références.....	101

Liste des figures :

Figure 1: Organigramme méthodologique de la recherche.....	18
Figure 2: les Composantes d'un SIG ((Lamia, 2021) , p28).....	49
Figure 3: Le format vecteur et le format Raster de L'information géographique (Lamia, 2021) , p32)	49
Figure 4: Les trois grandes formes géométriques ((Lamia, 2021) , p33).....	50
Figure5: Le formats raster ((Lamia, 2021), p 33).....	51
Figure 6: Carte localisation de la zone d'étude Es-Sénia, Oran.....	65
Figure 7: Carte d'altitude de la commune d'Es-Senia.....	66
Figure 8: Carte des pentes de la commune d'Es-Senia	71
Figure 9 : Carte d'exposition des versants de la commune d'Es-Senia.....	72
Figure 10: Carte d'occupation du sol de la commune d'Es-Senia	73
Figure 11: Carte de l'Indice de Végétation de la commune d'Es-Senia	75
Figure 12: Distribution statistique et histogramme des fréquences des valeurs de NDVI sur la commune d'Es-Senia.....	76
Figure 13 : Carte D'Irradiation Solaire de la commune d'Es-Senia	77
Figure 14: Carte de Température de la surface de la commune d'Es-Senia	78
Figure 15 : Carte De Température de l'Air de la commune d'Es-Senia	80
Figure 16 : Carte d'Aptitude finale de la commune d'Es-Senia	84
Figure 17: Carte de l'Ilot de Chaleur Urbain de la commune d'Es-Senia	86
Figure 18 : Carte de la corrélation spatiale entre l'Indice de Végétation (NDVI) et l'Îlot de Chaleur Urbain (UHI) sur la commune d'Es-Senia	88
Figure 19 : Diagramme de dispersion et distribution des corrélations statistiques entre le NDVI et l'UHI sur la commune d'Es-Senia	89
Figure 20 : Architecture globale système et diagramme des flux de la plateforme WebGIS SolarGIS	90
Figure 21 : Fichier Styled Layer Descriptor (SLD) utilisé pour la représentation cartographique de la couche d'aptitude photovoltaïque	91
Figure 22 : Extrait du code HTML définissant la structure de l'interface WebGIS SolarGIS	92
Figure 23 : Déclaration des variables globales dans le bloc :root	93
Figure 24 : Code CSS de la section de la carte et du conteneur #map section.....	93
Figure 25 : Style Glassmorphism des panneaux d'affichage de l'interface.....	93
Figure 26 : Style Glassmorphism de la barre de navigation supérieure	93
Figure 27 : Interface utilisateur de l'application SolarGIS avec le fond de plan OpenStreetMap.....	94
Figure 28 : Affichage dynamique de la couche d'aptitude (Overlay WMS) sur l'interface SolarGIS	94
Figure 29 : Script JavaScript de configuration de la requête WMS GetFeatureInfo	95

Liste des tableaux :

Tableau 1: echelle de Saaty [(Tahar & Fares) , p231.]	54
Tableau 2 : Indices aléatoires (IA) en fonction du nombre de critères (Saaty, 1980)	55
Tableau 3 : Comparaison structurelle entre les solutions SIG de bureau et les architectures	58
Tableau 4 : Matrice de Comparaison par Paires — AHP (Saaty)	81
Tableau 5 : Matrice Normalisée — AHP	82
Tableau 6 : Vecteur de Priorité (Poids AHP) & Cohérence	82
Tableau 7 : Paramètres d'évaluation technico-économique et indicateurs de rentabilité du modèle	96

Liste des équations :

Équation 1 : L'indice de cohérence (IC)	55
Équation 2 : Le ratio de cohérence (RC)	55
Équation 3 : Fonction d'agrégation multicritère par somme pondérée issue de la méthode AHP.	55

Liste Des Abréviations

SIG : Système d'information géographique

AHP : Analytics Hiérarchie Process (Processus d'Analyse Hiérarchique)

ALOS: Advanced Land Observing Satellite (Satellite d'Observation Terrestre Avancé)

APRUE: Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie

CAMS : Copernicus Atmosphere Monitoring Service (Service de Surveillance de l'Atmosphère Copernicus)

CDER : Centre de Développement des Énergies Renouvelables

CREDEG : Compagnie de Distribution d'Électricité et de Gaz

CREG : Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz

CRTSE : Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Énergétique

CSS : Cascading Style Sheets (Feuilles de Style en Cascade)

DEM : Digital Elevation Model (Modèle Numérique d'Élévation)

DW : Dynamic World (V1) (Monde Dynamique (V1))

EPSG : European Petroleum Survey Group (code de référence de projection)

GEE : Google Earth Engine

GHI : Global Horizontal Irradiance (Rayonnement Global Horizontal)

GPS : Global Positioning System

HTML : HyperText Markup Language

IA : Indice Aléatoire

IC : Indice de Cohérence

IEA : International Energy Agency (Agence Internationale de l'Énergie)

IMSI : Institut de Météorologie et des Sciences de la Mer

IRENA : International Renewable Energy Agency (Agence de Energie renouvelable international)

JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency

JSON : JavaScript Object Notation

LST : Land Surface Temperature (Température de Surface du Sol)

MCDA : Multi-Criteria Decision Analysis (Analyse de Décision Multi-Critères)

MCE : Multi-Criteria Evaluation (Évaluation Multi-Critères)

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MW : Mégawatt

NASA : National Aeronautics and Space Administration (Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace)

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index (Indice de Végétation par Différence Normalisée)

OGC : Open Geospatial Consortium (Consortium Géospatial Ouvert)

OSM : OpenStreetMap (Carte Ouverte du Monde)

PALSAR : Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (Radar à Synthèse d'Ouverture de type L à Réseau Phasé)

PDF : Portable Document Format (Format de Document Portable)

PV : Photovoltaïque (déjà en français)

PVGIS : Photovoltaic Geographical Information System (Système d'Information Géographique Photovoltaïque)

RC : Ratio de Cohérence

SAD : Système d'Aide à la Décision

SGBDR : Système de Gestion de Base de Données Relationnelle

SIG : Système d'Information Géographique

SLD : Styled Layer Descriptor (Descripteur de Couche Stylisée)

SoDa : Solar Data (Données Solaires)

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission (Mission Topographique Radar de la Navette)

TIRS : Thermal Infrared Sensor (Capteur Infrarouge Thermique)

UHI : Urban Heat Island (Îlot de Chaleur Urbain)

URAER: Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables

URL : Uniform Resource Locator (Localisateur Uniforme de Ressources)

USGS : United States Geological Survey (Service Géologique des États-Unis)

UTM : Universal Transverse Mercator (Mercator Transverse Universel)

WebGIS: Web Geographic Information System (Système d'Information Géographique en Ligne)

WFS : Web Feature Service (Service d'Entités Web)

WGS : World Geodetic System (Système Géodésique Mondial)

WLC : Weighted Linear Combination (Combinaison Linéaire Pondérée)

WMS : Web Map Service (Service de Carte Web)

XML — extensible Markup Language (Langage de Balisage Extensible)

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale:

L'énergie solaire est devenue incontournable dans les débats actuels sur la transition énergétique. Pour faire face au réchauffement climatique, il est urgent de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de limiter notre dépendance aux énergies fossiles comme le pétrole ou le gaz. Parmi les solutions disponibles, le solaire s'impose comme une évidence car c'est une ressource propre, inépuisable et disponible partout.

À l'échelle internationale, les énergies renouvelables couvrent environ 10% de la production d'énergie. La part du photovoltaïque reste encore faible (entre 2 et 3%), mais les prévisions montrent qu'elle devrait dépasser les 5% d'ici 2030. Cette progression est portée par la baisse rapide du prix des panneaux et par les améliorations du stockage de l'électricité . [((IEA), 2011); ((IRENA), 2025)]

L'Algérie possède un avantage majeur : son potentiel d'ensoleillement est l'un des plus élevés au monde, notamment grâce à son climat et à l'immensité de son territoire. Pour exploiter cette ressource, l'état a lancé dès 2011 le programme national des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (2011-2030). Ce plan vise à installer 22000MW d'énergies renouvelables d'ici 2030, avec 12000 MW pour la consommation du pays et 10000 MW destinés à l'exportation. Dans ce projet, le solaire doit assurer à lui seul près de 37% de la production électrique renouvelable [((IEA), 2011); (Database, 2020)].

Récemment, ce programme est entré dans une phase concrète avec les projets de Sonelgaz. Le groupe a lancé des appels d'offres pour construire 15centrales photovoltaïques à travers 11wilayas, pour une puissance totale de 2000 MW . Ces projets, dont la puissance varie entre 80 et 220 MW par centrale, prennent en compte toutes les étapes, de l'étude de terrain jusqu'au raccordement au réseau électrique [(Algeria Invest, 2024) (Energy News Africa Plus, 2024); [Portail Algérien des Énergies Renouvelables, 2023].

Cependant , pour que ces installations soient efficaces et rentables, on ne peut pas placer les panneaux n'importe où . Le rendement ne dépend pas seulement du soleil . Il faut prendre en compte de nombreux critères géographiques : la pente, la température de l'air, l'orientation des versants ainsi que les contraintes de la ville et de l'environnement. Gérer toutes ces informations en même temps est un défi complexe.

A cet effet, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) deviennent indispensables. Ils permettent de rassembler, de croiser et analyser toutes ces données spatiales pour identifier les meilleurs emplacements de manière objective. Utiliser les SIG permet de sécuriser les investissements, d'optimiser la production d'énergie et de réduire les coûts d'installation .

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude. Notre objectif est d'utiliser l'analyse spatiale et les SIG pour sélectionner les sites les plus favorables à l'implantation des panneaux solaires dans la commune d'Es-Senia (wilaya d'Oran), Ce travail propose une méthode concrète pour aider la commune à réussir sa transition énergétique de façon durable et adaptée à son territoire.

Problématique:

L'Algérie possède un potentiel solaire exceptionnel, ce qui explique pourquoi les projets photovoltaïques se multiplient un peu partout dans le pays depuis quelques années. Pourtant, trouver le bon terrain pour installer ces infrastructures reste un défi majeur. Choisir un site inadapté a un impact direct sur la production d'énergie et gâche la rentabilité du projet à long terme.

Il faut dire que le rendement d'une centrale solaire dépend de nombreux critères qui s'accumulent. Même si le soleil est le facteur évident, d'autres paramètres techniques et environnementaux sont tout aussi importants : la pente du terrain, le type d'occupation du sol, la distance par rapport aux routes et au réseau électrique, ...etc ; ou encore les zones à éviter absolument. Gérer toutes ces données à la fois est impossible de manière intuitive. En Algérie, la sélection des sites se fait malheureusement encore trop souvent via des méthodes simplifiées. En négligeant certains critères, on prend le risque de faire grimper les coûts d'installation ou de sous-exploiter le vrai potentiel solaire disponible.

Pour régler ce problème, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) combinés à l'analyse multicritère sont des outils d'aide à la décision idéaux. Ils permettent de superposer et de croiser toutes les cartes pour faire ressortir objectivement les zones les plus favorables. Pourtant, à l'échelle locale, les communes les utilisent encore très peu. C'est notamment le cas à Es-Senia, une commune qui fait face à de lourdes contraintes d'espace entre ses industries, ses terres agricoles et ses zones humides. C'est un vrai manque, car c'est justement à cette échelle locale que se décident concrètement les projets d'aménagement.

De ce fait, notre problématique, répondre à la question suivante :

- **Dans quelle mesure les Systèmes d'Information Géographique permettent-ils d'optimiser le choix des sites d'implantation de projets solaires photovoltaïques à l'échelle de la commune d'Es-Senia ?**

Cette problématique, réponds systématiquement aux questions suivantes :

- Quels critères physiques, climatiques et environnementaux déterminent l'aptitude d'un territoire à accueillir des installations photovoltaïques, et comment influencent-ils leur rendement technique ?
- Dans quelle mesure le couplage SIG et analyse multicritère AHP permet-il de produire un modèle de sélection de sites rigoureux et reproductible, dépassant les limites des approches empiriques traditionnelles ?

- Comment valoriser les résultats de cette analyse spatiale à travers un prototype WebGIS opérationnel, afin d'en faire un outil d'aide à la décision accessible aux acteurs de la planification énergétique locale d'Es-Senia ?

Hypothèses de recherche:

Pour guider notre démarche et répondre aux questions posées, nous avons formulé les quatre hypothèses suivantes :

- **L'influence des facteurs thermo-climatiques :** Nous supposons que le choix des zones idéales ne dépend pas uniquement de l'ensoleillement global. La prise en compte combinée des températures de l'air et du sol est indispensable, car une chaleur excessive peut réduire l'efficacité des panneaux photovoltaïques à Es-Senia.
- **L'impact de la topographie locale :** L'analyse fine du relief, à travers la pente du terrain et l'exposition des versants, devrait permettre d'identifier les parcelles bénéficiant de la meilleure orientation solaire tout en évitant les contraintes d'ombrage ou de relief inadapté.
- **L'efficacité de la méthode SIG-AHP :** L'utilisation conjointe d'une analyse multicritère (AHP) et d'un outil SIG permet d'obtenir des résultats beaucoup plus fiables et complets que les méthodes traditionnelles, en évaluant simultanément l'ensemble des données environnementales et physiques collectées.
- **L'intérêt d'un prototype Web SIG :** La mise en place d'une interface Web SIG, même sous forme de prototype, faciliterait grandement la prise de décision en centralisant toutes ces données physiques et en les rendant accessibles aux acteurs du secteur énergétique.

Objectif de recherche :

Pour répondre à la problématique posée, plusieurs objectifs ont été définis. Ils structurent la démarche et garantissent la cohérence de l'étude.

- Comprendre le contexte énergétique actuel, tant à l'échelle mondiale qu'en Algérie, afin de situer la place de l'énergie solaire dans la transition énergétique.
- Identifier les critères pertinents (géographiques, techniques, environnementaux) qui influencent le choix d'un site d'implantation. Tous les paramètres n'ayant pas la même importance, il convient de les hiérarchiser.
- Rassembler les données nécessaires : ensoleillement, Pente , Exposition des versants , occupation du sol, NDVI , Température du sol , Température de l'air . Sachant que la

qualité de l'analyse dépend directement de la fiabilité et de l'exhaustivité des informations collectées.

- Utiliser les SIG pour analyser ces données et visualiser la répartition spatiale de chaque critère sur le territoire d'Es-Senia.
- Appliquer une analyse multicritère (méthode AHP) afin de pondérer les critères et d'évaluer objectivement les sites potentiels.
- Produire des cartes d'aptitude permettant d'identifier clairement les zones les plus favorables à l'implantation de panneaux solaires.
- Apporter une contribution concrète à la planification énergétique locale, en fournissant aux décideurs un outil d'aide à la décision basé sur des données objectives.

Méthodologie de recherche :

Approche méthodologique globale de la recherche

Pour traiter la problématique du placement optimal des panneaux solaires sur le territoire de la commune d'Es-Senia, cette recherche s'appuie sur une approche géomatique hybride. Celle-ci combine les **Systèmes d'Information Géographique (SIG)**, la **télédétection**, l'**analyse multicritère AHP** et les technologies **WebGIS**.

Le choix de cette méthodologie intégrée est directement dicté par la nature spatiale et la complexité de l'implantation des infrastructures solaires. Évaluer le potentiel d'un territoire ne peut pas reposer sur l'analyse isolée d'un seul facteur. La sélection des sites dépend simultanément de variables météorologiques, de contraintes physiques de relief et d'indicateurs de dynamique environnementale. Le couplage entre les outils SIG et la méthode AHP permet de structurer cette analyse en transformant des critères de natures hétérogènes en couches d'informations comparables. Cela garantit un modèle d'aide à la décision rigoureux, reproductible et scientifiquement vérifiable, éliminant toute subjectivité empirique afin de sécuriser la planification territoriale.

La recherche s'articule autour d'une chaîne de traitement progressive et logique, découpée en six étapes interconnectées : de la conceptualisation théorique jusqu'au déploiement du code de notre application WebGIS SolarGIS.

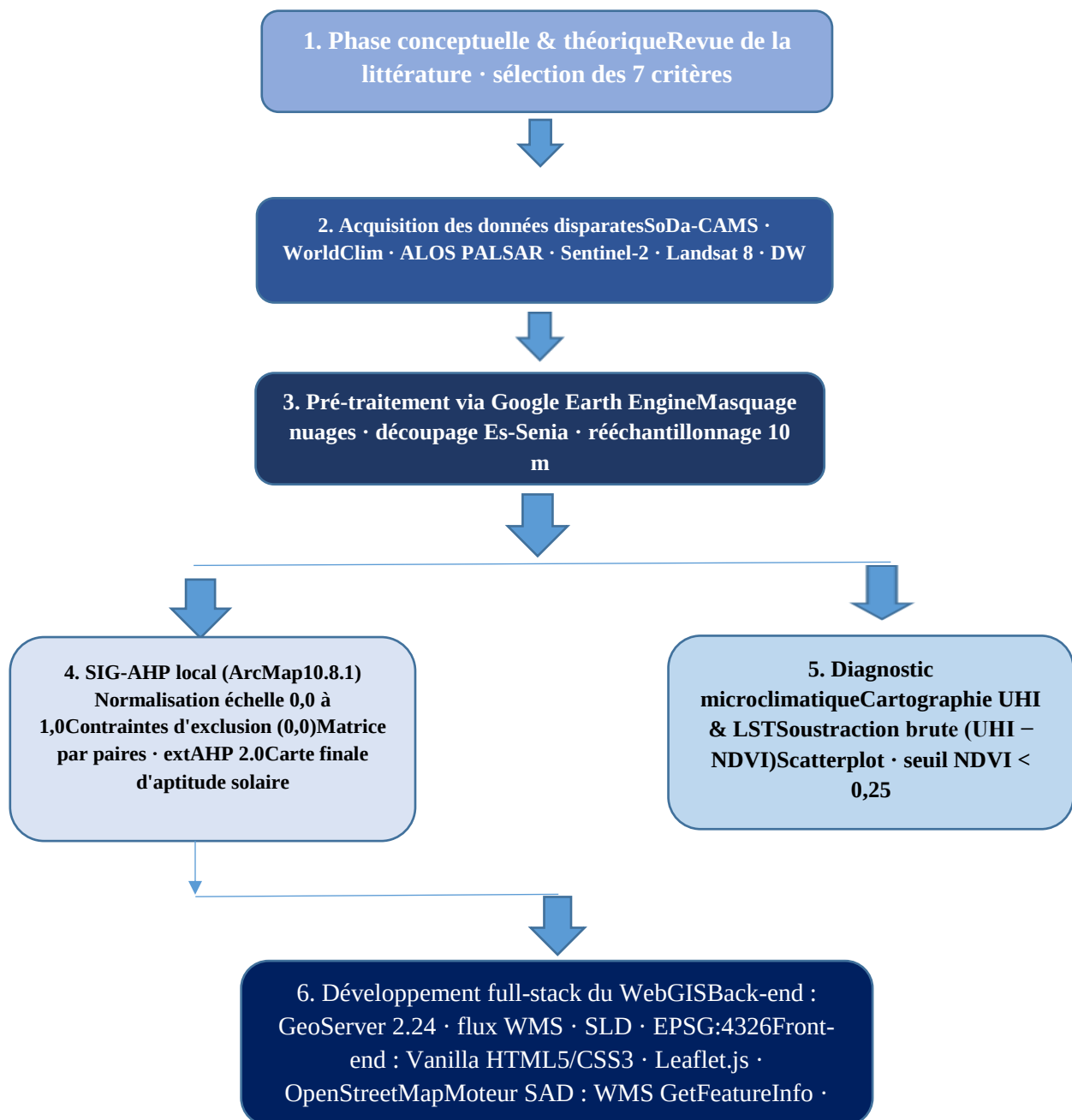


Figure 1: Organigramme méthodologique de la recherche

ETAPE 01 : Phase conceptuelle et sélection des critères

La première phase de la recherche s'est concentrée sur l'établissement d'un cadre théorique solide à travers l'analyse minutieuse des publications scientifiques, des thèses de doctorat et des rapports d'autorité en ingénierie énergétique. Ce diagnostic initial était indispensable pour poser la problématique de la transition énergétique locale de manière rigoureuse et valider les choix méthodologiques adoptés.

L'analyse de la littérature nationales et internationale démontre que le couplage entre les outils SIG et les méthodes multicritères (MCDA) constitue l'approche la plus performante pour la sélection des sites d'implantation. Cette combinaison est retenue car les SIG fournissent la puissance algorithmique pour stocker, manipuler et superposer des données spatiales massives,

tandis que la méthode AHP apporte la rigueur mathématique nécessaire pour peser l'importance relative de chaque facteur.

L'analyse des retours d'expérience scientifiques a dicté la sélection de nos sept critères finaux. Les variables secondaires ont été exclues pour retenir uniquement les facteurs qui influencent directement le rendement technique des panneaux ou la faisabilité matérielle de l'implantation.

D'abord, le rayonnement global horizontal (GHI) permet de valider la présence et la quantité de la ressource énergétique brute disponible sur la commune. Pour l'aspect physique du terrain, nous avons extrait la pente et l'exposition (*Aspect*) afin de contrôler la faisabilité géotechnique du génie civil. Ces deux couches servent à minimiser les coûts de terrassement et à identifier l'inclinaison optimale des structures face au soleil.

Concernant les contraintes environnementales, l'occupation du sol et l'indice NDVI sont indispensables pour protéger le territoire. Ils permettent de sanctuariser les parcelles agricoles ou les milieux naturels sensibles, tout en évitant les conflits d'usage de l'espace. Enfin, la température de l'air et la température de surface du sol (LST) ont été intégrées pour des raisons purement techniques. La physique des cellules photovoltaïques indique en effet que leur rendement chute en cas de surchauffe thermique, avec une perte d'efficacité d'environ 0,4% par degré au-delà de 25 °C.

ETAPE 02 : Acquisition et choix des données géospatiales brutes

Le choix de chaque base de données et de chaque capteur satellitaire répond à des impératifs de précision spatiale, de fraîcheur temporelle et d'autorité scientifique. Les données d'entrée proviennent de serveurs, de capteurs et d'organismes spatiaux internationaux reconnus, ce qui sécurise la fiabilité de notre point de départ.

Pour les données climatiques GHI, nous avons choisi d'extraire le Rayonnement Global Horizontal auprès de SoDa-CAMS. Cette plateforme fournit des séries d'irradiation solaire validées par satellite qui sont spécifiques aux régions méditerranéennes et d'Afrique du Nord. Ce choix évite d'utiliser des données interpolées ou des stations météo locales incomplètes. En parallèle, le catalogue mondial WorldClim v1 a été sélectionné pour obtenir les normales de la température de l'air. Cette source propose des modélisations climatiques régionales indispensables pour évaluer l'ambiance thermique générale de la commune.

Concernant le relief, au lieu d'utiliser le modèle SRTM standard de la NASA à 30 mètres, le choix s'est porté sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à haute résolution de 12,5 mètres. Cette précision est indispensable pour calculer avec exactitude la pente et l'orientation

(Aspect) à l'échelle fine des parcelles d'Es-Senia afin de garantir la faisabilité technique de l'implantation.

Pour le suivi environnemental, nous avons choisi le capteur spatial Sentinel-2 pour sa haute résolution de 10 mètres dans les bandes du rouge et du proche infrarouge. C'est la configuration optimale pour calculer l'indice de végétation NDVI et suivre finement la biomasse végétale à l'échelle communale. Ces images sont complétées par la base de données moderne Dynamic World V1. Celle-ci génère une classification thématique automatisée à 10 mètres de résolution, actualisée en continu, ce qui garantit une cartographie récente et fidèle des zones bâties, industrielles et agricoles d'Es-Senia pour éviter les conflits d'usage de l'espace. Enfin, le capteur thermique TIRS de Landsat 8 a été sélectionné car il constitue la référence scientifique mondiale pour le calcul de la température de surface du sol (LST) à 30 mètres. C'est la seule donnée capable d'alimenter correctement notre diagnostic sur les écarts thermiques et les îlots de chaleur urbains (UHI).

ETAPE 03 : Pré-traitement lourd sur Google Earth Engine

La troisième étape marque le virage informatique du projet en centralisant l'intégralité du traitement lourd des données matricielles au sein de la plateforme cloud Google Earth Engine (GEE). Le choix de travailler sur GEE repose sur des impératifs de performance. Traiter des séries d'images satellitaires Sentinel-2 et Landsat 8 en local sur un ordinateur classique demande le téléchargement de fichiers très lourds et de longues heures de calcul. Nous avons choisi GEE pour exécuter instantanément en ligne les algorithmes de filtrage du bruit atmosphérique et le masque de nuages. En éliminant les pixels corrompus, le traitement garantit que les indices calculés (NDVI, LST) reflètent fidèlement la réalité physique du sol d'Es-Senia sans biais.

Les scripts JavaScript développés sous GEE ont également servi à réaliser le découpage strict (*Clipping*) et le rééchantillonnage spatial. D'un côté, le découpage s'appuie sur le Shapefile officiel des limites administratives d'Es-Senia pour isoler uniquement le territoire d'étude. Cette opération permet de purger toutes les données inutiles hors de la commune afin d'optimiser les futurs temps de calcul sous ArcMap et GeoServer. D'un autre côté, le rééchantillonnage spatial à 10 mètres s'impose comme une étape critique de standardisation. Les données d'entrée affichaient des résolutions disparates, allant de 12,5 mètres pour le MNT jusqu'à 1 kilomètre pour WorldClim. Pour pouvoir croiser ces grilles de pixels dans une analyse multicritère, elles doivent impérativement posséder la même taille de maille. Nous avons donc choisi de rééchantillonner toutes les couches à 10 mètres en utilisant l'algorithme d'interpolation du plus proche voisin sur GEE. Cela permet d'aligner parfaitement toutes les matrices sur la résolution fine de Sentinel-2 sans dégrader l'information géographique d'origine. Les couches propres ont ensuite été exportées sous forme de fichiers GeoTIFF autonomes.

ETAPE 04 : Diagnostic environnemental et microclimatique

En parallèle du modèle décisionnel pur, la quatrième étape s'est concentrée sur un diagnostic thermique et microclimatique approfondi de la commune. En exploitant la température de surface (LST) calculée à partir de Landsat 8, nous avons spatialisé l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (UHI) en mesurant les écarts thermiques de chaque pixel par rapport à la moyenne communale. Intégrer cette dimension microclimatique à une étude consacrée à l'implantation des panneaux solaires répond à un impératif technique direct. Les cellules photovoltaïques subissent une perte de rendement lorsque leur température de fonctionnement s'élève. Modéliser conjointement l'UHI et le NDVI sert donc à identifier en amont les secteurs sujets à de fortes surchauffes thermiques afin de cartographier au mieux les contraintes environnementales du territoire.

Pour analyser les interactions biophysiques à l'origine de ces variations, une soustraction matricielle brute (UHI - NDVI) ainsi qu'une modélisation statistique par diagramme de dispersion (*scatterplot*) ont été réalisées. Ce calcul algébrique permet de spatialiser directement l'intensité du stress thermique en fonction du déficit végétal. Le diagramme de dispersion sert quant à lui à valider mathématiquement la corrélation négative rigoureuse existant entre la biomasse et la température de surface. C'est l'analyse de ce graphique qui a permis de démontrer et de fixer de manière objective le seuil critique de surchauffe microclimatique à un NDVI inférieur à 0,25 sur la commune d'Es-Senia. Ce croisement statistique apporte la preuve que les choix d'aménagement et de sélection des zones d'aptitude s'appuient sur des modélisations quantitatives et reproductibles.

ETAPE 05 : Analyse multicritère AHP locale

La cinquième étape ramène le projet vers l'environnement SIG de bureau afin d'exécuter la phase finale d'évaluation multicritère. Le choix du logiciel de bureau ArcMap 10.8.1 repose sur sa robustesse pour centraliser les couches spatiales, manipuler les fichiers rasters en local et gérer la superposition des données vectorielles.

L'essentiel de la normalisation continue a été programmé en amont sous Google Earth Engine pour les critères basés sur des valeurs numériques continues comme le rayonnement (GHI), la pente, la température de l'air, la température de surface (LST) et l'indice NDVI. Ces variables ont pu être étirées de manière linéaire sur une échelle mathématique allant de 0,0 à 1,0. Cependant, après l'importation des fichiers GeoTIFF sous ArcMap, une étape cruciale de ré-enrichissement thématique a été réalisée par un second reclassement (*re-reclassify*) local. Cette manipulation ciblée était indispensable pour l'exposition des versants (*Aspect*) et l'occupation du sol, car ces deux critères ne répondent pas à une logique linéaire :

- **Pour l'exposition des versants (*Aspect*)** : S'exprimant en directions azimutales, il n'existe pas de relation mathématique continue entre les degrés du Nord et de l'Est. Le

reclassement local a permis d'attribuer une note de favorabilité fixe à chaque quadrant géographique pour privilégier l'orientation Sud.

- **Pour l'occupation du sol** : S'agissant de classes thématiques discrètes sans unité de mesure commune, chaque catégorie a reçu sa valeur d'aptitude propre. C'est ce traitement qui a permis d'affecter la note maximale de 1,0 aux sols nus et la valeur nulle d'exclusion stricte (0,0) à l'emprise du lac Dayat Morsli, du tissu urbain dense et du complexe aéroportuaire.

Une fois ces ajustements locaux validés, l'extension extAHP 2.0 a été mobilisée pour appliquer la méthode d'analyse hiérarchique de Saaty. Au lieu d'allouer les coefficients de poids de manière arbitraire, ce module impose une confrontation des critères deux à deux au sein d'une matrice de comparaison par paires. L'outil calcule automatiquement le ratio de cohérence (RC), et le maintien de ce paramètre sous le seuil critique des 10% ($RC < 0,10$) valide la stabilité logique et la cohérence des jugements portés sur l'importance de chaque variable. La fusion finale des couches s'exécute ensuite par une combinaison linéaire pondérée pour aboutir à la carte finale d'aptitude.

ETAPE 06 : Ingénierie serveur et développement de la plateforme WebGIS

La dernière phase de la recherche s'est concentrée sur la valorisation applicative des résultats spatiaux à travers le développement complet d'une infrastructure WebGIS *full-stack*. Le choix de développer un WebGIS répond à la volonté de dépasser les limites des formats d'études classiques qui s'arrêtent généralement à la production d'une carte statique figée. Concevoir une application en ligne permet de démontrer qu'un projet de géomatique moderne gagne à être accessible, transparent et directement manipulable par des non-spécialistes. Le WebGIS transforme ainsi une donnée géographique brute en un véritable outil d'aide à la décision partagée pour la gouvernance locale de la commune d'Es-Senia.

Le pipeline informatique se structure autour de deux volets techniques complémentaires qui s'enchaînent de manière fluide. D'une part, le Back-End s'appuie sur le serveur cartographique open-source GeoServer 2.24, sélectionné pour ses performances en matière d'interopérabilité géospatiale. Il permet de convertir le fichier raster local issu de la modélisation en un service de flux web standardisé (*Web Map Service* — WMS) accessible via le réseau. Sa configuration logicielle prend en charge la reprojection géodésique à la volée vers le système universel EPSG:4326 (WGS 84), une opération indispensable pour aligner géométriquement notre matrice au-dessus des fonds de cartes mondiaux. GeoServer gère également l'intégration d'un fichier de style XML personnalisé (SLD) paramétré en mode *intervals*. Ce style intercepte le canal brut de gris (GRAY_INDEX) généré en local pour le discrétiser en 5 classes de couleurs sémantiques directement lisibles.

D'autre part, l'interface utilisateur Front-End a été développée suivant une approche de programmation épurée, qualifiée de *Vanilla Web Architecture*. En exploitant exclusivement les technologies natives HTML5, CSS3 et JavaScript ES6+, l'application s'affranchit des frameworks lourds pour garantir des temps d'affichage et de réponse minimaux. La charte graphique adopte un style immersif de type *Dark-Tech* fondé sur le *Glassmorphic Design*, utilisant la propriété de filtrage d'arrière-plan pour générer un effet de transparence épuré. Pour orchestrer le canevas cartographique, la bibliothèque légère *Leaflet.js* a été sélectionnée afin de consommer le flux WMS de GeoServer et de le superposer, avec une opacité fixée à 0,75, au-dessus des repères urbains et topographiques du fond de plan OpenStreetMap.

La valeur ajoutée du système réside dans son module d'interrogation spatial et financier asynchrone programmé en JavaScript. Au lieu de se limiter à une consultation passive, l'utilisateur peut activer le mode "Analysis", ce qui modifie le style CSS du bouton vers une teinte émeraude pour indiquer l'état actif, puis cliquer sur n'importe quel point du territoire d'Es-Senia. Le code intercepte les coordonnées géographiques du clic, formule une requête standardisée *WMS GetFeatureInfo* transmise via l'API native *fetch()*, et récupère un objet de données structuré au format JSON pour isoler la valeur réelle du pixel d'aptitude. Le script exécute ensuite les algorithmes de calculs économiques embarqués avant de solliciter la bibliothèque open-source *jsPDF* pour générer instantanément un rapport de synthèse technique autonome, téléchargeable directement en format PDF. Cette ingénierie logicielle confirme la transition du prototype d'un simple visualiser cartographique vers un authentique Système d'Aide à la Décision (SAD) opérationnel.

Délimitation de l'étude:

Pour garantir la rigueur de notre démarche, ce travail s'inscrit dans un cadre d'analyse délimité selon trois axes principaux :

- **Le cadre géographique (Délimitation spatiale) :** Notre zone d'étude se limite exclusivement au territoire de la commune d'Es-Senia, dans la wilaya d'Oran. Ce choix se justifie par la forte concentration d'activités industrielles et urbaines qui crée un besoin concret en énergie sur place. Pour mener une analyse micro-territoriale approfondie et capter les moindres spécificités du relief local, les communes voisines n'ont pas été intégrées dans les calculs.

- **Délimitation thématique (Le cadre des variables) :** Ce travail traite uniquement de la modélisation physique, thermo-climatique et environnementale nécessaire à l'identification des zones favorable. Les calculs de rentabilité financière et les coûts d'investissement économiques ne font pas partie de ce travail. Les données manipulées correspondent à la période contemporaine récente, combinant des moyennes climatologiques pluriannuelles (pour le gisement solaire et les températures de l'air et du sol) et des données satellitaires à haute résolution (pour la pente, l'exposition du relief, l'occupation du sol *Dynamic World V1* et l'indice

NDVI). L'analyse se concentre ainsi exclusivement sur ces sept paramètres environnementaux et physiques.

- **Le cadre technique (Délimitation technique) :** La plateforme Web SIG développée à la fin de cette étude est un prototype de démonstration. Son but est d'illustrer comment coupler concrètement les outils cartographiques et l'analyse multicritère (AHP) pour créer une aide visuelle à la décision. Elle n'a pas pour vocation d'intégrer les scénarios politiques, réglementaires ou sociaux, mais se concentre uniquement sur la restitution des cartes d'aptitude basées sur nos critères physiques.

Organisation du mémoire:

Pour offrir une lecture structurée et progressive de notre recherche, ce mémoire est organisé en trois grands chapitres complémentaires :

Chapitre 1 – Cadre théorique et conceptuel :

Ce premier chapitre pose les fondements théoriques indispensables pour situer notre sujet:

- **État de l'art :** Une revue de la littérature examinant l'évolution des approches de sélection de sites, l'intégration historique des SIG dans les études solaires et les limites des travaux existants.

- **Concepts et définitions :** Une clarification des notions clés liées à l'énergie solaire, au potentiel photovoltaïque et aux différents facteurs d'influence.

- **Cadre juridique et institutionnel en Algérie :** Une présentation du programme national des énergies renouvelables, des textes législatifs réglementant le secteur et des principaux acteurs institutionnels impliqués.

Chapitre 2 – Cadre méthodologique et géomatique :

Ce deuxième chapitre détaille la boîte à outils technique et la méthodologie spatiale mobilisées pour l'étude :

- **Fondements des SIG :** Une définition des Systèmes d'Information Géographique et de leurs composantes fondamentales.

- **Analyse spatiale et multicritère** : Une explication approfondie de la méthode AHP (structure de la matrice, comparaisons par paires, calcul des poids et ratio de cohérence) ainsi que du principe de la superposition pondérée (*Weighted Overlay*).

- **Environnement technique** : Une présentation des outils logiciels utilisés pour le traitement des données (*ArcGIS*, *Google Earth Engine*, *EasyAHP*) et une analyse de l'apport des plateformes Web SIG pour l'accès aux données des collectivités locales.

Chapitre 3 – Étude pratique et déploiement du prototype Web GIS :

Le dernier chapitre constitue la phase opérationnelle de notre travail, passant de l'analyse spatiale à la concrétisation d'un outil numérique interactif :

- **Présentation de la zone d'étude** : Une analyse du contexte géographique, territorial et des spécificités socio-économiques de la commune d'Es-Senia.

- **Collecte et préparation des données** : Les étapes concrètes d'acquisition, de traitement et de normalisation de nos sept paramètres physiques et climatiques sous environnement SIG.

- **Analyse multicritère (AHP) et modélisation** : L'application de la matrice de Saaty pour le calcul des poids des critères, la superposition pondérée des couches et la production des cartes finales mettant en évidence les **zones favorable**.

- **Conception et déploiement de la plateforme WebGIS :**

- **Architecture technique** : La structuration de la pile technologique (*GeoServer* pour la diffusion des flux cartographiques web et *Leaflet* pour le développement de l'interface cartographique en ligne).

- **Fonctionnalités de l'outil** : L'intégration de la carte d'aptitude finale et l'implémentation des outils d'interaction utilisateur tels que le zoom, la navigation et l'interrogation dynamique des données spatiales.

- **Apport pour la commune** : La démonstration de l'utilité concrète de cet outil interactif pour aider les décideurs locaux à visualiser et planifier les futurs projets solaires.

- **Discussion des résultats et validation :** Une analyse critique de nos cartes d'aptitude face aux réalités du terrain observées via le prototype, concluant sur la validation ou l'infirmerie de nos hypothèses de départ.

CHAPITRE 1 : Cadre théorique et conceptuel

Chapitre 1 : Cadre théorique et conceptuel

Introduction:

La transition énergétique est aujourd'hui au cœur des préoccupations mondiales, et l'Algérie, avec son potentiel solaire exceptionnel, s'est engagée dans cette dynamique à travers un programme national ambitieux. Cependant, la réussite de cette transition repose sur une question fondamentale: où implanter les infrastructures photovoltaïques pour garantir à la fois un rendement optimal, une faisabilité technique et une acceptabilité environnementale ?

Ce premier chapitre a pour objectif de poser les bases théoriques et contextuelles nécessaires à la réflexion sur cette problématique. Il s'agit de comprendre, à travers la littérature scientifique, comment la sélection des sites solaires a évolué, quels sont les concepts clés à maîtriser, et dans quel cadre juridique et institutionnel s'inscrit notre étude.

Pour répondre à ces objectifs, le chapitre est organisé en trois sections principales :

- **La première section** présente un état de l'art des méthodes de sélection des sites solaires, en retraçant le passage des approches classiques vers l'intégration des SIG, tout en identifiant les limites des travaux existants.
- **La deuxième section** est consacrée à la définition des concepts fondamentaux d'énergie solaire, potentiel solaire, facteurs d'influence qui seront mobilisés tout au long de ce mémoire.
- **Enfin, la troisième section** examine le cadre juridique et institutionnel algérien, à travers le programme national des énergies renouvelables, les textes législatifs et les acteurs du secteur.

Ce chapitre fournit ainsi les clés de lecture nécessaires pour aborder, dans les chapitres suivants, la méthodologie géomatique et son application concrète au territoire d'Es-Senia. Il permet de comprendre pourquoi et comment les outils SIG et l'analyse multicritère s'avèrent indispensables pour identifier les **zones favorable** à l'échelle locale.

SECTION 01 : Etat de l'art

1- 1- Approche classique de sélection des sites

Avant la généralisation des Systèmes d'Information Géographique, le choix des sites d'implantation des panneaux solaires reposait principalement sur des approches empiriques. Les décisions étaient prises sur la base de quelques critères jugés déterminants, souvent issus de l'expérience des ingénieurs et de l'observation directe du terrain.

Le critère principal était l'ensoleillement, dans la mesure où il conditionne directement la production d'électricité. Toutefois, son évaluation reposait souvent sur des estimations visuelles ou des données à faible résolution, sans prise en compte des masques solaires potentiels (végétation, bâtiments). Janke souligne que dans les approches traditionnelles, l'évaluation du rayonnement solaire restait fréquemment approximative, faute d'outils adaptés. (Janke, 2010)

La topographie constituait également un critère déterminant. Les surfaces planes, dégagées et sans constructions étaient privilégiées, car elles réduisent les coûts de terrassement et facilitent l'installation. En revanche, les terrains pentus ou encombrés étaient généralement exclus, même lorsqu'ils présentaient un bon potentiel d'ensoleillement.

En parallèle, les facteurs environnementaux commençaient à s'imposer pour éviter l'occupation d'espaces sensibles. **Watson & Hudson (2015)** confirment que la confrontation entre le rendement climatique et la préservation biophysique des sols figurait systématiquement parmi les arbitrages les plus complexes des études de faisabilité traditionnelles. Faute d'outils d'intégration spatiale, ces analyses se limitaient souvent à des vérifications basiques de la sensibilité des parcelles. (Watson & Hudson, 2015)

Enfin, l'accessibilité et les coûts étaient également pris en compte. Un site facile d'accès pour les engins et les équipes, associé à un coût global jugé raisonnable, avait plus de chances d'être retenu.

Cette approche, bien que cohérente, présentait plusieurs limites.

D'abord, l'approche empirique classique négligeait un ensemble de facteurs biophysiques pourtant déterminants, tels que les ombres portées par le relief ou la vulnérabilité de la couverture végétale. Un terrain pouvait sembler idéal lors d'une simple observation visuelle, mais se révéler totalement inadapté à cause de sa sensibilité environnementale. À ce sujet, **Watson & Hudson (2015)** soulignent que l'un des principaux défis de l'identification des sites est de minimiser l'impact environnemental du développement énergétique. Leur modélisation montre d'ailleurs que les contraintes biophysiques et environnementales représentent à elles seules plus de 60% des zones exclues de leur simulation. Cela illustre l'importance cruciale de

ces critères d'occupation et d'usage du sol, des éléments souvent ignorés par les planificateurs du passé, et justifie directement notre démarche de filtrage sur la commune d'Es-Senia.

Ensuite, ces choix empiriques souffraient d'une forte subjectivité. Deux experts distincts pouvaient proposer des sites d'implantation totalement différents pour un même projet, sans qu'il soit possible de départager objectivement leurs avis. La décision finale dépendait excessivement de l'intuition et de l'expérience personnelle de chacun, ce qui la rendait difficile à justifier scientifiquement.

À cet égard, **Joshi et al. (2025)** rappellent que « *les approches traditionnelles supposent une uniformité dans les évaluations des experts, ce qui conduit souvent à des résultats incohérents* » (Joshi, Dixit, Nikhade, & Talodhikar, 2025) [p . 567 notre traduction] . De même, une revue systématique de la littérature publiée par **Chen Jong & Mohamud Ahmed (2024)** au sein de la revue *IEEE Access* confirme que « *le recours exclusif au jugement humain introduit du flou et des biais décisionnels* » dans les processus de sélection de sites [(Chen Jong & Mohamud Ahmed, 2024) p . 143460 **notre traduction**] . Ces failles méthodologiques soulignent l'impératif de s'appuyer sur des outils mathématiques rigoureux pour structurer l'avis des spécialistes.

Enfin, les méthodes traditionnelles fonctionnaient de manière strictement ponctuelle, c'est-à-dire site par site. La démarche classique consistait à partir d'une parcelle préalablement pressentie pour vérifier ensuite si elle convenait aux exigences techniques, sans jamais comparer systématiquement les différentes options disponibles sur l'ensemble d'un territoire. Par conséquent, des emplacements potentiellement beaucoup plus favorables et rentables risquaient d'être totalement ignorés par les planificateurs.

À cet égard, **Janke (2010)** souligne que l'un des apports majeurs des approches géospatiales modernes est précisément la capacité de scanner et de comparer l'intégralité d'une surface territoriale en continu, plutôt que d'examiner des sites isolés de manière déconnectée. Cette bascule méthodologique constitue le fondement même de notre étude sur la commune d'Es-Senia : l'outil informatique ne sert plus simplement à valider un choix de terrain déjà fait, mais à faire émerger de manière objective les meilleures parcelles disponibles sur l'ensemble de la surface communale.

Pour illustrer ces failles, prenons l'exemple concret d'un terrain plat et fortement ensoleillé situé en périphérie du tissu urbain d'Es-Senia. Avec une approche empirique classique, cette parcelle aurait de grandes chances d'être retenue immédiatement. Pourtant, une modélisation spatiale moderne révèle que ce site subit en réalité des micro-ombrages portés par le relief environnant à certaines heures de la journée (critère d'exposition). De plus, l'analyse satellitaire peut indiquer un indice NDVI élevé indiquant une zone de végétation agricole active à préserver, ou encore des températures de surface du sol excessives capables de dégrader l'efficacité technique des panneaux photovoltaïques. Autant de contraintes biophysiques invisibles lors d'une simple inspection visuelle sur le terrain.

Comme le notent Fotsing Metegam et al. (2025) dans leur étude portant sur la cartographie du potentiel photovoltaïque, « *les méthodes d'évaluation traditionnelles utilisent des outils de planification énergétique qui sont souvent focalisés sur un seul critère, comme la maximisation de la production énergétique* » (Fotsing Metegam, 2025) **p. 25 notre traduction]** . Cette focalisation unidimensionnelle rendait les planificateurs aveugles à d'autres réalités spatiales pourtant fondamentales, telles que la sensibilité écologique de la zone d'implantation ou la morphologie fine du relief.

C'est précisément pour dépasser ces limites monocritères que notre recherche s'oriente vers le couplage des outils géospatiaux et des approches décisionnelles. En abandonnant la simple validation visuelle d'un terrain isolé, l'intégration des SIG permet une véritable optimisation globale de l'ensemble de la surface communale. C'est au sein de cette dynamique méthodologique que s'inscrit notre évaluation multicritère du territoire d'Es-Senia.

C'est pour s'affranchir de ces limites méthodologiques que les protocoles d'évaluation ont évolué. Aujourd'hui, le couplage entre les SIG et l'analyse multicritère permet d'adopter une perspective globale. Plutôt que d'examiner des parcelles de manière isolée, le modèle appréhende l'intégralité du territoire d'Es-Senia. Cette démarche substitue l'évaluation intuitive par le croisement de variables biophysiques et climatiques objectives. La question fondamentale ne réside plus dans la simple validation d'un site prédéterminé, mais dans l'identification systémique des localisations optimales et la justification de leur pertinence technique.

Ce changement de perspective redéfinit profondément les processus de planification territoriale. Comme le démontrent Watson et Hudson (2015), les méthodes conventionnelles se bornaient à valider tardivement des sites choisis à l'aveugle, alors que les outils géospatiaux permettent d'inverser cette logique en optimisant la sélection en amont sur l'ensemble d'un territoire. C'est précisément cette démarche d'évaluation préalable que mettent en œuvre les protocoles d'analyse multicritère présentés dans la section suivante.

1-2 intégration des SIG dans les étude solaire :

Historiquement, la cartographie précise du potentiel solaire à l'échelle d'une parcelle a toujours été un vrai casse-tête technique. Même si on connaissait les grandes lignes du climat au niveau régional, les choses devenaient floues dès qu'il fallait choisir un terrain précis dans une commune. C'est l'arrivée des Systèmes d'Information Géographique (SIG) qui a bousculé ces vieilles habitudes de planification.

Si on regarde en arrière, au début des années 2000, l'usage des SIG pour l'énergie n'en était qu'à ses débuts. Les ordinateurs manquaient de puissance, les fichiers cartographiques coûtaient très cher et les modélisations restaient basiques. À cette époque, arriver à croiser correctement deux ou trois couches de données géographiques était déjà vu comme un grand pas en avant.

Les choses ont changé. Aujourd'hui, les logiciels géospatiaux font des calculs pointus en croisant des images satellites, des modèles numériques de terrain et des historiques météo. C'est d'ailleurs ce qui permet à des plateformes connues comme le système *PVGIS* de la Commission européenne (Huld, Müller, & Gambardella, 2012) ou le *Global Solar Atlas* (Solargis, 2024) de donner directement le rayonnement global horizontal (GHI) reçu sur un bout de terrain [Huld et al., 2012; Solargis, 2024]. On peut enfin faire des simulations ultra-localisées.

Un autre point fort des SIG est leur capacité à gérer le relief en 3D pour repérer les ombrages. Un site peut sembler parfait sur une carte en deux dimensions, mais perdre beaucoup de rendement à cause d'obstacles physiques, comme une colline ou un grand bâtiment voisin. Les masques solaires sont maintenant simulés numériquement, ce qui évite de fausser les calculs du potentiel énergétique réel.

Pour une commune comme Es-Senia, cette approche géographique aide à trier les surfaces disponibles. En croisant l'occupation du sol et les grilles d'aptitude, on repère vite où installer les panneaux. C'est un moyen d'arbitrer les choix : on peut cibler les grands toits de la zone industrielle ou utiliser les sols nus. Cela permet de développer le solaire sans toucher à la végétation ou sacrifier des terres agricoles actives.

Aux États-Unis, Janke (2010) s'est servi des outils SIG pour cartographier le potentiel d'implantation de parcs solaires et éoliens dans le Colorado. Son modèle croisait plusieurs variables d'un coup, notamment l'ensoleillement, la pente du relief et le type d'occupation des sols. En traitant toutes ces informations à l'échelle de la région, il a pu dépasser les vieilles analyses parcelles par parcelles. L'idée était de générer des cartes d'aptitude globales. Comme il l'explique lui-même, cette démarche informatique permet enfin « de comparer l'ensemble du territoire plutôt que d'examiner des sites isolés » (Janke, 2010, p. 2230).

Un peu plus tard en Angleterre, Watson et Hudson (2015) ont utilisé les données de *PVGIS* pour évaluer précisément le rayonnement solaire disponible au niveau régional. Leur modèle mélangeait des critères physiques comme la pente et l'orientation avec des contraintes lourdes d'occupation du sol. Face à l'arbitrage difficile entre production d'énergie et écologie, ils rappellent d'ailleurs un point clé : « l'un des principaux défis de l'identification des sites est de minimiser l'impact environnemental du développement » (p. 20, notre traduction). En appliquant ces filtres stricts dans leur simulation, ils ont fini par éliminer d'office plus de 60 % du territoire étudié. C'est un résultat majeur. Il prouve l'intérêt d'une planification restrictive, ce qui valide notre logique d'exclusion sur Es-Senia.

Dans leur protocole, ils ont aussi testé plusieurs scénarios pour changer la pondération des critères. Leurs calculs montrent un phénomène intéressant : selon les coefficients d'importance choisis, les zones étiquetées comme favorables changent totalement de place (Watson & Hudson, 2015, p. 28). C'est pour cela que faire une analyse de sensibilité est capital pour vérifier si un modèle spatial tient la route. Récemment, Joshi et al. (2025) ont proposé une solution mathématique pour encadrer cette subjectivité humaine. Leur méthode, testée en Inde, applique

un système d'analyse normalisé. Cela permet de rendre les comparaisons par paires beaucoup plus logiques, cohérentes et faciles à reproduire par d'autres chercheurs (p. 567, notre traduction).

En Algérie, l'utilisation des SIG pour la planification solaire reste encore très limitée à l'échelle locale. On trouve facilement des études nationales, des atlas solaires globaux ou des cartes à petite échelle, mais au niveau d'une commune comme Es-Senia, les travaux concrets sont quasi inexistantes. Les bureaux d'études travaillent encore trop souvent site par site, de manière isolée et sans vue d'ensemble. Résultat, les collectivités locales ne disposent d'aucun outil simple pour évaluer le potentiel réel de leur propre territoire. C'est précisément sur ce manque que notre travail veut intervenir.

Malgré leurs atouts évidents, les SIG ont pourtant des limites techniques. Une carte, même très précise, ne donne pas automatiquement le choix du site idéal. Pour y parvenir, il faut croiser plusieurs critères, attribuer des poids et faire des arbitrages entre des objectifs contradictoires. Comme le soulignent Jong et Ahmed (2024), « les SIG seuls ne suffisent pas à résoudre des problèmes de décision complexes impliquant de multiples critères souvent conflictuels » (p. 143460, notre traduction). C'est exactement là que l'analyse multicritère devient indispensable pour débloquer le modèle.

1.3 Limites des travaux existants :

Les études détaillées dans les sections précédentes montrent bien l'intérêt de coupler les outils SIG et l'analyse multicritère pour choisir les sites d'implantation des panneaux photovoltaïques. Les recherches menées par Janke (2010), Watson et Hudson (2015), Joshi et al. (2025) ainsi que Jong et Ahmed (2024) confirment toutes l'apport majeur de ces méthodes pour évaluer un territoire de manière totalement objective. Cependant, plusieurs limites subsistent dans la littérature actuelle.

1.3.1 La subjectivité des pondérations

La subjectivité des pondérations reste un problème majeur. Comme le soulignent Joshi et al. (2025), deux experts confrontés aux mêmes données peuvent attribuer des poids différents aux critères et aboutir à des cartes d'aptitude divergentes (p. 567, notre traduction). L'un peut accorder 40 % d'importance à l'ensoleillement, tandis que l'autre se limitera à 30 %. Ce simple décalage change totalement la localisation finale des zones favorables, alors même que les deux raisonnements sont de bonne foi. Même avec des méthodes structurées comme l'AHP, il n'existe pas de consensus méthodologique absolu. Jong et Ahmed (2024) notent d'ailleurs que chaque étude développe sa propre grille de pondération, ce qui rend les comparaisons directes très difficiles entre les différents travaux (p. 143462, notre traduction).

1.3.2 Le problème de l'échelle

Le problème de l'échelle constitue un autre obstacle majeur. Les études menées par Janke (2010) et Watson et Hudson (2015) se situaient à des échelles typiquement régionales, couvrant le Colorado ou le sud de l'Angleterre. Si ces travaux s'avèrent utiles pour concevoir des stratégies globales, leurs grilles de lecture restent difficilement transférables à l'échelle communale. À Es-Senia, la réflexion doit s'opérer à un niveau beaucoup plus fin, celui de la parcelle, du grand toit d'usine ou du terrain communal. Une carte régionale indiquant qu'une grande zone de plusieurs kilomètres carrés est favorable ne permet pas de savoir si une parcelle précise derrière la mairie est réellement constructible, si elle subit des ombres portées locales, ou si elle empiète sur un sol agricole à protéger. Janke (2010) reconnaît lui-même cette contrainte dans ses conclusions, admettant que les résultats issus de modèles à large spectre sont complexes à transférer à une échelle d'analyse plus fine (p. 2232, notre traduction).

1.3.3 Le contexte algérien

Le contexte algérien présente lui aussi des spécificités uniques. Les travaux internationaux, bien que très solides sur le plan théorique, ne peuvent pas être calqués tels quels sur nos réalités nationales. Les profils thermiques locaux, les caractéristiques d'occupation du sol, la configuration du tissu industriel et les contraintes biophysiques propres à notre territoire diffèrent largement des pays occidentaux ou asiatiques où ces recherches ont été menées.

À l'heure actuelle, aucune étude de ce type, croisant finement les SIG et l'analyse multicritère à l'échelle d'une commune, n'a été publiée pour la région d'Es-Senia. S'il existe des atlas solaires à l'échelle de l'Algérie, leur résolution spatiale reste beaucoup trop grossière qu'une planification locale opérationnelle. Les acteurs de terrain continuent donc de travailler au cas par cas, sans vision globale. C'est précisément ce vide méthodologique local que notre travail cherche à combler.

Positionnement de notre étude

Notre travail ne prétend pas répondre à l'ensemble de ces limites complexes, mais tente d'apporter une contribution concrète structurée à quatre niveaux distincts :

1. La transparence de la subjectivité : L'ensemble des coefficients de pondération appliqués dans la matrice de Saaty seront documentés, justifiés scientifiquement et rendus entièrement transparentes.

2. Le changement d'échelle : L'analyse abandonne les mailles macro-régionales pour se focaliser sur l'échelle communale fine, permettant une évaluation à haute résolution (pixel de 10 mètres), adaptée aux réalités géométriques des parcelles et des grands bâtis industriels.

3. **L'accessibilité de l'information :** Pour dépasser le cadre purement théorique des cartes statiques, les résultats finaux seront intégrés au sein d'un prototype d'interface interactive basé sur une architecture géospatiale en ligne.

4. **La contextualisation locale en Algérie :** La modélisation physique s'applique directement au territoire de la commune d'Es-Senia, en s'appuyant sur des bases de données biophysiques et climatiques réelles pour l'année 2024.

Cette étude se veut une première pierre, à la fois modeste et solide, dans la réflexion scientifique sur l'utilisation conjointe des outils géospatiaux et de l'analyse décisionnelle pour la planification solaire locale en Algérie.

Section 2 : Concept et définition

1- Concept et définition

L'énergie solaire est utilisée essentiellement pour deux usages : la production d'électricité (énergie solaire photovoltaïque ou énergie solaire thermodynamique) ou la production de chaleur (énergie solaire thermique). L'énergie solaire photovoltaïque transforme le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques intégrées à des panneaux qui peuvent être installés sur des bâtiments ou posés sur le sol alors que l'énergie solaire thermodynamique produit de l'électricité via une production de chaleur. L'électricité produite peut être utilisée sur place ou réinjectée dans le réseau de distribution électrique. L'énergie solaire thermique produit de la chaleur qui peut être utilisée pour le chauffage domestique ou la production d'eau chaude sanitaire (Ministère de la Transition écologique, 2018)

2- Énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. La lumière du soleil et le vent, par exemple, constituent de telles sources qui se renouvellent constamment. Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes et sont présentes partout autour de nous (Nations Unies, s.d.) . Contrairement aux énergies fossiles, les énergies renouvelables produisent très peu d'émissions de gaz à effet de serre. Leur déploiement massif est aujourd'hui considéré comme un levier essentiel de la transition énergétique.

3- Potentiel solaire

Le potentiel solaire, ou gisement solaire, désigne la quantité d'énergie solaire qui peut être techniquement captée et convertie en électricité à un endroit donné, en tenant compte des contraintes géographiques et techniques (Angliviél de La Beaumelle, et al., 2023). Cette définition distingue le potentiel de la simple ressource naturelle : il ne s'agit pas seulement de l'énergie solaire disponible, mais de ce qui est réellement exploitable une fois que l'on a pris en compte l'orientation des panneaux, la pente des terrains, l'ombrage, les surfaces disponibles et les zones exclues (forêts, plans d'eau, zones protégées). C'est précisément ce potentiel technique que notre étude cartographie pour la commune d'Es Senia à l'aide des SIG.

4- Facteurs influençant l'implantation des panneaux solaires

Le choix d'un emplacement pour installer des panneaux solaires dépend d'un ensemble de critères physiques, thermiques et environnementaux. Ce sont ces paramètres qui dictent la faisabilité technique et le rendement réel d'un projet photovoltaïque. Pour notre modélisation sur la commune d'Es-Senia, nous avons sélectionné sept variables concrètes, réparties selon les réalités du terrain.

Tout commence par les facteurs climatiques et thermiques. C'est évident, le gisement solaire reste le moteur principal du modèle, puisqu'il mesure la quantité brute de rayonnement reçue sur la zone. Mais la grande originalité de notre étude est d'y ajouter l'impact des températures de l'air et de la surface du sol. Il faut savoir qu'une chaleur excessive au niveau des cellules en silicium provoque une baisse de tension immédiate. Cela dégrade fortement l'efficacité globale des équipements, un phénomène climatique capital à anticiper dans une région chaude comme celle d'Oran.

Viennent ensuite les contraintes liées à la topographie et à la forme du relief. La pente naturelle du sol détermine directement la complexité du chantier de génie civil. Si la déclivité est trop forte, l'installation des structures devient complexe et fait exploser le budget des travaux de terrassement. L'exposition des versants joue un rôle tout aussi crucial : elle détermine l'orientation directe des structures face au soleil. Ne pas prendre en compte ce relief expose le projet à des ombrages portés locaux, créant des masques solaires qui étouffent la production d'énergie sur une parcelle.

Enfin, notre modèle intègre une dimension environnementale forte liée à l'occupation de l'espace. Nous nous appuyons ici sur le type de couverture du sol pour faire des choix d'aménagement durables. Le modèle cible en priorité les sols nus pour implanter de grandes centrales au sol, ou le tissu bâti existant pour développer une production photovoltaïque décentralisée en toiture. À l'inverse, l'indice NDVI et la détection biophysique servent de verrous de sécurité. Ils permettent d'exclure les zones humides inondables du lac Dayat Morsli ou de restreindre l'accès aux parcelles agricoles actives d'Es-Senia pour protéger la sécurité alimentaire locale.

Ces sept facteurs physiques se combinent directement au sein de notre analyse multicritère sous SIG. En cartographiant chaque donnée à haute résolution, nous parvenons à générer une carte d'aptitude finale fiable et réaliste pour l'ensemble du territoire communal.

Section 3 : Cadre juridique et institutionnel des énergies renouvelables en Algérie

3-1- Programme national des énergies renouvelables

Le programme national de développement des énergies renouvelables a été officiellement adopté par le Gouvernement algérien le 3 février 2011 pour couvrir la période 2011-2030 (**Ministère de l'Énergie et des Mines, 2011**). Les ambitions de départ étaient claires : parvenir à produire 40% de l'électricité du pays grâce aux énergies vertes à l'horizon 2030. En parallèle, l'Algérie cherchait à s'imposer comme un fournisseur majeur d'électricité propre sur le marché européen, fixant un objectif d'exportation de 10 000 MW dans le cadre de partenariats internationaux (**Ministère de l'Énergie et des Mines, 2011**).

Ce choix stratégique repose sur l'immense gisement solaire dont dispose le pays, qui constitue logiquement le pilier central de tout le déploiement. Selon la Commission de régulation de l'électricité et du gaz (**CREG**), intégrer massivement les filières vertes dans le mix national répond à des enjeux indispensables pour l'avenir. Il s'agit de préserver nos ressources fossiles, de diversifier les modes de production de courant et de participer activement au développement durable du territoire.

3-2- Contexte et justification

Ce programme national répond avant tout à une urgence énergétique interne. Les projections modélisées en 2011 indiquaient que les besoins du marché national en gaz naturel allaient exploser, prévoyant d'atteindre 54 milliards de m³ en 2020 pour grimper jusqu'à 102 milliards de m³ à l'horizon 2030 (**Ministère de l'Énergie et des Mines, 2011**). Sur la même trajectoire, la consommation nationale d'électricité était estimée à plus de 80 TWh pour l'année 2020, avec une prévision à 150 TWh pour 2030.

Pour faire face à cette demande, le calendrier initial de déploiement avait été structuré en trois grandes phases successives. La première phase, s'étalant de 2011 à 2013, était consacrée à la concrétisation de plusieurs projets pilotes. Elle a été suivie par une deuxième phase entre 2014 et 2015 marquant le début du déploiement opérationnel, ouvrant la voie à une troisième phase de déploiement à grande échelle prévue entre 2016 et 2020 (**Ministère de l'Énergie et des Mines, 2011**).

Cependant, cette feuille de route a dû être profondément révisée par les pouvoirs publics. Comme l'expliquent (**ARGILLOS Amal & BOUBEKEUR Mohammed , 2023**), plusieurs facteurs ont poussé à cette réorientation stratégique : une évaluation plus précise du gisement national, le coût financier encore prohibitif de la filière CSP (solaire thermodynamique), et la mise en place d'une nouvelle réglementation plus incitative pour attirer les investisseurs. Cette

mise à jour s'est concentrée sur le déploiement massif du solaire photovoltaïque et de l'éolien, tout en introduisant de nouvelles filières comme la biomasse, la cogénération et la géothermie. Quant au développement du solaire thermique basse température, il a été officiellement décalé à partir de l'année 2021.

3-3-Objectifs actualisés

La capacité totale à déployer pour le marché intérieur national sur la période allant jusqu'en 2030 est désormais fixée à 22 000 MW, un cap ambitieux dont plus de 4 500 MW devaient être concrétisés dès l'année 2020 (Boubekeur & Argillos, 2023, p. 76). En modifiant ainsi sa feuille de route, l'État affiche des ambitions précises. Ce programme réorienté prévoit en effet que 37 % de la puissance installée globale et 27 % de la production d'électricité finale destinée à la consommation nationale proviennent directement de sources renouvelables à l'horizon 2030 (Djediane Ilham, 2023 – 2024) ;(p .18).

3-4-L'évolution du programme par filière (vision de 2011)

En ce qui concerne le solaire photovoltaïque, la planification initiale établie par les pouvoirs publics tablait sur une montée en puissance progressive (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2011, p. 29). Le calendrier prévoyait d'abord l'installation d'environ 110 MW à l'horizon 2013, avant d'atteindre une capacité d'environ 800 MW de puissance crête (MWp) d'ici 2020. Pour la dernière décennie du programme, entre 2021 et 2030, la feuille de route fixait un rythme de croisière régulier de 200 MWp injectés chaque année sur le réseau national.

Pour la filière du solaire thermique à concentration (CSP), la stratégie de départ s'appuyait sur le lancement de deux projets pilotes dotés de systèmes de stockage, d'une capacité de 150 MW chacun, sur la période 2011-2013. Ce déploiement venait s'ajouter à l'exploitation de la centrale hybride gaz-solaire de Hassi R'Mel, qui produit 150 MW au total, dont 25 MW proviennent directement du champ solaire (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2011, p. 31). Le plan prévoyait ensuite la mise en service de quatre autres centrales CSP avec stockage entre 2016 et 2020 pour environ 1 200 MW, avant de stabiliser le rythme à 500 MW par an jusqu'en 2023, puis 600 MW par an jusqu'en 2030.

Enfin, le secteur éolien a fait ses premiers pas concrets avec l'installation d'une ferme pilote de 10 MW dans la région d'Adrar (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2011, p. 31). Selon les prévisions initiales, cette infrastructure devait être suivie par la construction de deux autres parcs de 20 MW chacun entre 2014 et 2015. Pour la longue période s'étalant de 2016 à 2030, des campagnes de mesures et des études géospatiales approfondies devaient permettre de localiser de nouveaux sites favorables afin d'atteindre, à terme, une puissance éolienne installée de 1 700 MW à travers le pays.

3-5-Ouverture aux investisseurs et retombées socio-économiques

Conformément au cadre réglementaire en vigueur, la concrétisation du programme national des énergies renouvelables n'est pas réservée au seul secteur étatique. Elle est largement ouverte aux investisseurs des secteurs public et privé, qu'ils soient nationaux ou étrangers (Boubekeur & Argillos, 2023, p. 82). Cette ouverture se matérialise par les récentes refontes des attributions institutionnelles fixées par les textes législatifs du secteur, notamment à travers le décret exécutif n° 25-84 (République Algérienne Démocratique et Populaire, 2025)

Les retombées attendues de ce déploiement massif dépassent la simple production de courant et se mesurent à plusieurs niveaux stratégiques pour le pays :

- **La dynamique du marché de l'emploi** : Le développement des infrastructures photovoltaïques génère mécaniquement de nouveaux postes locaux, particulièrement dans les secteurs de l'ingénierie, de l'installation technique et de la maintenance (Boubekeur & Argillos, 2023).
- **L'intégration industrielle** : Favoriser la fabrication locale des équipements, comme les modules ou les structures de support, reste une priorité pour structurer une véritable filière industrielle nationale. (République Algérienne Démocratique et Populaire, 2025)
- **Le transfert technologique** : Le recours aux standards modernes de la télédétection et des énergies propres permet d'acquérir un savoir-faire critique, renforçant les capacités de recherche et le potentiel d'innovation au sein des universités et des centres de recherche algériens. (Journal officiel n°13, 2025, décret 25-84, art. 6)
- **La diversification économique** : Les investissements massifs injectés dans cette filière contribuent à créer de la valeur ajoutée locale, limitant à terme la dépendance historique du budget de l'État aux fluctuations des hydrocarbures. (Journal officiel n°13, 2025, décret 25-85, art. 4.2)
- **La transition environnementale** : Substituer les énergies fossiles par le solaire réduit drastiquement les émissions de gaz à effet de serre (Boubekeur & Argillos, 2023, p. 82 ; Journal officiel n°13, 2025, décret 25-85, art. 4.2). Ce choix s'inscrit directement dans la lutte globale contre le réchauffement climatique et protège les écosystèmes fragiles.

À travers ces différents axes, le programme national ne se résume pas à un simple catalogue d'objectifs énergétiques quantitatifs. Il s'intègre au contraire dans une vision à long terme visant la transformation économique et le développement durable de l'Algérie.

3-6- Textes législatifs et réglementaires

Le cadre juridique algérien pour les énergies renouvelables s'est construit progressivement à travers plusieurs textes législatifs et réglementaires.

Loi n° 99-09 relative à la maîtrise de l'énergie

Promulguée le 28 juillet 1999, cette loi définit la politique nationale de maîtrise de l'énergie. Elle aborde clairement les énergies renouvelables à l'article 4, en précisant que « le développement des énergies renouvelables passe par l'introduction et la promotion de filières de conversion énergétique » exploitables, notamment l'énergie solaire, la biomasse, l'hydroélectricité et l'énergie éolienne (Djediane Ilham, 2023 – 2024), p.8). Elle vise à rationaliser l'utilisation des énergies et à réduire l'impact du système énergétique sur l'environnement.

Loi n° 02-01 relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisations

Datée du 5 février 2002, cette loi fixe les règles de production, de transport et de distribution de l'électricité, y compris celle d'origine renouvelable. Elle définit également les missions des différents opérateurs du secteur (Djediane Ilham, 2024 , p.9-10).

Loi n° 04-09 relative à la promotion des énergies renouvelables

Promulguée le 14 août 2004, cette loi définit explicitement les énergies renouvelables à l'article 3 comme :

- les formes d'énergie électrique, cinétique, thermique ou gazeuse obtenues à partir de la conversion du rayonnement solaire, de l'énergie éolienne, de la chaleur géothermique, des déchets organiques, de l'énergie hydraulique et de la biomasse ;
- l'ensemble des méthodes permettant de réaliser d'importantes économies d'énergie en recourant aux techniques du génie bioclimatique dans les processus de construction (Djediane, 2024 , p.9).

Cette loi prévoit également l'élaboration d'un programme national de promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable, ainsi que la création d'un «Observatoire national pour la promotion des énergies renouvelables» (Djediane, 2024, p.10).

Décrets exécutifs récents

Le cadre réglementaire a été récemment actualisé par deux décrets majeurs publiés au Journal officiel n°13 du 25 février 2025 (Journal officiel n°13, 2025) :

- Le **décret exécutif n° 25-84** fixe les attributions du ministre de l'Énergie, des Mines et des Énergies renouvelables. Il redéfinit ses missions dans le domaine des énergies nouvelles et renouvelables, de la maîtrise de l'énergie et de l'hydrogène, et abroge les dispositions du décret exécutif n° 21-239 du 31 mai 2021.
- Le **décret exécutif n°25-85** porte organisation de l'administration centrale du ministère. Il crée notamment une direction générale des énergies nouvelles et renouvelables, de la maîtrise de l'énergie et de l'hydrogène, structurée en plusieurs directions spécialisées (énergies renouvelables, maîtrise de l'énergie, énergies nouvelles et hydrogène).

3-7-Mécanismes de soutien

Le cadre juridique prévoit plusieurs mécanismes incitatifs pour encourager les investissements dans les énergies renouvelables :

Le Fonds National pour la Maîtrise de l'Energie, pour les Energies Renouvelables et la Cogénération (FNMEERC), créé sous le numéro de compte CAS 302-131. Il est alimenté annuellement par 1% de la redevance pétrolière et par le produit de certaines taxes, dont 55% de la taxe sur les activités de torchage (Boubekeur & Argillos, 2023, p. 77).

Le système des tarifs d'achat garantis (Feed-in Tarif), mis en place en 2013 lors de la première phase du programme. Ce système garantit aux producteurs d'énergie renouvelable des tarifs leur octroyant une rentabilité raisonnable sur une durée d'éligibilité de 20 ans, les surcoûts étant supportés par le FNMEERC (Boubekeur & Argillos, 2023, p. 77).

Des mesures d'accompagnement telles que l'acquisition et la mise à disposition de terrains éligibles, l'accompagnement dans les procédures d'autorisation, l'identification du potentiel des régions, la réalisation de projets pilotes, et la création d'organismes de contrôle et d'homologation (Boubekeur & Argillos, 2023, p. 77-78).

3-8-Acteurs institutionnels

Plusieurs institutions publiques et parapubliques jouent un rôle clé dans la mise en œuvre de la politique énergétique algérienne.

Ministère de l'Énergie, des Mines et des Énergies renouvelables Il est chargé de l'élaboration et de la mise en œuvre de la politique nationale en matière d'énergies renouvelables. Ses attributions ont été récemment redéfinies par le décret exécutif n° 25-84 du 20 février 2025 (JOURNAL OFFICIEL, 2025).

Il assure la tutelle des autres acteurs du secteur. Son organisation centrale, fixée par le décret exécutif n° 25-85, comprend notamment une direction générale des énergies nouvelles et renouvelables, de la maîtrise de l'énergie et de l'hydrogène (JOURNAL OFFICIEL, 2025)

Groupe Sonelgaz

Entreprise publique chargée de la production, du transport et de la distribution de l'électricité et du gaz. Pionnier dans le domaine solaire dès les années 1980, Sonelgaz a approvisionné 18 villages isolés du Sud en énergie solaire entre 1998 et 2001 (SER, 2024)

Sa filiale **Sonelgaz Énergies Renouvelables (SER)**, créée spécifiquement pour ce secteur, exploite actuellement 30 centrales renouvelables (29 photovoltaïques, 1 éolienne) pour une capacité installée de 393,3 MW (383,1 MW PV + 10,2 MW éolien) et une production annuelle de 600,92 GWh en 2024 (SER, 2024).

SER est également en charge de la réalisation de 21 nouvelles centrales solaires photovoltaïques d'une puissance unitaire variant entre 80 et 220 MWc, pour une puissance totale de 3 200 MWc, actuellement en phase de réalisation (SER, 2024). Dans la stratégie nationale, Sonelgaz prévoit de réaliser environ 30 % du programme national, soit 4 000 MWc en photovoltaïque (Groupe Sonelgaz, 2020).

Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER)

Créé le 22 mars 1988, c'est un établissement public à caractère scientifique et technologique chargé de la recherche et du développement dans les filières solaire, éolienne et géothermique (Boubekour & Argillos, 2023, p. 78). Il comprend trois unités de recherche spécialisées (Boubekour & Argillos, 2023, p. 78) :

- **UDES** : Unité de Développement des Equipements Solaires
- **URAER** : Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables
- **URERMS** : Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien

Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz (CREG)

Autorité de régulation chargée de (Boubekeur & Argillos, 2023, p. 78) :

- La réalisation et du contrôle du service public
- Le conseil auprès des pouvoirs publics concernant le marché de l'électricité et du gaz
- la surveillance et du contrôle du respect des lois et règlements relatifs au marché

Autres acteurs institutionnels

D'autres institutions contribuent également au développement du secteur (Boubekeur & Argillos, 2023, p. 78) :

- Le Centre de Recherche et de Développement de l'Électricité et du Gaz (CREDEG) , filiale de Sonelgaz dotée de laboratoires de recherche sur le photovoltaïque.
- Le Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Énergétique (CRTSE) , spécialisé dans les matériaux de conversion énergétique.
- L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) , qui met en œuvre les programmes d'efficacité énergétique et soutient les projets d'énergies renouvelables.

Conclusion:

Ce premier chapitre nous a permis de poser des bases claires pour notre étude. En observant la littérature scientifique, on comprend vite comment la recherche de terrains solaires a évolué. Cela met en évidence le grand saut technologique apporté par les outils cartographiques par rapport aux vieilles méthodes intuitives. Définir des notions clés, comme la différence entre la simple lumière du soleil et le potentiel technique exploitable, était indispensable. Ce tri nous permet de mieux classer les critères physiques, thermiques et environnementaux qui font la réussite d'un projet photovoltaïque. Enfin, faire le point sur les lois et les institutions en Algérie montre une vraie volonté politique de développer les énergies propres, mais révèle aussi un grand manque d'études précises au niveau des communes.

Tout ce parcours théorique forme le point de départ de notre travail. Ces éléments justifient directement les choix techniques que nous allons appliquer dans la suite du mémoire. Le deuxième chapitre va donc se concentrer sur notre méthodologie géomatique. Nous y détaillerons le fonctionnement de l'analyse spatiale, les règles de calcul de la méthode AHP pour peser chaque critère, et les étapes informatiques nécessaires pour faire ressortir les **zones propices** sur le territoire d'Es-Senia.

**CHAPITRE 02 : Fondements géomatiques, analyse
multicritère AHP et architecture WebGIS**

Chapitre 02 : Fondements géomatiques, analyse multicritère AHP et architecture WebGIS

Introduction:

La réussite d'une modélisation spatiale multicritère repose avant tout sur la maîtrise rigoureuse des outils et des concepts qui la sous-tendent. Avant d'appliquer notre démarche géomatique au territoire d'Es-Senia, il est indispensable d'en établir les fondements théoriques et techniques avec précision.

Ce deuxième chapitre dresse un inventaire complet de notre cadre méthodologique et des outils mobilisés tout au long de cette recherche. Pour cela, le développement s'articule autour de trois axes complémentaires. Nous abordons d'abord les Systèmes d'Information Géographique en passant en revue leur définition, leurs composantes fondamentales, leurs formats de données et leurs principales fonctionnalités d'analyse spatiale.

Ensuite, nous exposons la méthode d'analyse multicritère AHP développée par Saaty. Cette partie détaille sa structure hiérarchique, le mécanisme des comparaisons par paires, le calcul des poids et le contrôle de stabilité via le ratio de cohérence (RC), avant de montrer comment ce modèle s'intègre directement dans un environnement SIG pour aboutir à une carte d'aptitude finale. Enfin, le dernier axe introduit les concepts de l'architecture WebGIS. Nous y expliquons la logique client-serveur, les protocoles OGC standardisés et les apports stratégiques d'un tel dispositif pour la gouvernance locale et la prise de décision partagée.

L'ensemble de ce cadre constitue la boîte à outils théorique et opérationnelle sur laquelle repose intégralement le travail pratique développé dans le chapitre suivant.

Section 01: Les Systèmes d'Information Géographique (SIG)

1-1-Définition du SIG

Selon la définition officielle d'Esri, référence mondiale dans le domaine des systèmes d'information géographique, le SIG est « *une technologie utilisée pour créer, gérer, analyser et cartographier tous types de données* » [Esri, 2026]. Le SIG connecte les données à une carte en intégrant deux composantes essentielles : la composante spatiale (localisation des objets) et la composante attributaire (informations descriptives). Cette intégration permet de comprendre les modèles spatiaux, les relations entre les objets géographiques et le contexte territorial (Esri, s.d.)

1-2-Les composants d'un SIG

Un système d'information géographique est constitué de **cinq composants majeurs** [(Meghouache), p. 12-13] :

- **Les logiciels** : ils assurent les fonctions d'acquisition, de gestion, d'analyse et de visualisation des données.
- **Les données** : elles constituent le cœur du SIG, qu'elles soient vectorielles ou raster.
- **Les matériels informatiques** : ordinateurs, serveurs, GPS, etc.
- **Les savoir-faire** : connaissances techniques et méthodologiques nécessaires pour exploiter le système.
- **Les utilisateurs** : personnes qui interagissent avec le système et l'utilisent pour prendre des décisions.



Figure 2: les Composantes d'un SIG ((Lamia, 2021) , p28)

1-3-Les deux formats de données

L'information géographique est représentée en deux formats : format vecteur et format raster

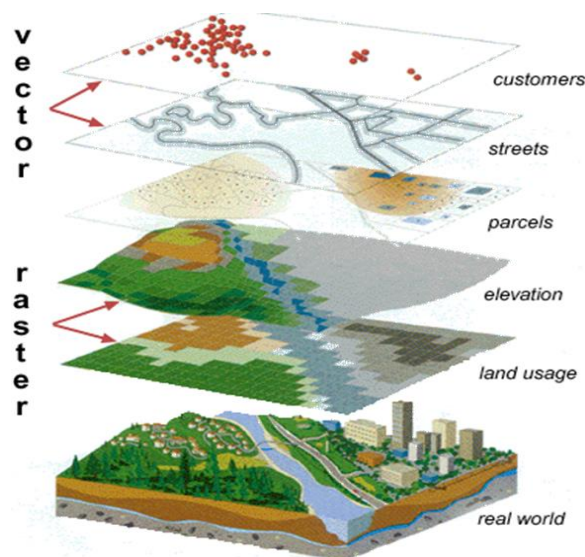


Figure 3: Le format vecteur et le format Raster de L'information géographique (Lamia, 2021) , p32)

Format vecteur

Les données vecteur représentent les véritables caractéristiques du monde sous forme de points, lignes ou polygones [(Sylvie Bernier, Sylvie Duthoit, Sylvie Ladet, & Denis Baudet, 2014), **p. 21**] . Chaque objet graphique est relié à une table attributaire contenant des informations descriptives (nom, surface, type, etc.) [**Meghouache, s.d., p. 21**] .

Points : représentent des objets localisés ponctuellement (arbres, points de prélèvement, puits)

Lignes : représentent des objets linéaires (routes, cours d'eau, réseaux électriques)

Polygones : représentent des surfaces (parcelles, bâtiments, zones d'étude)

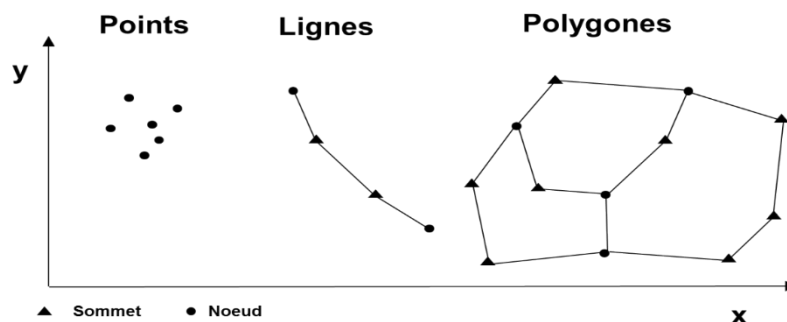


Figure 4: Les trois grandes formes géométriques ((Lamia, 2021) , p33)

Format raster

Les données raster correspondent à une matrice de pixels ou cellules organisées en lignes et colonnes [**Meghouache, s.d., p. 23**] . Chaque pixel possède une valeur qui traduit une couleur ou une information thématique (altitude, température, occupation du sol) [(Sylvie Bernier, Sylvie Duthoit, Sylvie Ladet, & Denis Baudet, 2014), **p. 20**] . La résolution spatiale (taille du pixel) conditionne le niveau de détail visible.

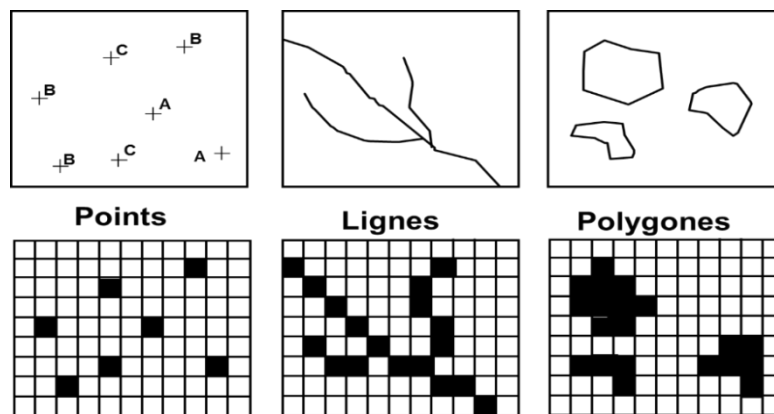


Figure5: Le formats raster ((Lamia, 2021), p 33)

1-4-Organisation en couches

L'information géographique est organisée en **couches thématiques superposables** [(Sylvie Bernier, Sylvie Duthoit, Sylvie Ladet, & Denis Baudet, 2014), **p. 21**] . Chaque couche représente un thème spécifique : réseau hydrographique, réseau routier, parcelles agricoles, occupation du sol, images satellites, etc.

"Chaque couche au format vecteur est modélisée sous forme d'une double composante : une composante graphique et une composante descriptive dite attributaire." [Meghouache, s.d., p. 21]

1-5-Système de coordonnées et projections

Pour que toutes les données soient superposables et analysées ensemble, elles doivent appartenir à un **système de coordonnées** commun [(Sylvie Bernier, Sylvie Duthoit, Sylvie Ladet, & Denis Baudet, 2014) **p. 22**] .

- **Système de coordonnées géographiques** : exprime la position en **degrés** (longitude, latitude)
- **Système de coordonnées projetées** : exprime la position en **mètres** après projection de la surface sphérique de la Terre sur un plan [Meghouache, s.d., **p. 33**]

Le choix du système de projection est essentiel pour minimiser les déformations et dépend de la zone géographique étudiée [(Sylvie Bernier, Sylvie Duthoit, Sylvie Ladet, & Denis Baudet, 2014), **p. 22**] .

1-6-Les principales fonctionnalités des SIG

Les SIG offrent de nombreuses fonctionnalités qui peuvent être regroupées en quatre catégories principales [Esri, 2026] :

Gestion des données

Les SIG permettent de **stocker et intégrer** des informations provenant de sources diverses : données GPS, images satellites, photographies aériennes, relevés terrain, bases de données existantes [(Sylvie Bernier, Sylvie Duthoit, Sylvie Ladet, & Denis Baudet, 2014), **p. 19**] .

Cartographie et visualisation

Les SIG permettent de créer des **cartes thématiques**, des tableaux de bord et des visualisations 2D/3D pour représenter l'information spatiale [Esri, 2026] .

Analyse spatiale

Les SIG offrent des outils d'analyse puissants [(Sylvie Bernier, Sylvie Duthoit, Sylvie Ladet, & Denis Baudet, 2014) **p. 23-25**] :

- **Requêtes attributaires** : sélection d'objets en fonction de critères sur leurs attributs
- **Requêtes spatiales** : sélection d'objets en fonction de leur localisation par rapport à d'autres objets
- **Création de zones tampon (buffer)** : zones d'influence autour d'objets
- **Croisement de couches** : superposition et intersection pour créer de nouvelles informations
- **Calcul de superficies** et de distances

Communication et partage

Les SIG facilitent la **communication** d'informations complexes à travers des cartes et des rapports, et permettent le **partage de données** via des plateformes en ligne [Esri, 2026]

Section 02 : L'analyse multicritère et la méthode AHP

2-1 Analyse spatiale et analyse multicritère

L'analyse spatiale est l'une des fonctionnalités les plus puissantes des SIG. Elle permet d'étudier la localisation, la distribution et les relations entre les phénomènes géographiques [(Sylvie Bernier, Sylvie Duthoit, Sylvie Ladet, & Denis Baudet, 2014)] . Cependant, lorsque plusieurs critères doivent être pris en compte simultanément, l'analyse spatiale seule ne suffit pas. C'est là qu'intervient **l'analyse multicritère**.

L'analyse multicritère (AMC) est une méthode qui permet d'évaluer et de comparer plusieurs options en fonction de critères parfois contradictoires (Vincke Phillipe, 1989) . Dans le domaine spatial, elle est utilisée pour combiner des facteurs physiques, techniques, environnementaux et socio-économiques afin de produire des cartes d'aptitude (Jacek Malczewski, 1999) .

2-1-Principe de l'analyse multicritère (Malczewski, 1999)

L'analyse multicritère repose sur l'idée qu'il n'existe pas de solution unique optimale, mais plutôt un ensemble de solutions de compromis. Elle permet d'intégrer des préférences subjectives dans un processus objectif de prise de décision.

Dans un contexte spatial, l'AMC consiste à :

- Identifier les critères pertinents
- Normaliser les évaluations
- Pondérer les critères selon leur importance
- Agréger les couches d'information pour produire une carte finale d'aptitude.

2-3-La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)

La méthode **AHP** (Analytic Hierarchy Process) a été développée par Thomas Saaty dans les années 1970. C'est une approche analytique multicritère qui permet de décomposer un problème complexe en une structure hiérarchique, pour ensuite le traiter à l'aide de comparaisons par paires

a. Structure hiérarchique

La première étape consiste à organiser le problème en plusieurs niveaux (Akhrouf & Derghoum, 2022) :

- **Niveau 0** : L'objectif global (ex: sélectionner les meilleurs sites pour des panneaux solaires)
- **Niveau 1** : Les critères principaux (ex: ensoleillement, pente, proximité du réseau)
- **Niveau 2** : Les sous-critères (si nécessaire)
- **Niveau 3** : Les alternatives (les sites potentiels)

b. Comparaison par paires et échelle de Saaty

Pour chaque niveau de la hiérarchie, on compare les éléments deux à deux en utilisant l'échelle de Saaty (Tahar & Fares).

Tableau 1: échelle de Saaty [(Tahar & Fares) , p231.]

Degré d'importance	Définition
1	Importance égale
3	Importance modérée
5	Importance forte
7	Importance très forte
9	Importance absolue
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires

Les résultats sont organisés dans une **matrice de comparaison** où chaque élément « a_{ij} » représente l'importance relative de l'élément i par rapport à l'élément « j » (El Amraoui Sidi Mohamed, Rouchdi Mohamed, Mourad Bouziani, & El Idrissi Abdelwahed, May 2017) . Cette matrice est carrée et possède la propriété que « $a_{ji} = 1/a_{ij}$ » .

2-4-Calcul des priorités (vecteur propre)

À partir de la matrice de comparaison, on calcule le **vecteur propre** qui représente les poids relatifs des critères (Lamia, 2021). La procédure est la suivante :

1. **Normalisation** : chaque élément de la matrice est divisé par la somme des éléments de sa colonne

2. **Calcul de la moyenne** de chaque ligne : la moyenne des éléments normalisés d'une ligne donne le poids (priorité) de l'élément correspondant

La somme de tous les poids est égale à 1, ce qui permet de les interpréter comme des pourcentages d'importance relative.

2-5-Vérification de la cohérence (RC)

La méthode AHP permet de vérifier la cohérence des jugements à travers le **ratio de cohérence (RC)** [Akhrouf & Derghoum, 2022] . Ce ratio est calculé à partir de :

- **L'indice de cohérence (IC)** :

Équation 1 : $IC = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$, où λ_{max} est la valeur propre maximale de la matrice de comparaison et n le nombre d'éléments comparés

- **L'indice aléatoire (IA)** : un indice théorique dépendant de la dimension de la matrice, déterminé par simulation sur des matrices remplies au hasard

Le ratio de cohérence est donné par :

Équation 2 $RC = IC / IA$

Les valeurs de l'indice aléatoire (IA) pour différentes dimensions de matrice sont les suivantes (Saaty, 1980).

Tableau 2 : Indices aléatoires (IA) en fonction du nombre de critères (Saaty, 1980)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Si $RC \leq 0.10$, les jugements sont considérés cohérents et les poids peuvent être utilisés en toute confiance [Lahrache & Khedache, s.d.] . Si $RC > 0.10$, cela indique une incohérence trop importante ; les comparaisons doivent être révisées.

2-6-Agrégation et synthèse finale

Une fois les poids déterminés, on les combine avec les évaluations des alternatives pour obtenir un score global pour chaque option (**Habes, 2021**) :

Équation 3 : Fonction d'agrégation multicritère par somme pondérée issue de la méthode AHP.

$$V_i = \sum_{j=1}^n (w_j \cdot a_{ij})$$

où

V_i : est la valeur globale de l'alternative i,

w_j : est le poids du critère j,

a_{ij} : est l'évaluation de l'alternative i par rapport au critère j.

Dans notre étude, $n=7$ (ensoleillement, pente, Température de l'air, Température du sol, Exposition des versants, NDVI, occupation du sol).

2-7-Intégration de l'AHP dans les SIG

L'intégration de l'AHP dans les SIG permet de bénéficier à la fois des capacités d'analyse spatiale et de la rigueur mathématique de l'analyse multicritère (Chakar, 2007). Plusieurs logiciels supportent cette intégration :

- **ArcGIS** propose l'outil **Attribuer des pondérations via une comparaison par paires**, qui implémente directement la méthode AHP et calcule les pondérations à partir de comparaisons par paires. L'outil génère une matrice de comparaison et vérifie la cohérence des jugements à travers le ratio de cohérence [Esri, 2025] .
- **QGIS** dispose du plugin **EasyAHP** qui permet de construire la matrice de comparaison, de calculer les poids et de vérifier la cohérence, puis d'utiliser ces poids dans une combinaison linéaire pondérée via la calculatrice raster [Habes Siradj, 2021] .
- **IDRISI** offre un module MCE (Multi-Criteria Evaluation) qui intègre plusieurs méthodes d'analyse multicritère, dont l'AHP et la combinaison linéaire pondérée.
- **ExpertChoice** et **SuperDecisions** sont des logiciels spécialisés pour l'analyse AHP pure, qui peuvent être utilisés en amont pour calculer les poids avant de les intégrer dans un SIG [Akhrouf & Derghoum, 2022] .

2-8-Application dans notre étude

Dans notre travail sur la commune d'Es-Senia, nous utiliserons la méthode AHP pour pondérer les facteurs identifiés dans le Chapitre 1 : ensoleillement, pente, Exposition des versants, Température de l'air, NDVI, Température du sol et occupation du sol. Ces poids seront intégrés dans une combinaison linéaire pondérée sous SIG pour produire une carte d'aptitude du territoire communal.

La vérification de la cohérence des jugements ($RC < 0,10$) garantira la fiabilité des pondérations adoptées. Cette approche nous permettra d'identifier objectivement les zones les plus favorables à l'implantation de panneaux solaires à Es-Senia, en tenant compte de l'ensemble des critères pertinents.

2-9-Relation entre les SIG et la planification des projets solaires

Cartographie du rayonnement et des variables climatiques

L'apport premier des outils géospatiaux réside dans la capacité à quantifier, localiser et modéliser précisément le potentiel solaire à l'échelle fine d'un territoire. Au-delà d'une simple approximation régionale, le croisement de données de rayonnement (GHI) issues de plateformes spécialisées comme SODA avec des variables climatiques (telles que la température de l'air extraite via WorldClim) permet de cartographier la ressource disponible sur chaque unité spatiale de la commune d'Es-Senia. L'ensoleillement constitue la variable maîtresse de l'étude : l'identification rigoureuse des zones à fort rayonnement s'avère indispensable pour garantir la viabilité économique et la productivité future de toute installation photovoltaïque.

Analyse des contraintes topographiques et environnementales

L'évaluation du potentiel solaire ne peut s'affranchir des réalités physiques du terrain. Un espace fortement ensoleillé peut se révéler inexploitable si sa configuration topographique s'avère trop complexe. À l'aide du modèle numérique de terrain (MNT), deux indicateurs morphologiques fondamentaux sont extraits :

- **La déclivité de la pente** : Les reliefs trop accidentés compliquent l'installation des structures et augmentent drastiquement les coûts de génie civil. Les secteurs présentant des pentes supérieures à 10-15 % sont ainsi écartés du modèle d'aptitude.
- **L'exposition des versants (Aspect)** : Dans l'hémisphère nord, l'orientation plein Sud reste prioritaire pour maximiser la capture du rayonnement solaire tout au long de l'année.

À ces contraintes physiques s'ajoute l'analyse environnementale menée via Google Earth Engine, notamment à travers le calcul du NDVI (indice de végétation) issu d'images Sentinel-2 et de la température de surface du sol (LST) issue de Landsat. Ces couches permettent de filtrer finement les espaces naturels sensibles ou les zones à forte densité végétale à préserver.

Génération des modèles d'aptitude spatiale

Une fois l'intégralité des critères préparée (ensoleillement, pente, orientation, températures, NDVI et occupation du sol), le processus de convergence s'opère au sein d'ArcMap 10.8.1. C'est à ce niveau qu'intervient l'extension extAHP 2.0. Chaque paramètre reçoit un coefficient d'importance relative dicté par la matrice de comparaison par paires. Par le biais d'une intégration combinatoire, le système génère une carte finale d'aptitude. Chaque pixel de la commune d'Es-Senia se voit attribuer une valeur numérique traduisant son niveau de favorabilité, permettant ainsi de hiérarchiser objectivement le territoire.

Outil d'aide à la décision pour la gouvernance locale

L'intérêt majeur de cette modélisation réside dans sa dimension opérationnelle pour les gestionnaires du territoire. Plutôt que de fournir une cartographie descriptive figée, cette approche dote les décideurs locaux d'un véritable outil d'aide à la décision. Un aménageur ou un investisseur peut ainsi visualiser instantanément les zones à fort potentiel, appréhender les facteurs limitants d'un site (pente excessive, contrainte d'occupation du sol) et appuyer ses choix stratégiques sur des indicateurs mathématiques transparents et reproductibles.

Section 03 : Architecture WebGIS et plateformes géospatiales en ligne

3-1-Définition et architecture du WebGIS

Le WebGIS s'inscrit comme une évolution des Systèmes d'Information Géographique conventionnels. Son rôle consiste à déporter les fonctions de diffusion, de visualisation et de requêtage des entités spatiales directement sur un navigateur web. Contrairement aux outils SIG de bureau qui imposent une installation locale lourde et de réelles compétences techniques, cette approche ouvre l'accès à la donnée cartographique sans exiger de logiciel dédié.

Sur le plan technique, un environnement WebGIS s'appuie sur une architecture client-serveur classique :

- **Le pôle serveur** centralise le stockage des couches géographiques, héberge les projets cartographiques et traite les flux de données (à l'image de GeoServer).
- **Le pôle client**, matérialisé par le navigateur web de l'utilisateur, formule les requêtes et affiche dynamiquement le rendu sous forme de cartes interactives.

Les flux d'informations transitent par des protocoles standardisés dictés par l'OGC, notamment le flux WMS (*Web Map Service*) pour l'affichage d'images matricielles ou le flux WFS (*Web Feature Service*) pour l'interrogation des objets vectoriels.

Tableau 3 : Comparaison structurelle entre les solutions SIG de bureau et les architectures

Axe de comparaison	Pratique sur SIG classique	Déploiement en environnement WebGIS
Contrainte matérielle	Obligation d'installer un logiciel lourd (type ArcMap ou QGIS).	Aucun déploiement requis, simple accès via un navigateur web.
Cible et utilisateurs	Profils techniques, ingénieurs et experts de la géomatique.	Grand public, investisseurs, décideurs locaux et élus.
Hébergement des couches	Fichiers stockés en local sur disque ou sur un serveur privé.	Centralisation intégrale des données sur un serveur cloud distant.
Gestion des mises à jour	Manipulation manuelle par l'opérateur sur son poste de travail.	Actualisation centralisée à la source et répercutée en temps réel.
Protocole de partage	Transfert lourd et physique de fichiers (Shapefiles, GeoTIFF).	Diffusion instantanée et simplifiée par l'envoi d'un lien URL.
Niveau d'interactivité	Traitements et modélisations analytiques lourdes et complexes.	Requêtage ciblé et fonctionnalités optimisées pour l'aide à la décision.

3-2-Différence entre SIG classique et WebGIS

Le WebGIS ne remplace pas le SIG classique, il le complète. Le SIG sert à construire et analyser les données ; le WebGIS sert à les partager et les rendre accessibles.

3-3-Avantages du WebGIS

L'implémentation d'une infrastructure WebGIS offre des bénéfices concrets par rapport aux méthodes de diffusion cartographiques figées. Ces avantages s'articulent autour de trois axes principaux :

- **L'universalité de l'accès** : L'accès à l'information géographique est entièrement affranchi des contraintes matérielles ou logicielles. N'importe quel acteur équipé d'un terminal connecté à Internet peut consulter les couches d'aptitude. Aucune formation technique préalable n'est requise pour manipuler l'interface.
- **La centralisation et l'intégrité des flux** : L'hébergement des rasters et des vecteurs sur un serveur unique écarte définitivement les risques de désynchronisation des données. Les transferts de fichiers lourds par courriel deviennent obsolètes. Chaque modification ou correction appliquée sur le serveur est immédiatement répercutée pour l'ensemble des utilisateurs.
- **L'interactivité et l'aide à la décision en temps réel** : La plateforme dépasse le cadre de la simple consultation passive. L'utilisateur interagit de manière dynamique avec l'espace cartographique : exécution de zooms, requêtes attributaires par simple clic sur les parcelles d'Es-Senia, masquage thématique des critères d'aptitude ou encore ajustement dynamique des paramètres de filtrage pour simuler différents scénarios d'aménagement.

3-4-Enjeux stratégiques pour la gouvernance de la commune d'Es-Senia

L'implémentation d'une plateforme WebGIS offre des retombées opérationnelles directes pour la gestion territoriale d'une collectivité locale comme la commune d'Es-Senia. Ces apports se manifestent à travers quatre dynamiques clés :

- **Planification urbaine et transition énergétique** : Les décideurs locaux et les services techniques municipaux disposent d'un outil visuel immédiat pour localiser les gisements solaires optimaux. Cela permet d'orienter les choix d'aménagement sans imposer la maîtrise préalable d'un logiciel SIG d'ingénierie complexe.
- **Transparence et concertation citoyenne** : La mise en ligne d'une interface interactive accessible au public centralise la diffusion des zones d'aptitude photovoltaïque et des périmètres de contraintes environnementales. Cette démarche renforce l'acceptabilité sociale des futurs chantiers énergétiques au sein de la commune.
- **Arbitrage et aide à la décision partagée** : La centralisation web crée un espace de dialogue unifié entre les différents acteurs du projet, notamment la municipalité, les bureaux d'études et les investisseurs. Tous convergent autour d'une cartographie unique, à jour et exempte de divergences d'interprétation.

- **Évolutivité et actualisation continue du modèle** : L'environnement territorial d'Es-Senia demeure dynamique, marqué par de nouvelles constructions ou des mutations d'occupation du sol. L'architecture WebGIS permet de mettre à jour ces bases de données de façon centralisée afin de pérenniser la pertinence des simulations cartographiques.

3-5-Positionnement et objectifs de l'application développée

Dans le cadre de ce travail de recherche, la démarche a abouti au développement d'un prototype de plateforme WebGIS centré sur le territoire de la commune d'Es-Senia. Cette interface applicative a été conçue pour répondre à quatre objectifs opérationnels immédiats :

- **La visualisation dynamique** : restituer de manière claire les cartes d'aptitude spatiale générées en amont, en sectorisant explicitement les parcelles selon leur niveau de formabilité (zones optimales, modérées ou défavorables).

- **La transparence méthodologique** : permettre à l'utilisateur de consulter l'ensemble des critères biophysiques retenus ainsi que la configuration des poids issue du processus AHP.

- **La simulation interactive** : offrir la possibilité d'ajuster en temps réel les coefficients d'importance des critères via l'interface web, afin de tester instantanément différents scénarios d'aménagement énergétique.

- **La restitution d'informations** : générer des rapports de synthèse et des bilans d'aptitude sur les entités spatiales interrogées.

Il convient de souligner que cette plateforme ne constitue pas un outil de production industrielle figé, mais s'inscrit rigoureusement comme une **preuve de concept**.

Ce prototype démontre la faisabilité technique et l'intérêt stratégique d'un tel dispositif si les collectivités locales décidaient de généraliser ces architectures. L'ambition fondamentale de ce développement consiste à mettre l'ingénierie géomatique au service direct de la décision locale, à travers une interface accessible, transparente et épurée de toute complexité logicielle.

Conclusion

Ce deuxième chapitre a permis d'établir l'ensemble des fondements théoriques et méthodologiques indispensables à la réalisation de notre étude. En premier lieu, la définition des Systèmes d'Information Géographique a mis en lumière les mécanismes de structuration et de traitement des données spatiales. Par la suite, l'exploration de l'analyse multicritère a justifié l'adoption de la méthode AHP pour modéliser de façon rigoureuse la pondération de nos critères, tout en garantissant la cohérence statistique des arbitrages décisionnels via le calcul du ratio de cohérence.

Ce cadre d'analyse s'appuie opérationnellement sur une chaîne d'outils complémentaires : la plateforme Google Earth Engine pour le traitement d'images satellitaires en nuage, couplée au logiciel de bureau ArcMap 10.8.1 et son extension extAHP 2.0 pour la phase d'intégration locale. Les données mobilisées, extraites de catalogues d'autorité tels que Copernicus Sentinel-2, Landsat ou WorldClim, forment la base d'évaluation de nos indicateurs géospatiaux.

Enfin, l'introduction des concepts de l'architecture WebGIS a ouvert la voie à la valorisation de ces simulations. En déportant la consultation et le requêtage interactif des résultats directement sur un navigateur web, cette technologie transforme la donnée cartographique brute en un outil d'aide à la décision partagée, accessible aux acteurs territoriaux de la commune d'Es-Senia. L'ensemble de ces piliers méthodologiques sera mis en œuvre de manière concrète dans le chapitre suivant dédié à la phase d'application pratique.

CHAPITRE 03 : Étude pratique —
Modélisation spatiale, analyse multicritère
et déploiement du WebGIS SolarGIS

Chapitre 3 : Étude pratique — Modélisation spatiale, analyse multicritère et déploiement du WebGIS SolarGIS

Introduction :

Ce troisième chapitre constitue le cœur opérationnel de notre travail de recherche. Après avoir posé les fondements théoriques et conceptuels de l'analyse spatiale et de l'énergie solaire dans les chapitres précédents, il s'agit à présent de déployer concrètement notre démarche méthodologique sur le territoire de la commune d'Es-Senia.

Notre démarche vise à évaluer, de manière quantitative et spatialement explicite, le potentiel photovoltaïque de la commune. En parallèle, elle intègre une analyse des interactions thermiques locales comme critère environnemental complémentaire.

L'articulation du chapitre repose sur un enchaînement de trois sections progressives. Nous ouvrons d'abord le sujet par une présentation géographique, démographique et topographique de notre territoire d'étude, suivie par l'inventaire des données spatiales et de l'ensemble des outils mobilisés.

Le cœur analytique du travail se déploie ensuite dans la deuxième section. C'est ici que sont détaillés l'extraction et le traitement géospatial des sept critères physiques, environnementaux et climatiques retenus. Cette phase englobe leur intégration dans le modèle d'analyse multicritère AHP de Saaty pour aboutir à la production de la carte finale d'aptitude solaire, sans oublier l'analyse environnementale complémentaire centrée sur les îlots de chaleur urbains et la corrélation NDVI/UHI.

Pour clore ce chapitre, la troisième section expose l'architecture technique ainsi que les fonctionnalités de la plateforme WebGIS SolarGIS, conçue comme un prototype d'outil d'aide à la décision pour piloter la planification énergétique locale.

À travers cette structure, ce chapitre ambitionne de démontrer comment l'interopérabilité entre le calcul cloud sous Google Earth Engine et la puissance d'analyse spatiale d'ArcGIS permet de transformer la donnée satellitaire brute en un véritable outil de gouvernance énergétique territoriale

Section 01 : Présentation de la zone d'étude, données et méthodologie

1-1-Présentation de la zone d'étude

1.1.1 Localisation géographique et situation administrative

La commune d'Es-Senia est située dans le Nord-Ouest de l'Algérie, au cœur de la wilaya d'Oran, dont elle constitue la banlieue sud immédiate. Sur le plan administratif, elle relève de la daïra d'Es-Senia.

Ses coordonnées géographiques centrales sont 35°39'00''N et 0°37'00''O. Le territoire communal s'étend sur une superficie de **48,51 km²** et présente une altitude de la zone varie entre 125 et 262 mètres. Le centre-ville d'Oran se situe à environ 7 kilomètres au Nord de la commune.

Les limites administratives de la commune se définissent comme suit :

- Au nord : la commune d'Oran ;
- À l'est : la commune de Sidi Chami ;
- Au sud : la commune d'El Kerma ;
- À l'ouest : la commune de Misserghin.

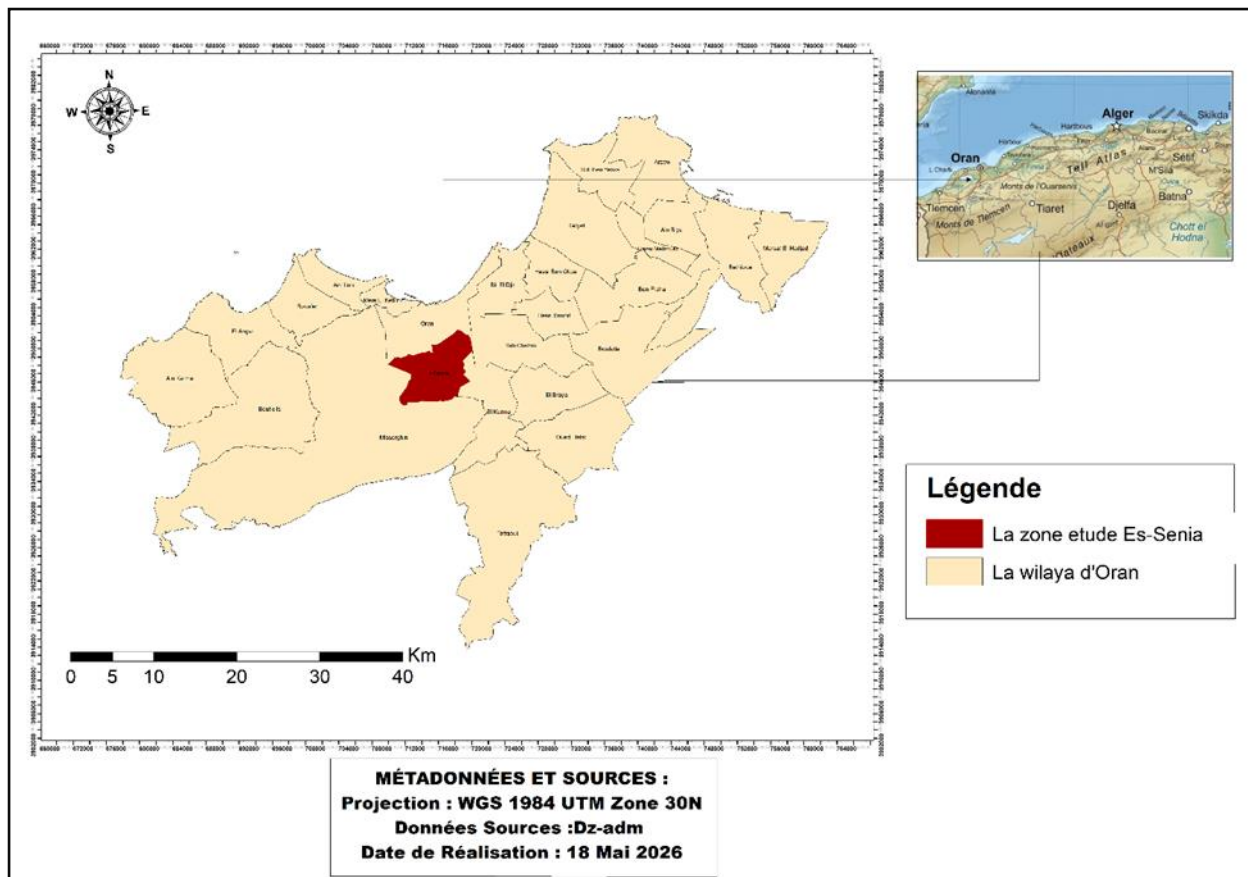


Figure 6: Carte localisation de la zone d'étude Es-Sénia, Oran

1.1.2 Infrastructures, démographie et accessibilité

La commune d'Es-Sénia occupe une position socio-économique stratégique à l'échelle de la wilaya. Elle abrite une population dynamique dépassant les 100 000 habitants, créant une forte concentration urbaine et industrielle.

Son territoire se caractérise par des infrastructures d'envergure internationale et régionale:

- **Transport :** l'Aéroport national et International d'Oran - Ahmed Ben Bella, ainsi qu'un réseau routier majeur connecté au tramway d'Oran.
- **Enseignement et Recherche :** des pôles universitaires importants, notamment l'Université d'Oran 1 Ahmed Ben Bella et l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle (IMSI).
- **Économie :** plusieurs zones industrielles et d'activités en pleine expansion.

1.1.3 Relief et topographie

Le relief de la commune d'Es-Sénia est caractérisé par une topographie contrastée, avec des altitudes allant de **125 à 262 mètres**. Le modèle numérique du terrain montre que les zones les plus élevées se situent dans la partie Ouest de la commune, tandis que la topographie s'abaisse progressivement vers l'Est.

La majorité du territoire présente des pentes faibles dans sa vaste plaine orientale (voir la figure N°7). Cette configuration topographique est hautement favorable à l'implantation d'infrastructures solaires, car elle élimine les contraintes de fortes pentes, réduit les coûts de terrassement et optimise l'exposition globale des installations sur la majeure partie de la commune.

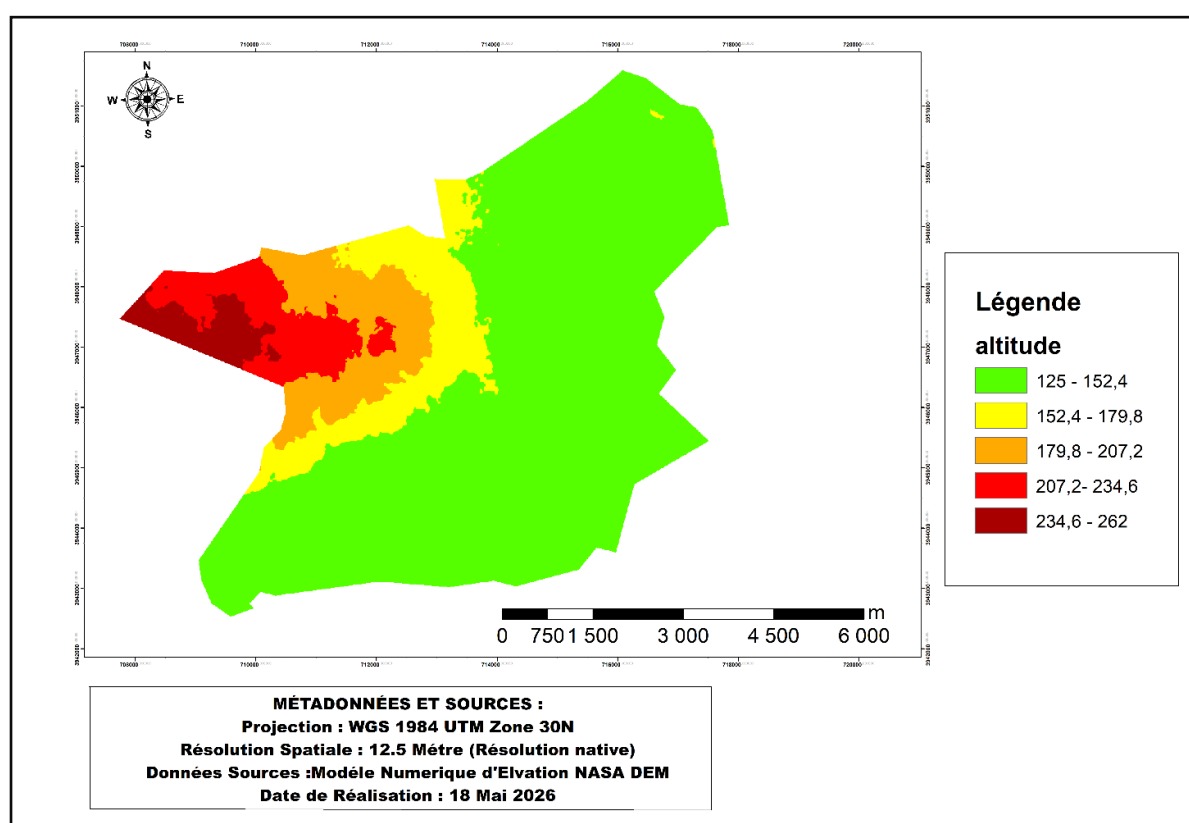


Figure 7: Carte d'altitude de la commune d'Es-Sénia

1.1.4 Justification du choix de la zone d'étude

Le choix de la commune d'Es-Sénia comme zone d'étude repose sur des critères scientifiques, techniques et socio-économiques précis :

1. Un potentiel solaire remarquable : la région bénéficie d'un gisement solaire élevé, avec une moyenne de 3 000 heures d'ensoleillement par an.

2. Une demande énergétique forte : la présence de plus de 100 000 habitants et d'un tissu industriel dense engendre une consommation électrique critique.

3. La disponibilité de données géospatiales fiables et à haute résolution pour le territoire d'Es-Senia, notamment les images Sentinel-2, Landsat 8/9 et le Modèle Numérique de Terrain ALOS PALSAR, a constitué un facteur déterminant dans le choix de cette zone d'étude, garantissant ainsi la robustesse et la précision de notre analyse spatiale. La disponibilité des données : la zone dispose d'un historique de données cartographiques, topographiques et d'occupation du sol exploitables sous Système d'Information Géographique (SIG).

4. L'originalité de la recherche : l'absence d'études d'aide à la décision par SIG à l'échelle de cette commune confère à ce travail un caractère inédit et une utilité d'aménagement locale.

1-1-5 Données et outils utilisés

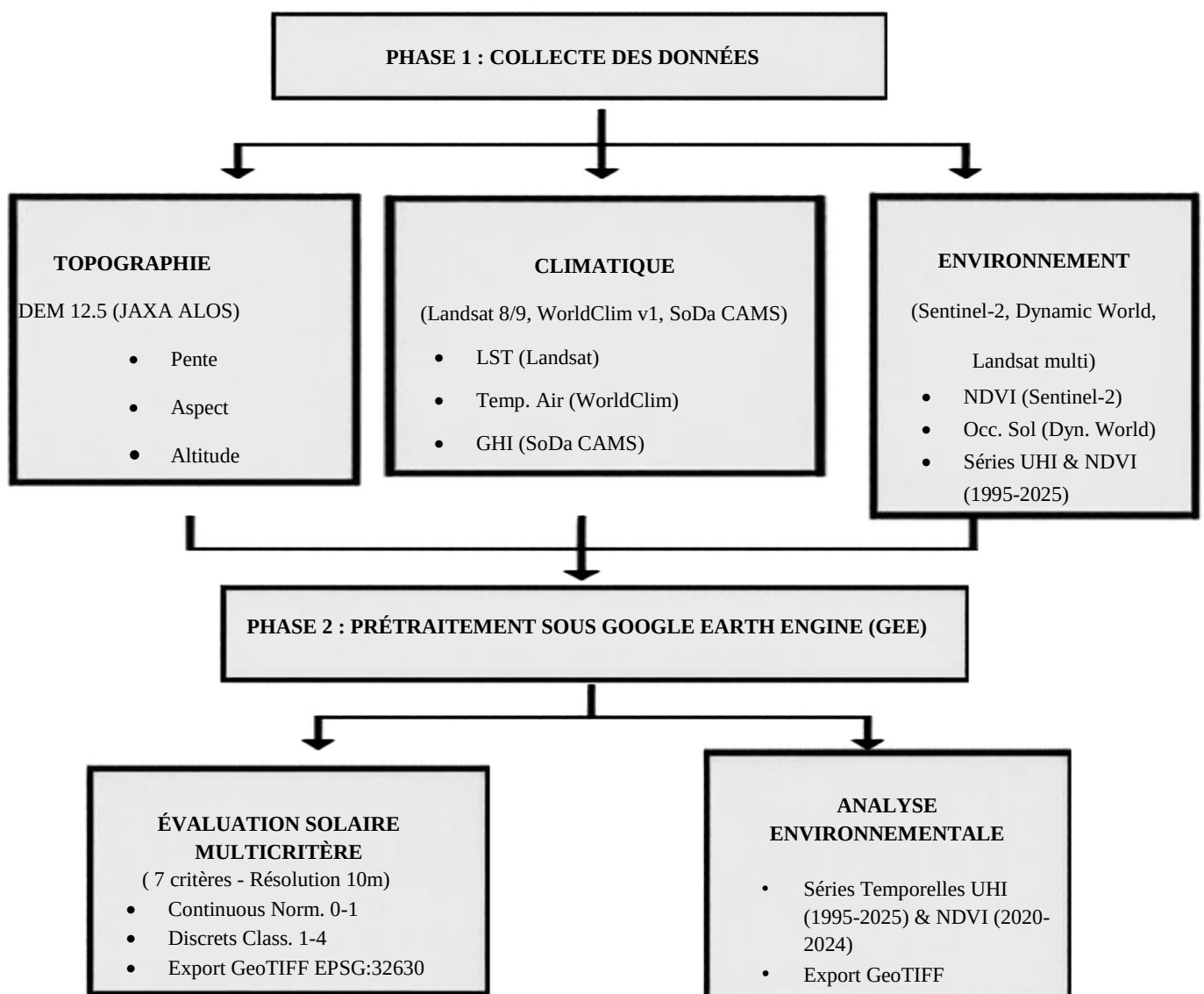
2-1- Les Données utilisées

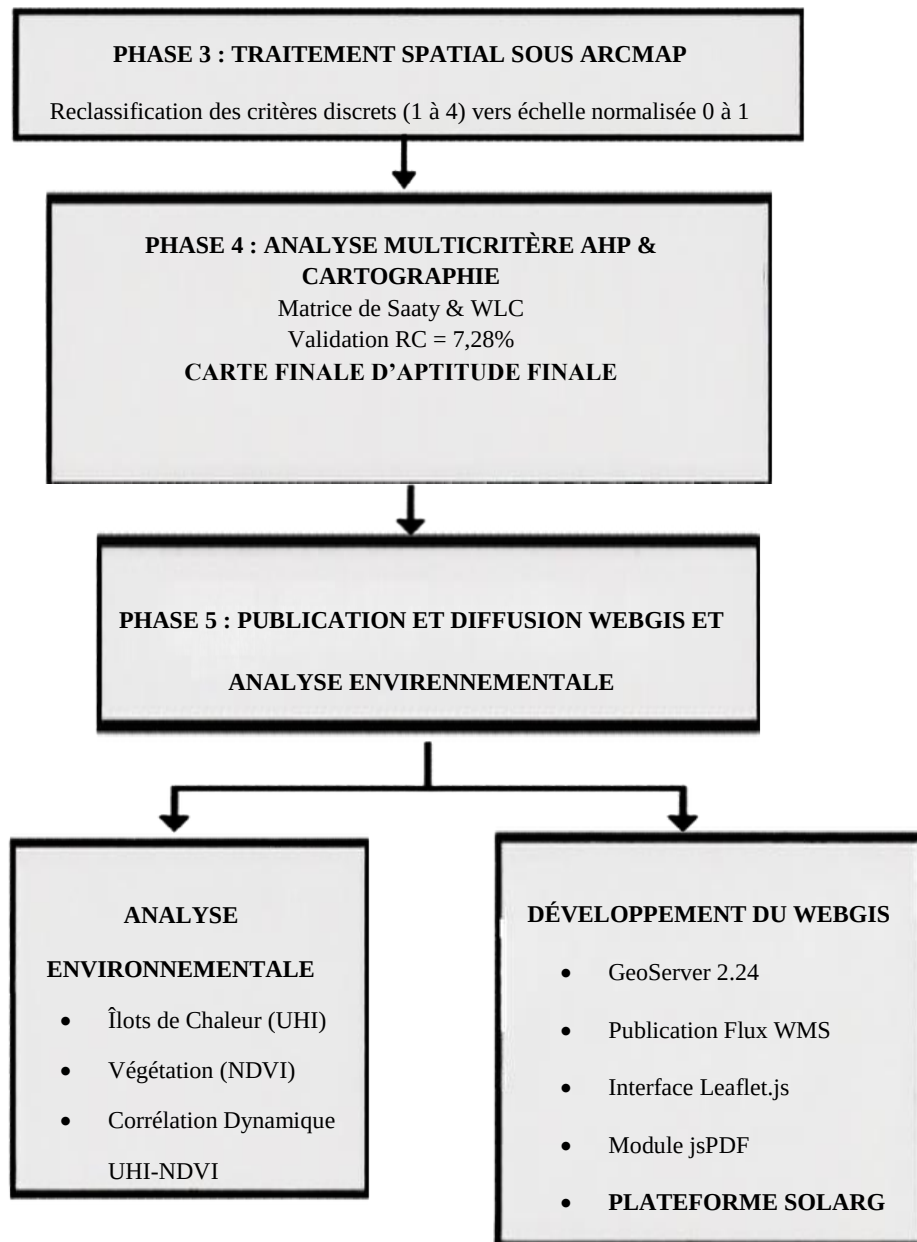
Donnée	Source	Résolution	Utilisation
Landsat 8/9	USGS	30 m	Température de surface (LST)
Sentinel-2	Copernicus	10 m	NDVI
DEM	DEM Senia	12.5 m	Pente et orientation
WorldClim	WorldClim v1	~1 km	Température de l'air
Occupation du sol	Google/ Dynamicworld V1	10 m	Analyse territoriale
Données GHI	SODA	Variable	Rayonnement solaire

2 2- Les outils utilisés

Outil	Fonction principale
Google Earth Engine	Prétraitement et extraction des critères
ArcMap	Cartographie et analyse spatiale
Plugin AHP	Analyse multicritère
Leaflet	Affichage Webis
GeoServer	Publication des couches géographiques
JavaScript / Fetch API	Interrogation et analyse dynamique

1.1.6 Méthodologie de travail





Section 02 : Extraction, traitement des critères, modélisation AHP et analyse environnementale

1-1-Extraction et traitement des critères

1-1-1-La pente

La topographie constitue un paramètre d'ingénierie civile et économique critique lors de la phase de planification de centrales photovoltaïques au sol. L'analyse spatiale de la pente, modélisée à une résolution métrique de 10 mètres sur le territoire d'Es-Senia, met en évidence un profil morphologique globalement plan et hautement favorable (voir Figure 8).

Les résultats cartographiques révèlent une hégémonie absolue de la classe "Terrain Plat" (0° à 5°), colorée en vert foncé, qui tapisse la quasi-totalité de la plaine d'Es-Senia. D'un point de vue technico-économique, cette configuration spatiale représente la zone d'implantation idéale. Elle garantit une absence quasi-totale de frais de terrassement, facilite l'accès des engins de chantier lourds et optimise l'agencement géométrique des rangées de modules sans risque d'ombrage porté induit par le relief. La classe "Pente Faible" (5° à 10°), représentée en vert clair, caractérise quelques secteurs périphériques et reste techniquement acceptable pour l'implantation de panneaux solaires.

Les contraintes topographiques, matérialisées par les classes "Pente Modérée" (10° à 15° , en jaune) et "Pente Forte" (supérieure à 15° , en rouge), se manifestent de façon extrêmement marginale et discontinue. Elles épousent de minces talwegs et des ruptures de versants localisées au centre-ouest de la commune. Ces secteurs sont classés comme restrictifs ou éliminatoires, car les inclinaisons prononcées augmenteraient exponentiellement les coûts de génie civil et les risques d'instabilité mécanique des structures porteuses.

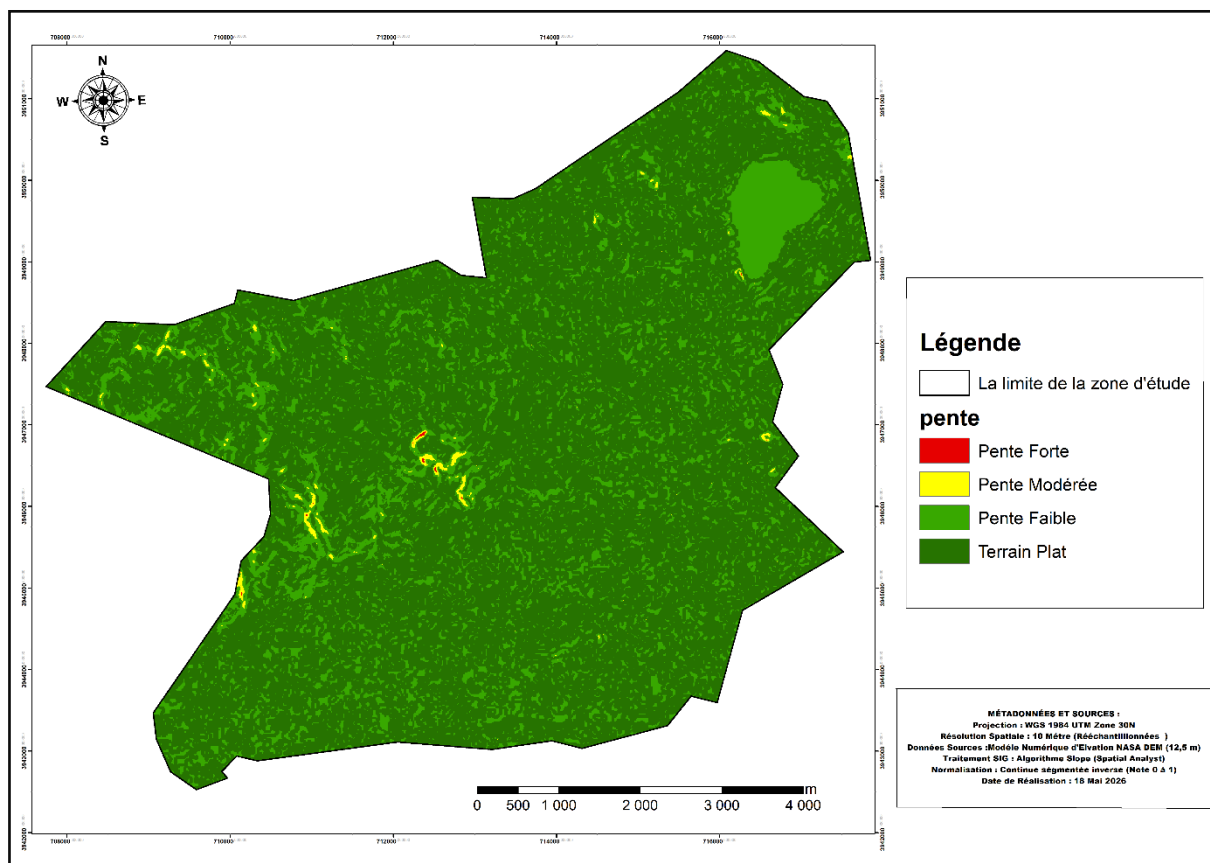


Figure 8: Carte des pentes de la commune d'Es-Senia

1-1-2- EXPOSITION DES VERSANTS

L'exposition du relief, ou "Aspect", influe directement sur le rendement énergétique des infrastructures photovoltaïques en déterminant l'angle d'incidence du rayonnement solaire direct tout au long de la journée. La modélisation à haute résolution (10 mètres) de l'orientation des versants sur la commune d'Es-Senia révèle une mosaïque topographique globalement très hétérogène, mais spatialement favorable au gisement solaire (voir Figure 9).

Les versants orientés vers le Sud (colorés en jaune), couplés aux zones de transition Est/Ouest (colorées en vert), occupent de manière dominante les structures ondulées et les replats de la commune. Les secteurs exposés au Sud représentent le gisement thermique optimal, maximisant la capture des flux de photons sans obstruction orographique. De plus, la plaine orientale d'Es-Senia se distingue par une vaste surface continue classée comme "Terrain Plat" (colorée en beige), correspondant principalement à l'emprise stabilisée de la zone aéroportuaire. Ces surfaces plates offrent une liberté totale pour l'inclinaison artificielle des structures porteuses (structures fixes orientées plein Sud).

À l'inverse, l'exposition Nord (colorée en rouge) se manifeste de manière très fragmentée sous forme de micro-linéaments sur les flancs de talwegs et les contre-pentes locales. Ces versants ombragés reçoivent la note d'aptitude minimale (0.0) dans le modèle AHP. En raison

d'un déficit d'ensoleillement direct durant la période hivernale et des pertes de rendement par ombrage porté, ces secteurs exposés au Nord sont scientifiquement disqualifiés pour l'implantation de centrales solaires à haut rendement.

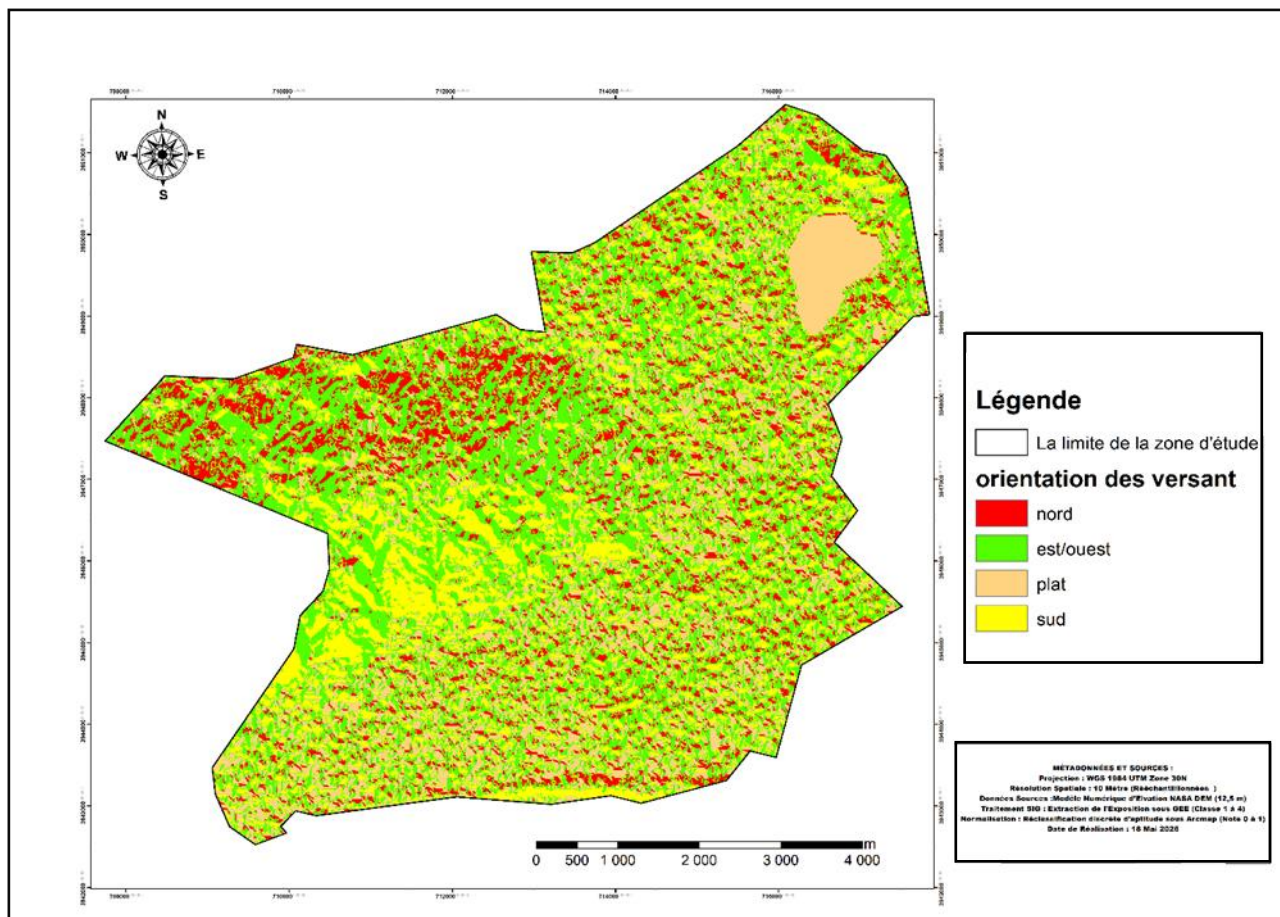


Figure 9 : Carte d'exposition des versants de la commune d'Es-Senia

1-1-3- Occupation du sol

Dans le cadre de cette modélisation, l'analyse de l'occupation du sol est une étape fondamentale pour identifier les zones favorable à l'installation des panneaux photovoltaïques sur le territoire de la commune d'Es-Senia (**Figure 10**). Ce paramètre permet de repérer les contraintes du terrain et d'éviter les conflits d'usage de l'espace. En utilisant les données de la base *Dynamic World V1* (2024), nous avons normalisé les différentes catégories de terrain sur une échelle de **0.0** (zone totalement inadaptée) à **1.0** (zone idéale).

- **Les zones d'eau (Indice : 0.0) :** Cette valeur s'applique à l'emprise du lac Dayat Morsli. Il s'agit d'une zone d'exclusion stricte en raison des contraintes biophysiques majeures, notamment les risques d'inondation saisonnière, l'instabilité géotechnique du terrain et la corrosion saline du matériel.

- **La végétation agricole (Indice : 0.5)** : Afin de limiter les conflits d'usage de l'espace et de préserver les parcelles cultivées actives ainsi que la sécurité alimentaire de la commune, cette classe reçoit une aptitude restrictive.

- **Le tissu urbain (Indice : 0.8)** : Comprenant le noyau résidentiel, la zone industrielle d'Es-Senia et l'aéroport international, cette catégorie est fortement valorisée. Elle cible le potentiel des grandes toitures institutionnelles et des hangars pour une stratégie d'intégration photovoltaïque décentralisée, évitant ainsi toute artificialisation supplémentaire du sol.

- **Les sols nus (Indice : 1.0)** : Cette classe représente la zone préférentielle absolue. Libres de toute structure bâtie et en dehors des terres agricoles, ces espaces maximisent la liberté du génie civil pour l'implantation de parcs photovoltaïques au sol de grande envergure.

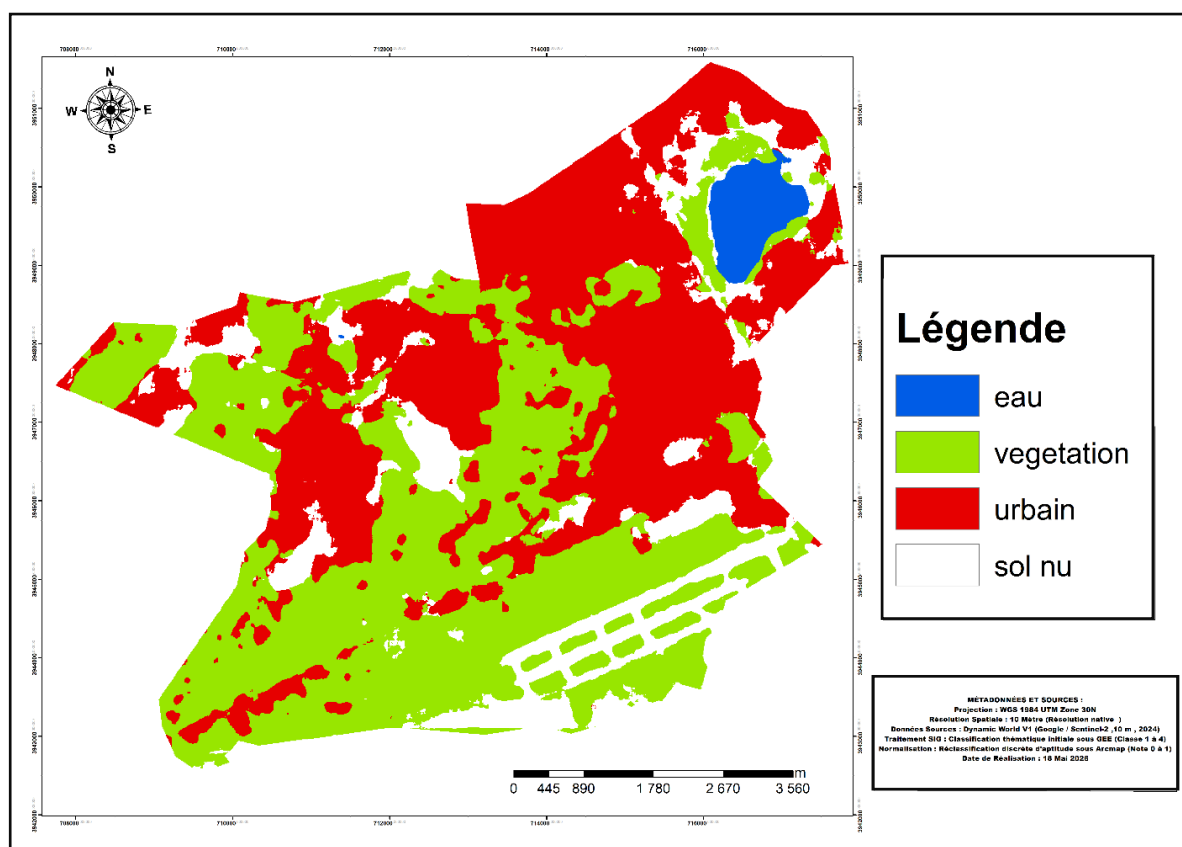


Figure 10: Carte d'occupation du sol de la commune d'Es-Senia

1-1-4- l'Indice de Végétation (NDVI)

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) intervient dans la modélisation d'aptitude comme un indicateur d'activité photosynthétique et de densité de la biomasse. Dans le cadre d'un projet photovoltaïque, la cartographie du NDVI à haute résolution (10 mètres)

permet d'identifier et d'exclure les zones agricoles dynamiques afin de minimiser l'impact environnemental et d'éviter les conflits d'usage du sol (Figure 11).

La distribution spatiale des valeurs met en exergue une forte minéralisation de la commune. Les secteurs affichant un NDVI très bas compris entre **-0,10 et 0,15** (colorés en rouge vif) englobent le cœur urbain d'Es-Senia, les infrastructures de transport (pistes de l'aéroport) et la cuvette de lac de Dayat Morsli. Ces surfaces imperméabilisées ou stériles reçoivent la note de contrainte écologique la plus faible, les qualifiant techniquement pour une emprise au sol. À l'opposé, les cœurs de biomasse active se concentrent au Sud-Ouest et sur la frange orientale, affichant des valeurs de NDVI comprises entre **0,55 et 0,76** (colorés en vert foncé). Ces pixels traduisent une végétation dense et des parcelles maraîchères actives, qu'il convient de préserver en leur attribuant une note d'aptitude restrictive dans le modèle de ménagement spatial.

Sur le plan temporel, le graphique d'évolution multi-annuelle (2020-2024) intégré révèle une stabilité historique remarquable du NDVI moyen de la commune, qui oscille de manière constante autour de la valeur de **0,25**. Cette signature spectrale globale, située à la limite inférieure de la végétation éparse, s'explique géographiquement par le caractère périurbain et semi-aride d'Es-Senia. L'hégémonie des surfaces bâties et l'alternance saisonnière des cultures céréalières soumises à la jachère estivale maintiennent l'indice moyen à un niveau modéré sur le long terme, confirmant la disponibilité de larges espaces fonciers à faible valeur écologique pour l'accueil de parcs photovoltaïques.

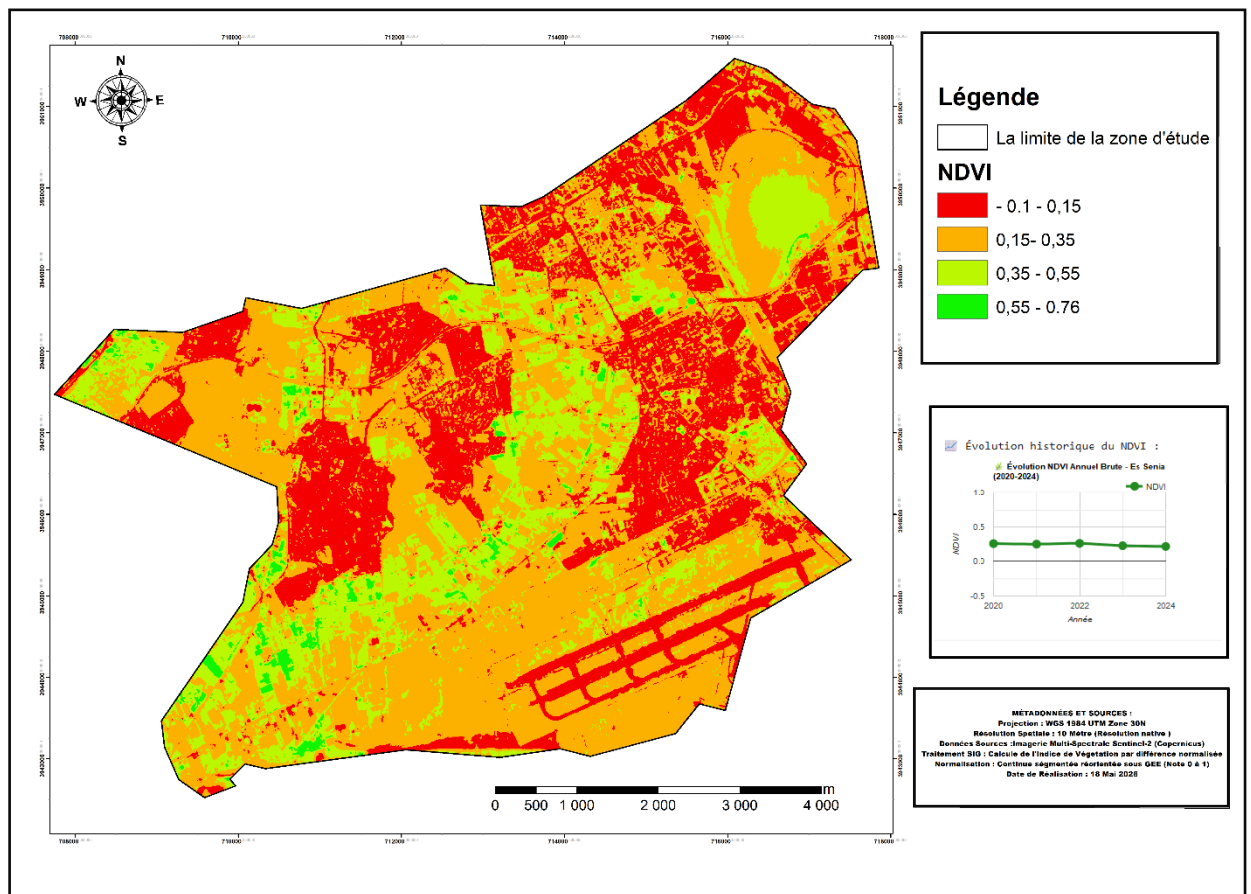


Figure 11: Carte de l'Indice de Végétation de la commune d'Es-Senia

1-1-5- Histogramme de distribution du NDVI

L'histogramme des fréquences exposé dans la Figure 12 retrace la distribution statistique des valeurs de NDVI calculées sur l'ensemble du territoire de la commune d'Es-Senia. L'allure générale de la courbe dessine un profil bimodal net, traduisant graphiquement la dualité biophysique qui structure cet espace périurbain entre surfaces minérales et couvertures végétales :

- Le premier pic d'intensité (centré entre 0,06 et 0,10) : Ce regroupement de fréquences traduit la forte prépondérance des surfaces dépourvues d'activité chlorophyllienne. Cette signature spectrale correspond à l'importante emprise du tissu urbain, des infrastructures de la zone industrielle, des pistes de l'aéroport international ainsi qu'aux valeurs basales caractérisant les eaux saumâtres du lac de Dayat Morsli.
- Le second pic, plus étalé (étendu entre 0,20 et 0,35) : Cet étalement matérialise la dominance d'un couvert végétal de faible à moyenne densité. Ce comportement biophysique illustre parfaitement la matrice agricole d'Es-Senia, composée majoritairement de cultures saisonnières, de végétations spontanées et de zones steppiques périphériques.

- La traîne droite de la distribution (au-delà de 0,45) : La chute abrupte des fréquences vers les valeurs maximales met en évidence la rareté des îlots de biomasse dense, tels que les parcs arborés denses ou les cultures irriguées intensives à l'échelle communale.

L'analyse de cet histogramme confirme quantitativement que le paysage d'Es-Senia est structurellement dominé par des surfaces minérales ou à faible couvert végétal. Ce constat valide la pertinence de l'intégration du NDVI dans notre modèle d'aptitude, afin d'écarter les rares espaces de biomasse active à préserver tout en ciblant les sols nus anthropisés optimaux pour l'aménagement photovoltaïque.

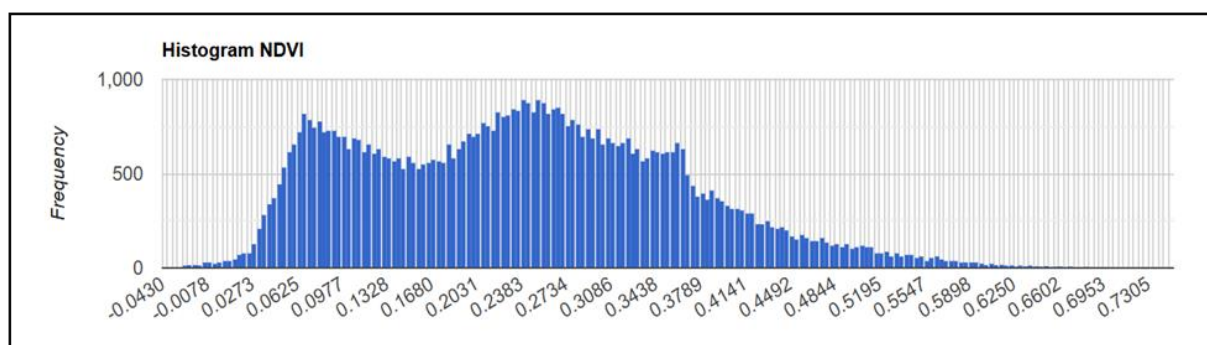


Figure 12: Distribution statistique et histogramme des fréquences des valeurs de NDVI sur la commune d'Es-Senia

1-2- Analyse Spatiale du Critère Climatique

1-2-1- Irradiation solaire (GHI)

Le rayonnement solaire global horizontal (GHI) représente le facteur clé qui conditionne la carte d'aptitude finale pour l'implantation des panneaux solaires. Ce paramètre climatique, extrait de la plateforme européenne SoDa CAMS (Copernicus) et rééchantillonné à une résolution fine de 10 mètres par interpolation déterministe IDW sous GEE, exprime la quantité d'énergie annuelle reçue par unité de surface sur la commune d'Es-Senia (Figure 13).

L'analyse de cette carte met en évidence des variations locales de l'ensoleillement sur le territoire communal. On observe notamment au cœur de la commune, au niveau du tissu urbain dense, une zone caractérisée par une irradiation faible (représentée en jaune) qui transite vers des valeurs modérées aux abords. À l'inverse, la partie située au Nord se distingue par une irradiation maximale (teinte rouge vif). Quant aux secteurs orientaux, situés à proximité immédiate du lac Dayat Morsli, ils affichent une aptitude énergétique forte (signalée par une teinte orange prononcée).

Il est d'ailleurs très intéressant de noter que le secteur de l'aéroport international Ahmed Ben Bella, situé dans cette zone d'irradiation modérée, abrite déjà des installations de panneaux solaires photovoltaïques pour ses besoins énergétiques. Cette initiative locale concrète confirme sur le terrain la viabilité du gisement solaire que nous avons cartographié. Néanmoins, bien que l'indice de rayonnement y soit très favorable, la décision finale d'implantation devra tenir compte des contraintes physiques et environnementales, comme la présence de la zone humide de Dayat Morsli juste à côté .

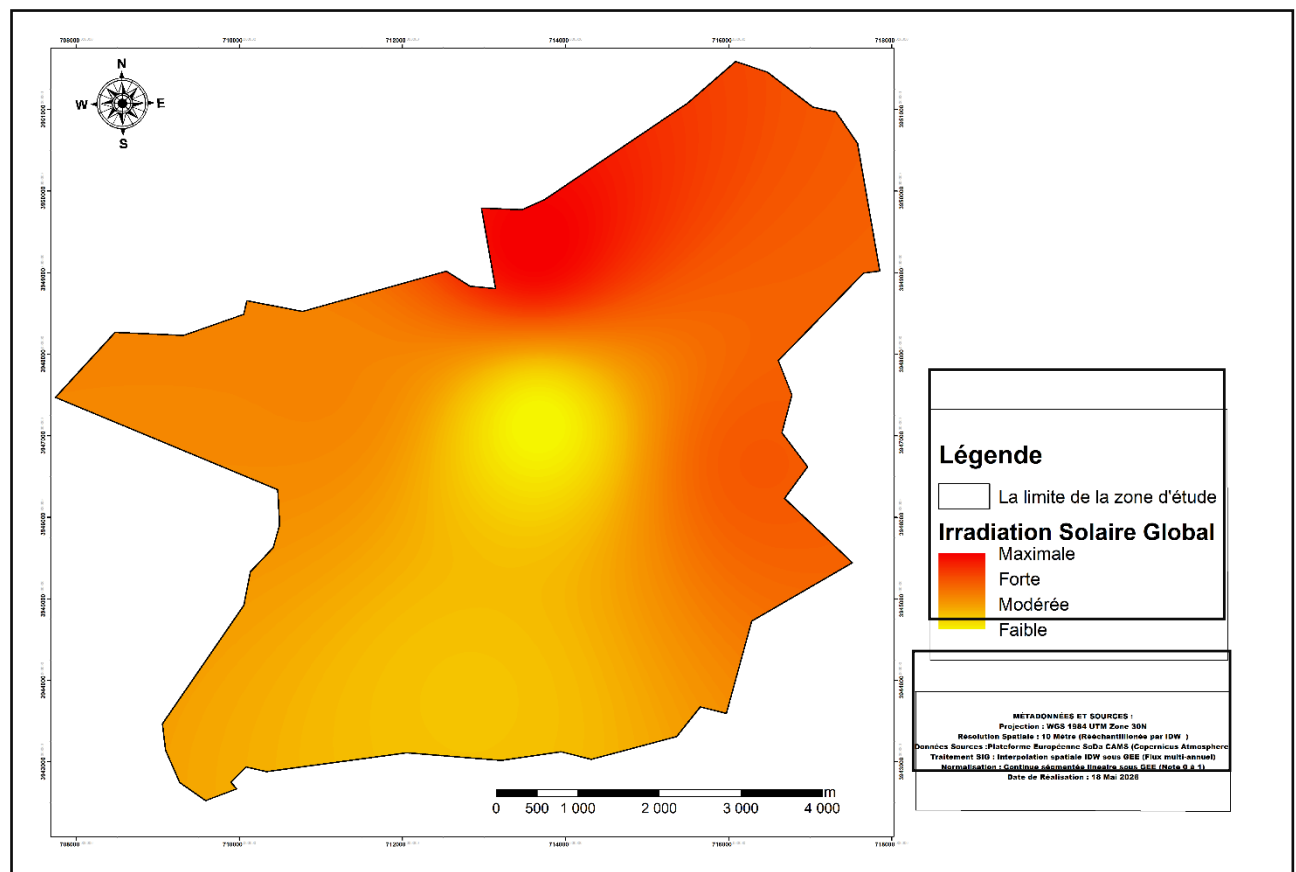


Figure 13 : Carte D'Irradiation Solaire de la commune d'Es-Senia

1-2-2- Température de la surface LST

La température de surface (LST) est un indicateur important pour le choix des sites photovoltaïques. En effet, lorsque les panneaux solaires surchauffent, leur rendement baisse et ils produisent moins d'électricité. Il est donc indispensable de cartographier les températures au sol pour repérer les zones les plus favorables. Cet indice a été calculé à partir des bandes thermiques (ST_B10) des satellites Landsat 8 et 9 sur la période 2014-2026 (Figure 14).

L'analyse de la carte LST montre des contrastes thermiques nets à Es-Senia, en parfait accord avec les valeurs de la légende. La zone la plus fraîche correspond au lac Dayat Morsli

au Nord-Est, avec une température minimale de **22,0 °C (représentée en rouge vif)**. Cette fraîcheur s'explique par la présence de l'eau et de l'humidité qui absorbent l'énergie solaire sans accumuler de forte chaleur, contrairement aux surfaces sèches.

À l'inverse, les zones les plus chaudes atteignent **35,9 °C (représentées en jaune clair)**. Elles se concentrent sur le tissu urbain dense, la zone industrielle d'Es-Senia et les pistes de l'aéroport international Ahmed Ben Bella. Le béton, le bitume et les toits en tôle emmagasinent fortement la chaleur solaire, créant un effet d'îlot de chaleur urbain. Les sols nus en périphérie affichent des températures moyennes, matérialisées par des **nuances orangées**.

Dans notre modèle d'aptitude, le lac Dayat Morsli a été traité avec une logique particulière : même si sa basse température est un point positif, sa nature de zone humide inondable reste une contrainte majeure. Ce secteur a donc reçu une note minimale dans l'analyse AHP pour finir en classe d'aptitude très faible sur la carte finale. Pour la zone industrielle, malgré des températures de surface élevées, elle garde tout son intérêt pour installer du solaire en toiture, au plus près des besoins en électricité des usines.

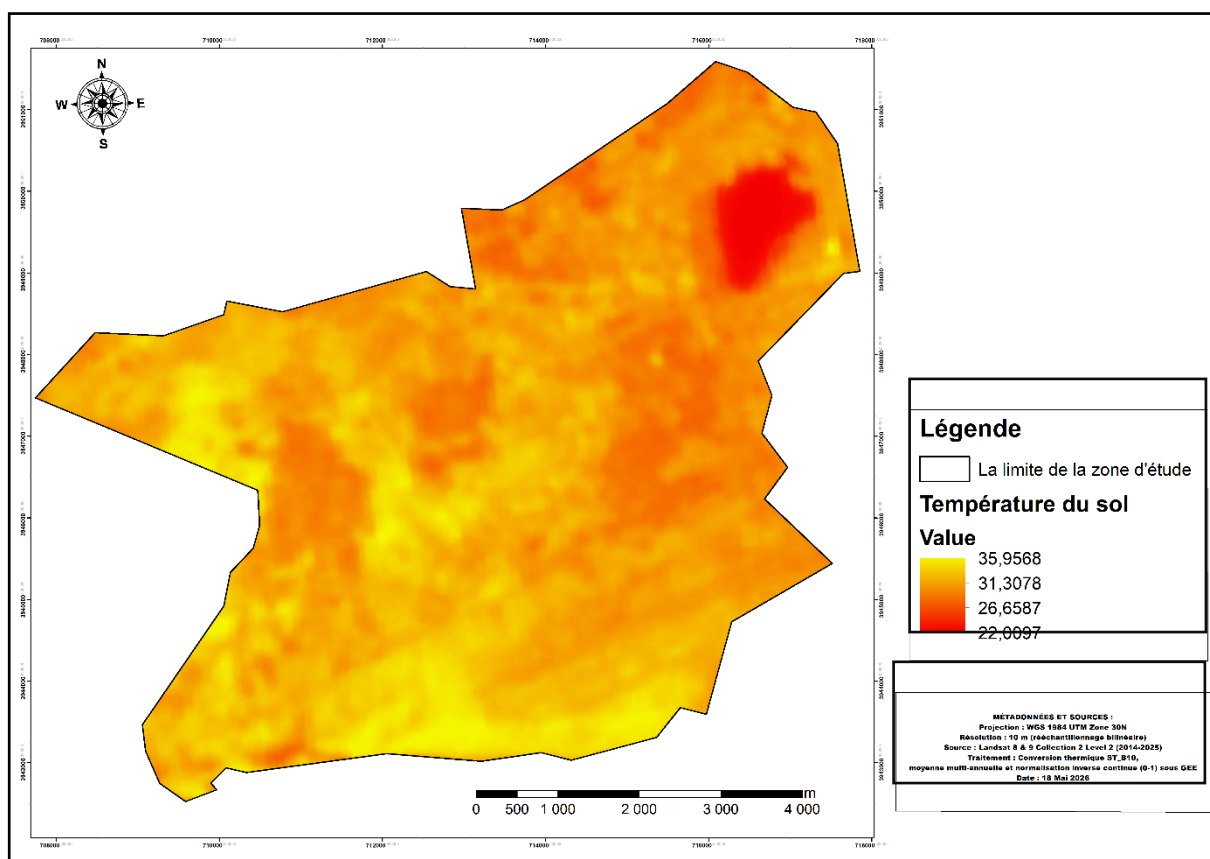


Figure 14: Carte de Température de la surface de la commune d'Es-Senia

1-2-3- Température de l'Air

La température de l'air est un paramètre important pour l'évaluation environnementale des sites photovoltaïques. Contrairement aux surfaces solides qui stockent directement la chaleur du soleil, l'air ambiant circule et aide à refroidir naturellement les panneaux solaires. Ce critère a été cartographié à partir de l'indice bio01 de la base de données WorldClim (v1.4), avec une résolution d'origine de 1 km rééchantillonnée à 10 mètres sous GEE pour l'intégrer dans notre modèle. Ce traitement met en évidence des différences de température progressives sur le territoire de la commune d'Es-Senia (Figure 15).

Les résultats de la carte révèlent une zone particulièrement fraîche, avec des valeurs minimales comprises entre **17,30 °C et 17,47 °C (colorée en bleu intense)**, située de façon très nette sur la bordure Ouest de la commune. Ce rafraîchissement local s'explique par la présence des grands espaces agricoles ouverts et un relief plat qui laisse bien circuler les vents marins venus de la côte oranaise. Cet environnement plus frais est idéal pour limiter la surchauffe des futurs panneaux solaires.

À l'opposé, les températures de l'air les plus élevées, allant de **17,65 °C à 18,00 °C (colorées en rouge brique)**, se concentrent sur deux grands secteurs distincts :

- **Au Nord-Est** : Autour de la cuvette du lac Dayat Morsli, où la réverbération du soleil sur le lit du lac asséché en été réchauffe l'air environnant.
- **Au Sud** : Au niveau des grandes pistes de l'aéroport international Ahmed Ben Bella, où le goudron retient fortement la chaleur et réchauffe l'air au-dessus de l'infrastructure.

Dans la logique de notre modèle d'aide à la décision, ces variations de température permettent d'ajuster l'aptitude des sites. Le secteur Ouest, plus frais et bien ventilé, reçoit les meilleures notes (proches de 1.0) car il offre de meilleures conditions de fonctionnement pour les panneaux. En revanche, les secteurs plus chauds de l'aéroport et du lac subissent une baisse relative de leur note pour tenir compte du risque de perte de rendement lié à un air ambiant trop chaud.

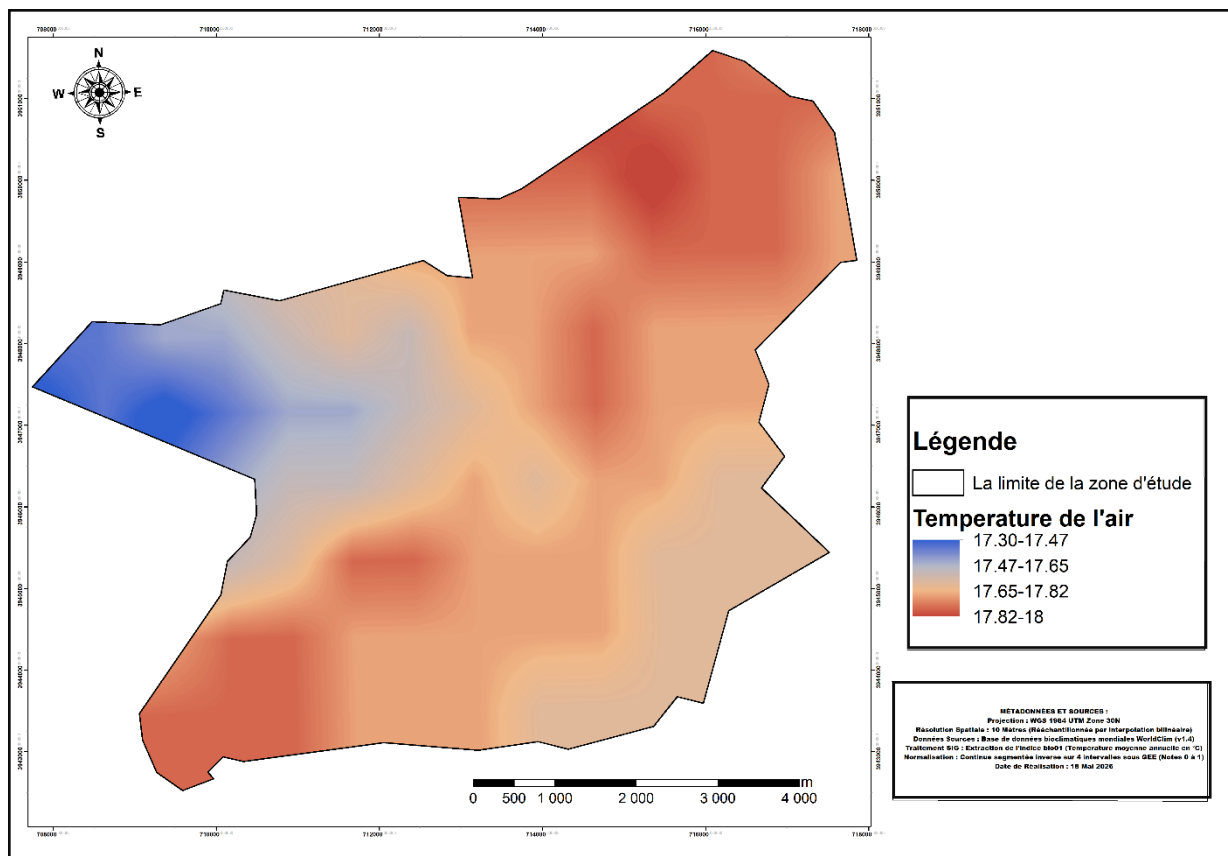


Figure 15 : Carte De Température de l’Air de la commune d’Es-Senia

1-4- Analyse multicritère AHP

Afin de déterminer l'importance relative des sept critères retenus (ensoleillement, pente, Aspect , Température de l’air , Température du sol , occupation du sol), nous avons appliqué la méthode **Analytic Hierarchy Process (AHP)** développée par Saaty (1980). Cette méthode repose sur la construction d'une **matrice de comparaison par paires** basée sur l'échelle de Saaty (1 = égale importance, 3 = importance modérée, 5 = importance forte, 7 = très forte, 9 = absolue).

Étape 1 : Matrice de comparaison par paires

Le tableau ci-dessous présente les comparaisons entre chaque paire de critères. Les valeurs sous la diagonale sont les inverses des valeurs au-dessus de la diagonale.

Tableau 4 : Matrice de Comparaison par Paires — AHP (Saaty)

Critères	GHI Ensoleillement	Pente	Aspect	Température de l'air	NDVI	LST
GHI Ensoleillement	1	3	5	5	7	9
Pente	1/3	1	3	3	5	7
Aspect	1/5	1/3	1	3	5	5
Température de l'air	1/5	1/3	1/3	1	3	5
Occupation du sol	1/7	1/5	1/3	1/3	3	3
NDVI	1/7	1/5	1/5	1/3	1	3
LST	1/9	1/7	1/5	1/5	1/3	1

Étape 2 : Normalisation de la matrice

Pour obtenir les poids, nous avons normalisé la matrice en divisant chaque élément par la somme de sa colonne.

Tableau 5 : Matrice Normalisée — AHP

Critères	GHI / Ensoleillement	Pente	Aspect	Température de l'air	Occupation du sol	NDVI	LST
GHI / Ensoleillement	0,4694	0,5759	0,4967	0,3886	0,3559	0,2877	0,2727
Pente	0,1565	0,192	0,298	0,2332	0,2542	0,2055	0,2121
Aspect	0,0939	0,064	0,0993	0,2332	0,1525	0,2055	0,1515
Température de l'air	0,0939	0,064	0,0331	0,0777	0,1525	0,1233	0,1515
Occupation du sol	0,0671	0,0384	0,0331	0,0259	0,0508	0,1233	0,0909
NDVI	0,0671	0,0384	0,0199	0,0259	0,0169	0,0411	0,0909
LST	0,0522	0,0274	0,0199	0,0155	0,0169	0,0137	0,0303
Somme colonnes	2,1302	5,2095	10,0667	12,8667	19,6667	24,3333	33

Étape 3 : Calcul des poids finaux

La moyenne de chaque ligne de la matrice normalisée donne le poids de chaque critère :

Tableau 6 : Vecteur de Priorité (Poids AHP) & Cohérence

Critère	Poids	Poids (%)	Classement
GHI / Ensoleillement	0,4067	40.67%	1
Pente	0,2216	22.16%	2
Aspect	0,1428	14.28%	3
Température de l'air	0,0994	9.94%	4
Occupation du sol	0,0614	6.14%	5
NDVI	0,0429	4.29%	6
LST	0,0251	2.51%	7

Étape 4 : Vérification de la cohérence

Pour valider la fiabilité des jugements, nous avons calculé :

Lambda Max ($\lambda_{\max}$)	7,5765
Indice de Cohérence (IC)	0,0961
Indice Aléatoire (IR, n=7)	1,32

- **Calcul de ratio de cohérence (RC)**

$$RC = IC \div IA$$

LE Ratio de coherence de 7 critere est 1,32

$$RC = 0,0961 / 1,32 = 0,0728 = 7,28 \%$$

RESULTAT :

Le ratio de cohérence (RC) est de 7,28 %, ce qui est inférieur au seuil de 10 % fixé par Saaty. Par conséquent, les jugements sont considérés cohérents et les poids obtenus peuvent être utilisés avec confiance dans l'analyse multicritère.

1-5- Carte finale d'aptitude : Synthèse globale et croisement multi-critères (Approche AHP)

Le croisement et la superposition pondérée des critères géographiques, topographiques et climatiques au sein du modèle AHP (Analytic Hierarchy Process) ont permis de générer la carte finale d'aptitude pour l'implantation des panneaux solaires sur la commune d'Es-Senia (Figure 16). Cette modélisation offre une sectorisation claire et directement exploitable pour l'aménagement énergétique du territoire.

Les résultats cartographiques mettent en évidence deux contraintes spatiales majeures, classées en Aptitude Très Faible (en marron foncé) et Aptitude Faible (en rouge) :

- Le lac Dayat Morsli (à l'Est) : Il s'individualise très nettement en marron foncé. Cela traduit l'impact éliminatoire de cette zone humide inondable dans notre modèle AHP.

- Le centre urbain dense et le secteur de l'aéroport (au cœur et au Sud de la commune) : Ils apparaissent sous la forme d'un grand noyau rouge et marron. Cette faible aptitude s'explique par l'effet combiné d'une baisse relative de l'ensoleillement (GHI) et des températures au sol très élevées (LST) qui caractérisent ces espaces fortement urbanisés et artificialisés.

À l'opposé, les zones les plus favorables, classées en Aptitude Forte (vert clair) et Aptitude Maximale (vert foncé), se concentrent principalement dans la partie Nord et sur les franges occidentales (à l'Ouest) de la commune. Ces secteurs offrent les conditions optimales pour le développement de projets photovoltaïques : un excellent ensoleillement, un relief plat (pentes inférieures à 5°) et de vastes étendues de sols nus disponibles.

En conclusion, cette carte prouve l'efficacité de l'intégration des outils de cloud computing (Google Earth Engine) et des Systèmes d'Information Géographique (ArcMap). En identifiant précisément les forces et les contraintes de chaque secteur, ce modèle AHP propose un plan réaliste, équilibré et durable pour guider la transition énergétique de la commune d'Es-Senia.

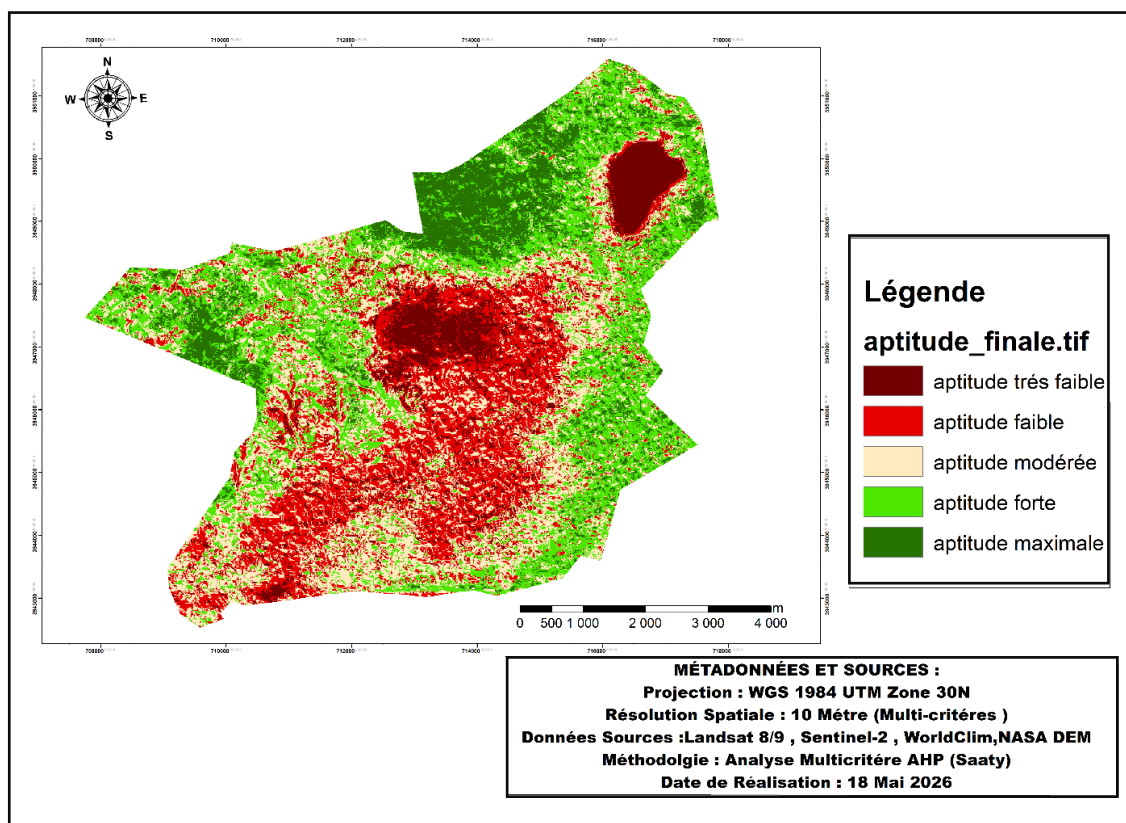


Figure 16 : Carte d'Aptitude finale de la commune d'Es-Senia

1-6- Analyse environnementale complémentaire

1-6-1- Îlots de Chaleur Urbains (ICU)

L'analyse thermique de surface représente un critère environnemental et d'aménagement fondamental dans l'évaluation de la vulnérabilité microclimatique locale. Extrait des données du satellite Landsat 8 et spatialisé à une résolution de 30 mètres, ce paramètre exprime l'écart thermique local par rapport à la moyenne communale après une normalisation continue segmentée sous Google Earth Engine (GEE) sur la commune d'Es-Senia (Figure 17).

Les résultats cartographiques mettent en évidence une dynamique spatiale hautement contrastée, structurée par une fracture environnementale et anthropique nette. Le secteur de la périphérie Est et Nord-Est s'individualise par une ambiance microclimatique classée en « Frais » à « Très Frais » (colorée en bleu et bleu foncé). Cette résilience thermique localisée s'explique scientifiquement par l'influence écosystémique du lac de Dayat Morsli. Ce vaste espace lacustre et ses franges de sols salins humides agissent comme un régulateur thermique majeur, exerçant un fort pouvoir tampon par inertie thermique et rafraîchissant l'atmosphère environnante.

À l'inverse, la frange Ouest et Centre-Ouest de la commune est marquée par une dominance de la classe « Chaud » (colorée en jaune), au sein de laquelle s'individualisent de manière chirurgicale des anomalies thermiques positives critiques qualifiées d'« Îlots de Chaleur Urbains » (colorés en rouge vif). Ce phénomène de surchauffe localisée est directement dicté par l'empreinte anthropique et la morphologie urbaine. Il coïncide fidèlement avec le tissu urbain résidentiel dense, les zones industrielles — caractérisées par des toitures métalliques hautement conductrices — ainsi que les surfaces asphaltées hautement imperméabilisées de l'aéroport international d'Oran, qui emmagasinent l'énergie solaire le jour et la restituent sous forme de chaleur.

Il convient toutefois de souligner que la classe « Modéré » (colorée en vert) assure la transition spatiale entre ces deux extrêmes, matérialisant les espaces agricoles périurbains et la végétation diffuse. Dans le contexte de l'aménagement du territoire face au changement climatique, cette cartographie dépasse le simple constat visuel. Elle constitue un véritable outil d'aide à la décision, prouvant que si le lac reste l'infrastructure naturelle de rafraîchissement d'Es-Senia, l'artificialisation de sa frange Ouest nécessite de futures politiques de végétalisation et de mise en place de trames vertes pour atténuer le stress thermique des populations locales.

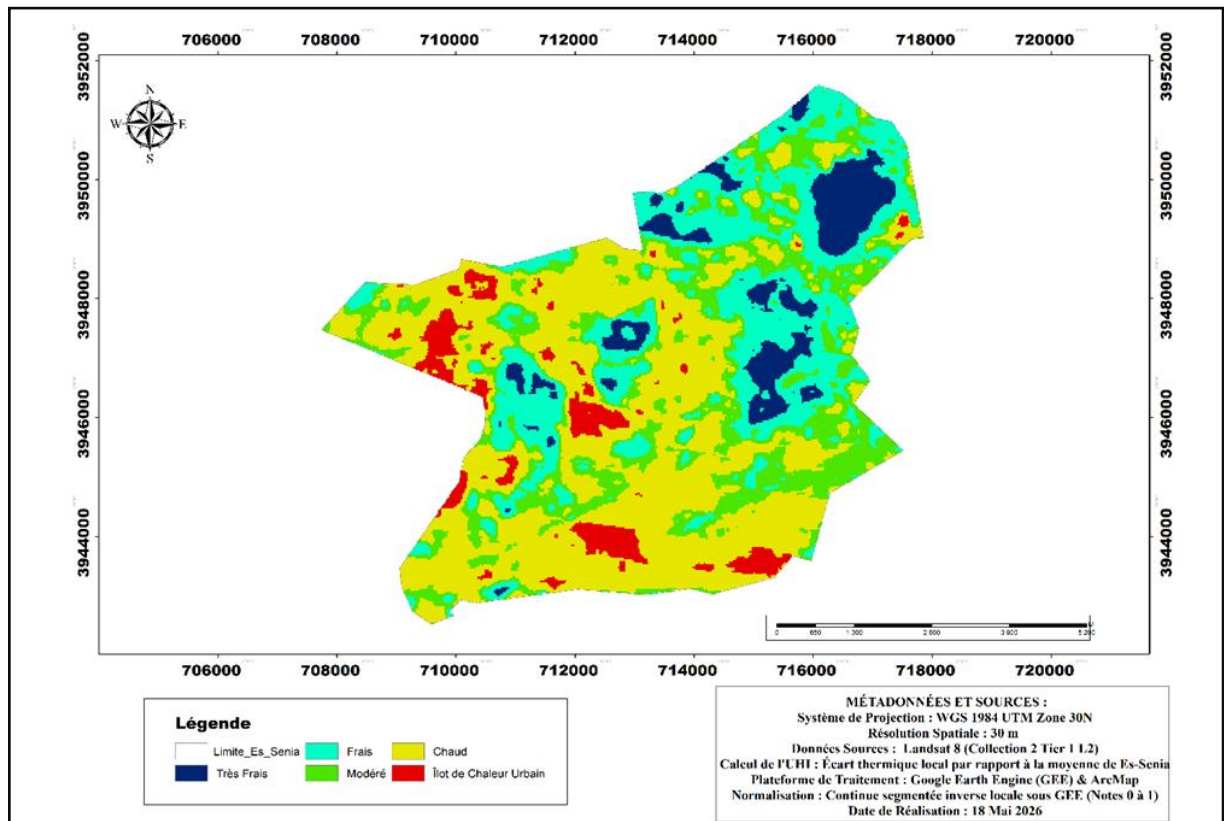


Figure 17: Carte de l'Îlot de Chaleur Urbain de la commune d'Es-Senia

1-6-2- Corrélation Spatiale entre NDVI et UHI

1-6-2-1 corrélation spatiale entre l'Indice de Végétation (NDVI) et l'Îlot de Chaleur Urbain (UHI)

L'analyse de la corrélation entre l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) et l'Îlot de Chaleur Urbain (UHI) constitue un indicateur géo-environnemental crucial pour quantifier le rôle thermo-régulateur du couvert végétal face à la minéralisation anthropique. Extrait d'une approche multi-résolution combinant les données Sentinel-2 (10 m pour le NDVI) et Landsat 8 (30 m pour l'UHI) sur un composite moyen quinquennal (2020-2024), cet indice de corrélation cartographique est obtenu par soustraction matricielle brute (UHI - NDVI). Normalisé sur une échelle linéaire continue allant de -2 (valeurs négatives) à 2 (valeurs positives) sous Google Earth Engine (GEE), ce paramètre exprime la signature biophysique de la commune d'Es-Senia (Figure 18).

Les résultats cartographiques mettent en évidence une dynamique spatiale hautement contrastée et inversée, validant de manière empirique la théorie du rafraîchissement par la végétation. Le secteur Nord-Est ainsi que plusieurs poches internes s'individualisent par une valeur de corrélation négative à faible, matérialisée par une valeur proche de -2 (colorée en vert foncé et vert clair). Ce comportement s'explique scientifiquement par l'effet combiné d'un NDVI élevé (zones de cultures, vergers périurbains ou végétation spontanée) ou de la signature hydrique spécifique de la frange du lac de Dayat Morsli. Dans ces espaces, l'évapotranspiration

active de la biomasse et l'humidité des sols inhibent la surchauffe de surface, maintenant le différentiel thermique à un niveau minimal, voire négatif.

À l'inverse, la quasi-totalité de la matrice communale, notamment les franges Ouest, Centre et Sud-Ouest, subit une corrélation forte à maximale s'approchant de la valeur 2 (colorée en orange et rouge vif). Cette configuration traduit une situation critique où le déficit en couvert végétal (NDVI proche de zéro ou négatif) coïncide de manière chirurgicale avec des températures de surface maximales (UHI élevé). Cette réponse thermique agressive caractérise les sols nus arides, les infrastructures logistiques de l'aéroport international et le tissu industriel hautement imperméabilisé d'Es-Senia. L'absence de barrière végétale y favorise un emmagasinement optimal du flux solaire radiatif par les matériaux anthropiques.

Il convient toutefois de souligner que la transition spatiale (colorée en jaune) marque les zones de compromis environnemental, où une végétation diffuse ou des sols mixtes parviennent à atténuer partiellement l'anomalie thermique. Dans le contexte de l'aménagement durable, cette cartographie offre un diagnostic quantitatif sans appel : elle localise précisément les zones de rupture écologique où l'introduction de forêts urbaines ou de ceintures vertes est prioritaire pour rompre la continuité de la matrice rouge et restaurer l'équilibre microclimatique de la commune.

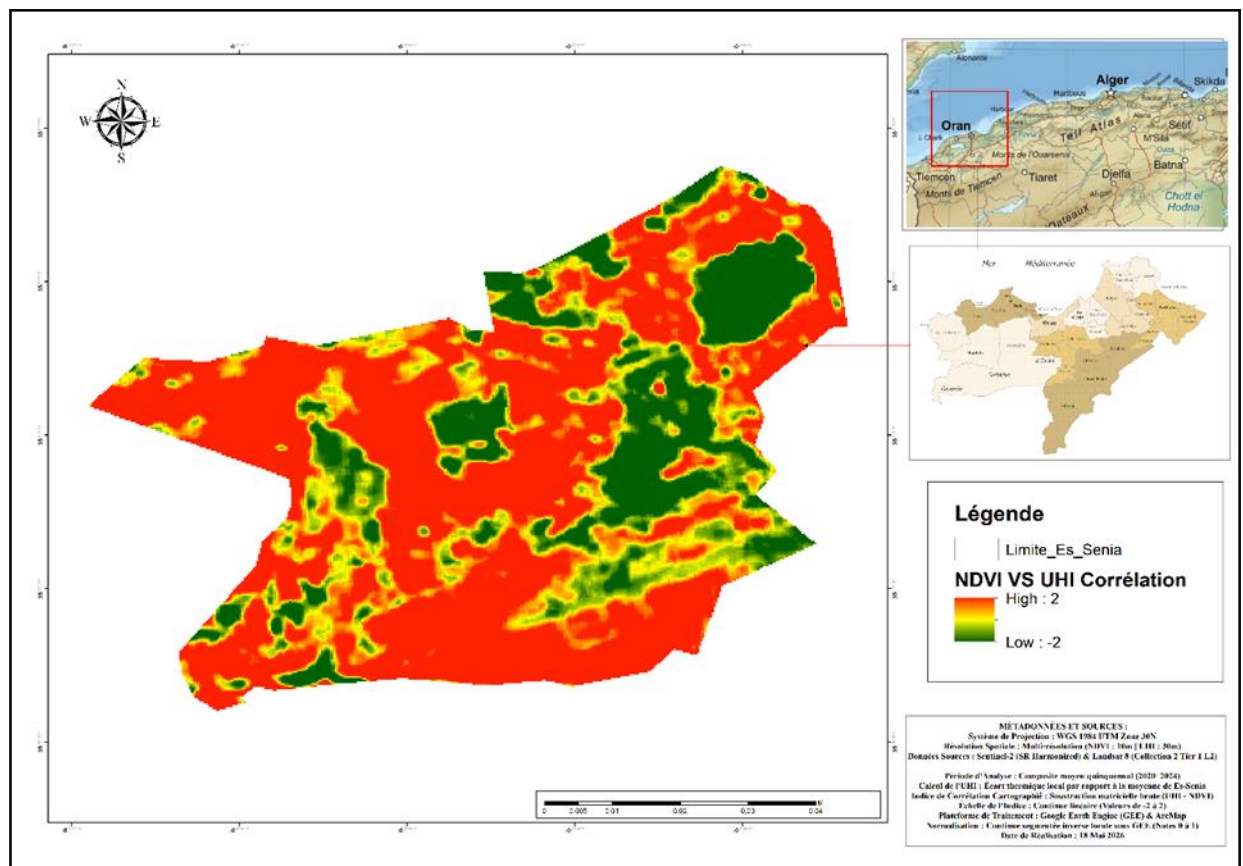


Figure 18 : Carte de la corrélation spatiale entre l'Indice de Végétation (NDVI) et l'Îlot de Chaleur Urbain (UHI) sur la commune d'Es-Senia

1-6-2-2- Analyse statistique par diagramme de dispersion (NDVI vs UHI)

Ce diagramme de dispersion (*scatterplot*) modélise la relation statistique directe entre l'indice de végétation (NDVI) et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (UHI) à l'échelle de la commune d'Es-Senia (Figure 19). L'allure générale du nuage de points met en évidence deux comportements microclimatiques majeurs :

- Un effet d'îlot de chaleur systématique dans les zones minéralisées : Pour des valeurs de NDVI très faibles (comprises entre 0,0 et 0,25), les points se concentrent majoritairement au-dessus de la ligne du zéro, traduisant des anomalies thermiques positives (UHI atteignant +5°C). Cela confirme que le tissu urbain dense, les zones industrielles et l'aéroport surchauffent fortement par manque de végétation.
- Un effet de rafraîchissement par le couvert végétal : À mesure que le NDVI progresse (au-delà de 0,30), le nuage s'écrase et plonge vers des valeurs nulles ou négatives. L'évapotranspiration de la biomasse active joue ici son rôle de régulateur thermique en abaissant la température de surface.

- L'exception environnementale du lac de Dayat Morsli : Les points isolés situés à l'extrême bas du graphique (UHI proche de -10 °C pour un NDVI compris entre 0,30 et 0,38) matérialisent la signature biophysique unique du lac de Dayat Morsli. La présence d'eau libre et de rives humides saturées au sein de cette dépression crée une oasis de fraîcheur extrême, faisant chuter drastiquement la température de surface locale par rapport au reste de la matrice communale.

En somme, ce graphique valide mathématiquement l'efficacité des espaces naturels et humides comme barrières thermiques à Es-Senia : la surchauffe urbaine devient systématique dès que le NDVI descend sous le seuil critique de 0,25.

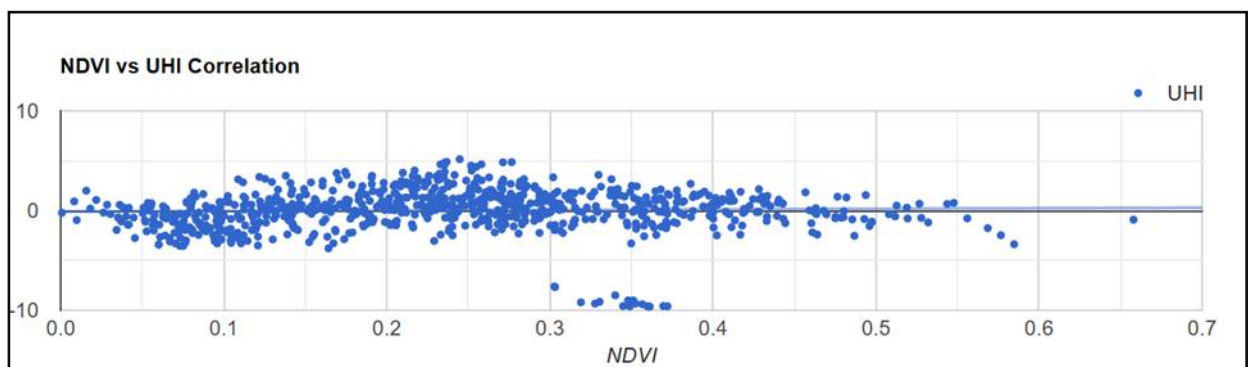


Figure 19 : Diagramme de dispersion et distribution des corrélations statistiques entre le NDVI et l'UHI sur la commune d'Es-Senia

Section 03 : Développement et déploiement de la plateforme WebGIS **SolarGIS**

3-1-Développement du WebGIS et diffusion cartographique

L'aboutissement opérationnel de cette recherche réside dans le passage d'une cartographie d'analyse statique à un outil dynamique et interactif d'aide à la décision accessible sur le Web. Cette section détaille l'architecture informatique, le pipeline de publication des données géospatiales, ainsi que l'ingénierie logicielle mise en œuvre pour le développement de la plateforme **SolarGIS**.

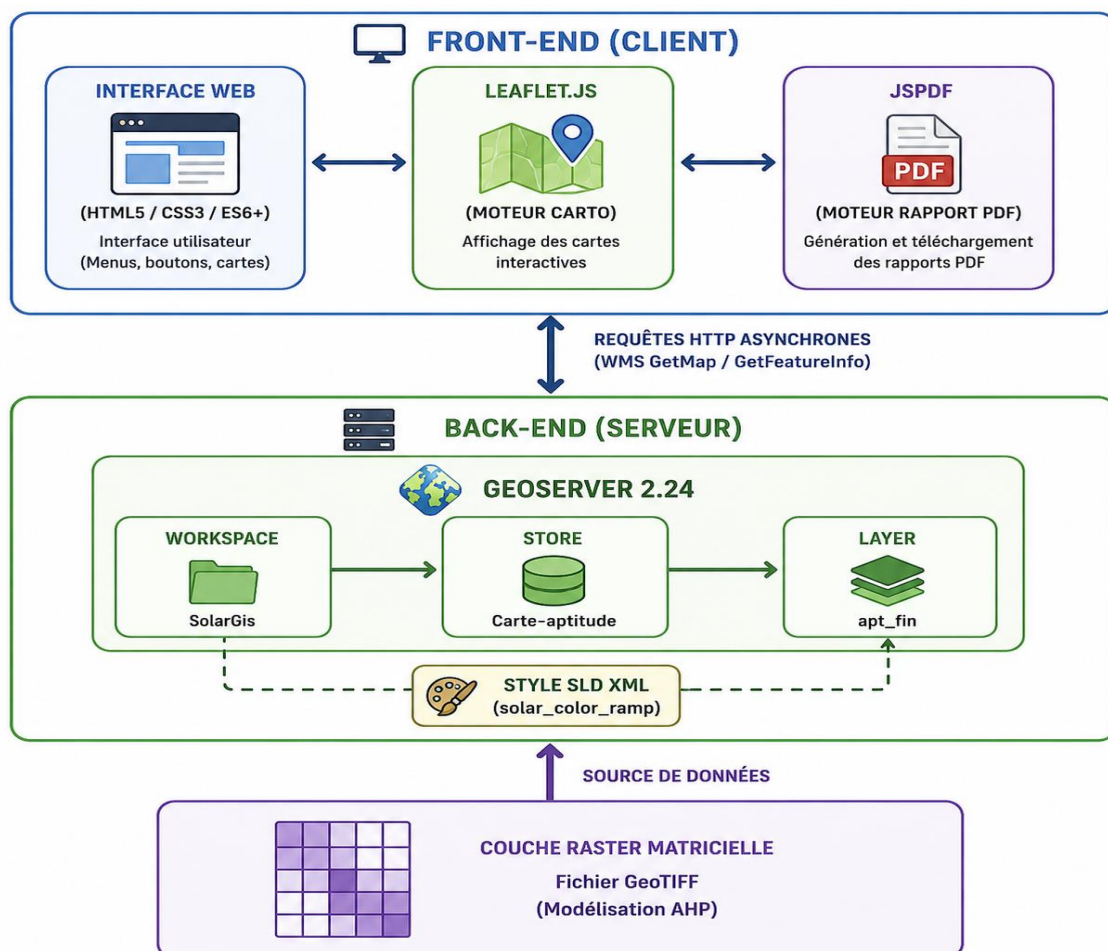


Figure 20 : Architecture globale système et diagramme des flux de la plateforme Web GIS SolarGIS

3-1-1- Architecture Serveur : Publication et Stylisation sous GeoServer

Pour assurer la diffusion des couches géographiques, le serveur cartographique open-source **GeoServer 2.24** a été sélectionné comme brique middleware. Afin d'optimiser les performances d'accès aux données matricielles, de s'affranchir des délais d'administration et d'éviter les surcoûts d'indexation inhérents à un Système de Gestion de Bases de données Relationnelles Spatiales (SGBDR-S) tel que PostgreSQL/PostGIS lors du traitement d'un raster unique, un pipeline de déploiement direct et optimisé a été implémenté :

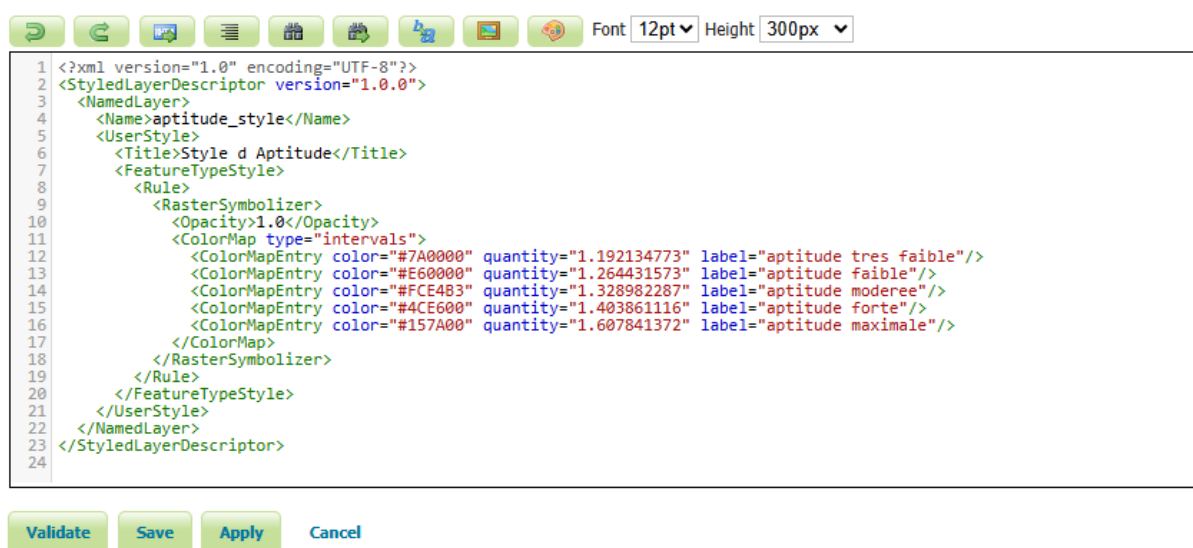
1. **Instanciation de l'Espace de Travail (Workspace)** : Création du conteneur logique isolé nommé SolarGis, centralisant l'espace de nommage (*Namespace*) et garantissant l'interopérabilité des futurs services web associés au projet.

2. Configuration du Magasin de Données (Data Store) : Configuration d'un magasin de type Raster Data Source baptisé **Carte-aptitude**. Ce dernier encapsule directement le fichier matriciel de sortie issu de l'Analyse Multicritère (**MCE-AHP**) au format standardisé GeoTIFF.

3. **Publication et Reprojection Géodésique** : Lors du paramétrage de la couche géographique **aptitude_finale**, **GeoServer** a extrait le système de référence spatiale natif **EPSG:32630** (UTM Zone 30N). Afin de garantir une superposition et une compatibilité parfaites avec les API de cartographie web globales (qui utilisent le tuilage Mercator sphérique), une transformation géodésique à la volée (*Reprojection native to declared*) a été configurée vers le système de coordonnées géographiques universel **EPSG:4326** (WGS 84). Les boîtes englobantes (*Bounding Boxes*) ont été calculées dynamiquement, fixant l'emprise géographique de la commune d'Es-Sénia entre les longitudes -0.707° et -0.590° et les latitudes 35.602° et 35.686°

À l'état brut, le **GeoTIFF** source est encodé sur un seul canal de pixels réels de **32 bits (GRAY_INDEX)**. Lors de la première publication, la couche s'affichait exclusivement sous forme d'un gradient continu en nuances de gris, dénué de toute valeur sémantique pour un utilisateur final. Pour restituer les classes discrètes d'aptitude définies en amont par la logique AHP, un descripteur de style personnalisé au format **SLD (Styled Layer Descriptor 1.0.0)** a été intégralement programmé sous l'identifiant **solar_color_ramp**.

Le code source XML structurant ce style s'appuie sur la balise **<ColorMap>** paramétrée en mode intervals. Ce choix algorithmique permet d'intercepter la valeur numérique continue du pixel et de lui appliquer une rupture visuelle nette afin de discrétiser l'espace en 5 classes thématiques :



```
1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <StyledLayerDescriptor version="1.0.0"
3   <NamedLayer>
4     <Name>aptitude_style</Name>
5     <UserStyle>
6       <Title>Style d Aptitude</Title>
7       <FeatureTypeStyle>
8         <Rule>
9           <RasterSymbolizer>
10             <Opacity>1.0</Opacity>
11             <ColorMap type="intervals">
12               <ColorMapEntry color="#7A0000" quantity="1.192134773" label="aptitude tres faible"/>
13               <ColorMapEntry color="#E60000" quantity="1.264431573" label="aptitude faible"/>
14               <ColorMapEntry color="#FCE483" quantity="1.328982287" label="aptitude moderee"/>
15               <ColorMapEntry color="#4CE600" quantity="1.403861116" label="aptitude forte"/>
16               <ColorMapEntry color="#157A00" quantity="1.607841372" label="aptitude maximale"/>
17             </ColorMap>
18           </RasterSymbolizer>
19         </Rule>
20       </FeatureTypeStyle>
21     </UserStyle>
22   </NamedLayer>
23 </StyledLayerDescriptor>
24
```

Figure 21 : Fichier Styled Layer Descriptor (SLD) utilisé pour la représentation cartographique de la couche d'aptitude photovoltaïque

Grâce à cette feuille de style cartographique, le canevas de pixels abstraits est converti côté serveur en une carte thématique sémiologiquement rigoureuse, prête à être diffusée via le protocole standardisé **WMS (Web Map Service 1.1.1)**.

3-1-2- Ingénierie Front-End : Développement de l'Interface Utilisateur

L'interface utilisateur de la plateforme **SolarGIS** a été développée suivant une approche d'architecture logicielle épurée et performante (*Vanila Web Architecture*). L'application s'appuie exclusivement sur les technologies web natives, évitant l'intégration de frameworks lourds pour garantir des temps de réponse minimaux :

- **HTML5** : Structuration sémantique de la page, optimisation des métadonnées SEO (mots-clés, descriptions, auteurs) et balisage Open Graph (og:title, og:type) favorisant l'indexation et le partage institutionnel de l'application.

```
1 <!DOCTYPE html>
2 <html lang="fr">
3 <head>
4   <meta charset="UTF-8">
5   <title>SolarGIS | Smart Solar Site Selection Platform</title>
6   <meta name="description" content="SolarGIS is a WebGIS platform designed to identify optimal locations for solar panel installation in Es Sen
7   <meta name="keywords" content="GIS, solar energy, web mapping, ArcGIS, spatial analysis, renewable energy, Algeria, geospatial, SolarGIS">
8   <meta name="author" content="Sbaa Malek">
9   <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
10  <link rel="icon" type="image/png" href="logo.jpg">
11
12  <meta property="og:title" content="SolarGIS - Smart Solar Site Selection">
13  <meta property="og:description" content="A GIS-based platform for analyzing and selecting optimal solar energy installation sites.">
14  <meta property="og:type" content="website">
15
```

Figure 22 : Extrait du code HTML définissant la structure de l'interface WebGIS SolarGIS

- **CSS3 Avancé** : Implémentation d'une charte graphique immersive de type *Dark-Tech* utilisant des variables globales (:root) pour standardiser la palette de couleurs. L'interface applique les concepts modernes du *Glassmorphic Design* via des propriétés de transparence (rgba) et de filtrage d'arrière-plan (backdrop-filter: blur(10px)). Un accent particulier a été mis sur la fluidité d'affichage du conteneur cartographique #map en forçant ses propriétés structurelles (position: relative, z-index: 1, display: block) afin d'éradiquer les conflits classiques d'empilement de couches (*fractionnement ou disparition des tuiles*) propres aux API cartographiques imbriquées.

```

# style.css > *q*
1 .root {
2   --bg-dark: #02040a;
3   --accent-gold: #f5a623;
4   --btn-blue: #1d4ed8;
5   --btn-amber: #f59e0b;
6   --btn-gray: #f2f2f2;
7   --glass: rgba(5, 8, 15, 0.8);
8 }
9
10 * {
11   margin: 0;
12   padding: 0;
13   box-sizing: border-box;
14 }
15
16 body {
17   background-color: var(--bg-dark);
18   color: #fff;
19   font-family: 'Inter', sans-serif;
20   overflow-x: hidden;
21 }
22

```

Figure 23 : Déclaration des variables globales dans le bloc :root

```

100
101 /* --- MAP SECTION --- */
102 section { padding: 80px 10%; }
103
104 .glass-panel {
105   background: rgba(255, 255, 255, 0.02);
106   border: 1px solid rgba(255, 255, 255, 0.05);
107   padding: 30px; border-radius: 20px;
108   backdrop-filter: blur(5px);
109 }
110
111 .section-title { font-family: 'Orbitron'; margin-bottom: 25px; text-align: center; }
112
113 #map {
114   height: 480px !important;
115   width: 100% !important;
116   border-radius: 12px;
117   margin-bottom: 25px;
118   display: block !important;
119 }
120
121 .btn-group { display: flex; justify-content: center; gap: 15px; flex-wrap: wrap; }
122
123 .m-btn {
124   padding: 12px 24px; border: none; border-radius: 8px; color: #fff;
125   font-weight: 700; cursor: pointer; transition: 0.3s; font-size: 0.85rem;
126   display: flex; align-items: center; gap: 8px;
127 }
128

```

Figure 24 : Code CSS de la section de la carte et du conteneur #map section

```

103 .glass-panel {
104   background: rgba(255, 255, 255, 0.02);
105   border: 1px solid rgba(255, 255, 255, 0.05);
106   padding: 30px; border-radius: 20px;
107   backdrop-filter: blur(5px);
108 }
109

```

Figure 25 : Style Glassmorphism des panneaux d'affichage de l'interface

```

/* --- NAVBAR --- */
nav {
  position: fixed; top: 0; width: 100%; height: 75px;
  display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;
  padding: 0 8%; z-index: 1000;
  background: linear-gradient(to bottom, rgba(2,4,10,0.95), transparent);
  backdrop-filter: blur(10px);
  border-bottom: 1px solid rgba(255,255,255,0.05);
}

```

Figure 26 : Style Glassmorphism de la barre de navigation supérieure

- **JavaScript:** Prise en charge exclusive de l'asynchronisme, de l'écoute d'événements utilisateur et des calculs technico-économiques embarqués.

Le cœur cartographique de l'application est orchestré par la bibliothèque open-source Leaflet.js (v1.9.4). L'initialisation de l'environnement spatial se fait par le centrage de la vue sur la commune d'Es-Sénia aux coordonnées géographiques [35.645, -0.615] avec un niveau de zoom initial de 12. La superposition des informations cartographiques s'organise en deux niveaux :

- **La couche de référence (Basemap)** : Appel des tuiles vectorielles du projet collaboratif OpenStreetMap (OSM), fournissant en arrière-plan la trame topographique, le réseau routier et les repères urbains de la wilaya d'Oran.

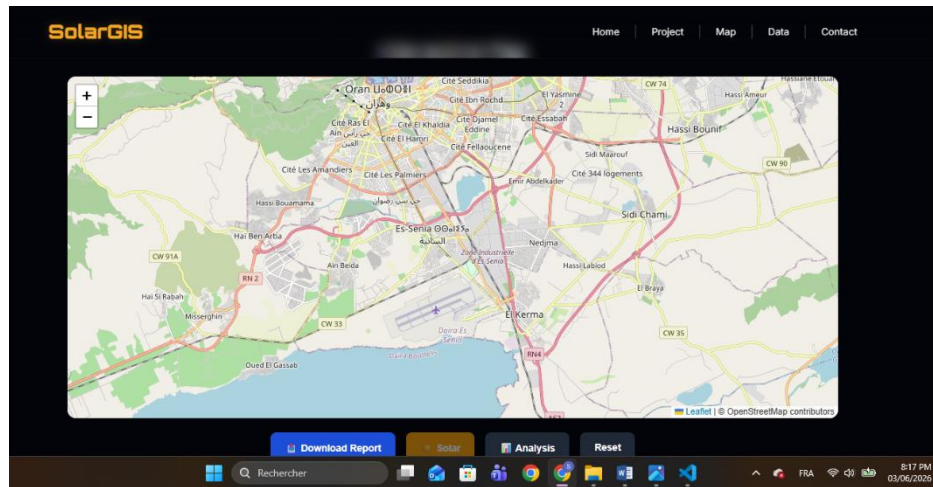


Figure 27 : Interface utilisateur de l'application SolarGIS avec le fond de plan OpenStreetMap

- **La couche métier (Overlay)** : Consommation dynamique du flux WMS provenant de l'instance locale de GeoServer. La liaison est établie via la méthode `L.tileLayer.wms` pointant vers l'URL (<http://localhost:8080/geoserver/SolarGis/wms>). La configuration logicielle impose le format (**image/png**), active la transparence (`transparent: true`) et fixe l'opacité à **0.75** permettant d'observer par transparence le tissu urbain d'OpenStreetMap sous la carte d'aptitude.

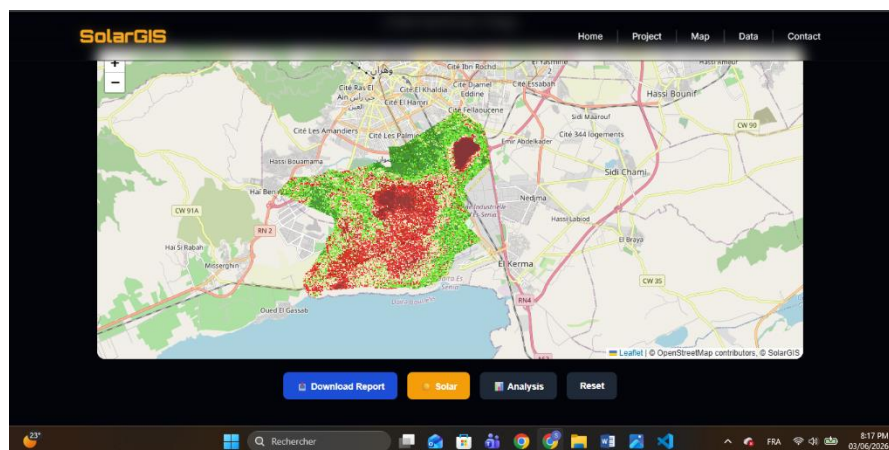


Figure 28 : Affichage dynamique de la couche d'aptitude (Overlay WMS) sur l'interface SolarGIS

L'utilisateur dispose de commandes interactives lui permettant de piloter l'affichage. Un écouteur d'événements (`addEventListener`) branché sur le bouton "Solar" intercepte le clic pour vérifier la présence de la couche à l'aide de la fonction d'état `map.hasLayer()`.

Si la couche est active, elle est retirée (`map.removeLayer()`) et l'opacité du bouton est réduite à 50 % ; dans le cas inverse, elle est réinjectée au sommet de la pile cartographique, assurant un contrôle total de la visibilité des données.

3-1-3- Implémentation du Moteur d'Analyse Spatiale et Financière (SAD)

La valeur ajoutée de la plateforme **SolarGIS** réside dans sa transformation d'un simple visualiseur cartographique en un véritable **Système d'Aide à la Décision (SAD)**. Le script JavaScript implémente un module d'interrogation spatial couplé à un interpréteur algorithmique et financier.

A. Requêtage Spatial Asynchrone par protocole WMS GetFeatureInfo

L'activation du mode "**Analysis**" fait basculer une variable booléenne (`modeAnalyseActif`) et modifie dynamiquement le style CSS du bouton (changement vers un vert émeraude #10b981 associé à un effet d'ombrage *box-shadow* pour indiquer l'état actif). Une fois ce mode activé, l'application écoute les clics de l'utilisateur sur la carte via la fonction `map.on('click')`.

Lors du clic, le script récupère les coordonnées géographiques exactes (`e.latlng`) et convertit ce point spatial en coordonnées de pixels relatives au conteneur écran de l'affichage (`map.latLngToContainerPoint`). Simultanément, l'emprise courante de la carte est extraite sous forme de chaîne de caractères (`bounds.toBBoxString()`). Ces variables permettent de formuler une requête standardisée **WMS GetFeatureInfo** transmise de manière asynchrone au serveur GeoServer via l'API native `fetch()` :

```
const urlGFI = `${geoserverUrl}?` + new URLSearchParams({
  request: 'GetFeatureInfo',
  service: 'WMS',
  version: '1.1.1',
  layers: 'SolarGis:aptitude_finale',
  styles: '',
  format: 'image/png',
  transparent: 'true',
  bbox: bounds.toBBoxString(),
  height: size.y,
  width: size.x,
  srs: 'EPSG:4326',
  query_layers: 'SolarGis:aptitude_finale',
  info_format: 'application/json',
  x: Math.round(point.x),
  y: Math.round(point.y)
});
```

Figure 29 : Script JavaScript de configuration de la requête WMS GetFeatureInfo

En spécifiant le paramètre **info_format**: 'application/json', GeoServer n'envoie pas une image, mais un objet de données structuré. Le script intercepte la réponse, extrait le tableau d'entités (**data.features**) et isole la valeur brute du pixel stockée sous la propriété **GRAY_INDEX**. Si l'utilisateur clique en dehors de l'emprise du raster d'Es-Sénia, le tableau est vide et une info-bulle (**L.popup**) avertit immédiatement l'opérateur.

B. Algorithme d'Évaluation Technico-Économique embarqué

Dès que la valeur numérique du score AHP (scoreAHP) est validée, le programme JavaScript bascule dans une structure conditionnelle descendante (if / else if). Cette section du code transpose les plages mathématiques de l'analyse spatiale en un diagnostic technique complet, et effectue une simulation économique en temps réel :

Tableau 7 : Paramètres d'évaluation technico-économique et indicateurs de rentabilité du modèle

Score AHP	Classe	Contraintes principales	Investissement	Productivité	Amortissement
0.949–1.192	Très faible	Inondations, fortes pentes, instabilité	Non recommandé	0	Jamais
1.192–1.264	Faible	Zones instables, coûts élevés	Très élevé	1200 MWh/ha	14–16 ans
1.264–1.328	Modérée	Pente moyenne, contraintes urbaines	Modéré	1450 MWh/ha	9–11 ans
1.328–1.404	Forte	Faible pente, bon ensoleillement	Optimal	1680 MWh/ha	6–7 ans
>1.404	Excellente	Terrain plat, GHI élevé	Minimal	1850 MWh/ha	5 ans

Toutes ces variables calculées à la volée sont instantanément injectées dans un template de code HTML dynamique pour alimenter une Popup Leaflet personnalisée fixée au point de coordonnée cliqué. Parallèlement, l'ensemble de ces informations est stocké en mémoire vive au sein d'un objet global structuré nommé currentAnalysisData.

C. Automatisation des Livrables de Décision via jsPDF

Pour matérialiser cette analyse, l'application intègre la bibliothèque **jsPDF (v2.5.1)**. Lorsqu'un utilisateur clique sur le bouton " **Download**

Report", le programme vérifie la présence de données dans l'objet `currentAnalysisData`. Si une analyse est active, le moteur jsPDF s'instancie en arrière-plan, extrait les variables mémorisées (Coordonnées, Score AHP exact, Diagnostic territorial, Indicateurs d'investissement et temps de retour sur investissement) et orchestre la mise en page automatisée d'un rapport officiel au format PDF.

Cet outil offre aux ingénieurs, investisseurs et planificateurs locaux de la commune d'Es-Sénia la possibilité de générer, sur le terrain ou en bureau d'étude, des fiches d'aide à la décision technique et financière en un seul clic, connectant directement l'analyse spatiale géographique aux réalités économiques des projets d'énergies renouvelables

Conclusion

En conclusion, ce troisième chapitre a permis de concrétiser notre démarche méthodologique par une analyse spatiale multidimensionnelle et opérationnelle du territoire de la commune d'Es-Sénia. Grâce à l'articulation technologique entre le calcul Cloud sous **Google Earth Engine (GEE)** et la puissance d'analyse du Système d'Information Géographique **ArcMap**, nous avons pu transformer des données satellitaires brutes en un modèle d'aide à la décision robuste pour l'aménagement énergétique.

L'application de la méthode **AHP de Saaty** a permis une hiérarchisation rigoureuse des critères physiques, environnementaux et techniques, validée par un ratio de cohérence satisfaisant de **7,28 %**. Cette modélisation a abouti à une carte d'aptitude finale qui segmente le territoire en zones de potentiel photovoltaïque distinctes, confirmant que la synergie entre les sols nus périphériques et les surfaces bâties (zone industrielle, aéroport) constitue le levier stratégique de la transition énergétique locale.

Par ailleurs, l'analyse environnementale approfondie, centrée sur la corrélation entre les îlots de chaleur urbains (**UHI**) et l'indice de végétation (**NDVI**), a mis en évidence le rôle crucial des espaces naturels, tels que le lac de **Dhayet El-Morsli**, dans la régulation du stress thermique communal. Enfin, le développement de la plateforme **SolarGIS**, alliant **Leaflet.js**, **GeoServer** et **jsPDF**, marque le passage d'une analyse statique à un outil décisionnel dynamique, offrant aux acteurs locaux une capacité d'expertise technique et financière immédiate et spatialisée.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale :

Face aux enjeux croissants de la transition énergétique et à la nécessité de diversifier les sources de production électrique, l'exploitation du potentiel solaire constitue aujourd'hui une priorité stratégique pour de nombreux pays, notamment l'Algérie qui dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. Cependant, la réussite des projets photovoltaïques dépend largement de la qualité du choix des sites d'implantation, lequel nécessite la prise en compte simultanée de multiples paramètres environnementaux, topographiques et climatiques.

Dans ce contexte, le présent travail avait pour objectif principal d'identifier les zones les plus favorables à l'implantation des panneaux solaires au sein de la commune d'Es-Senia à travers une approche intégrant les Systèmes d'Information Géographique (SIG), l'analyse multicritère AHP et les technologies WebGIS.

La première étape de cette recherche a consisté à établir un cadre théorique et conceptuel permettant de comprendre les fondements de l'énergie solaire, les facteurs influençant le rendement photovoltaïque ainsi que les apports des SIG dans les processus d'aide à la décision territoriale. L'analyse de la littérature a montré que le couplage entre les SIG et les méthodes multicritères constitue aujourd'hui l'une des approches les plus pertinentes pour la planification énergétique durable.

La seconde étape a porté sur la mise en place de la méthodologie géomatique. Sept critères physiques et environnementaux ont été retenus, à savoir le rayonnement solaire global horizontal (GHI), la pente, l'exposition des versants, l'occupation du sol, l'indice de végétation NDVI, la température de l'air et la température de surface du sol [Habes, 2021; Akhrouf et Derghoum, 2022]. L'application de la méthode AHP a permis de hiérarchiser ces critères et d'attribuer des poids relatifs reflétant leur influence sur l'aptitude des sites à accueillir des installations photovoltaïques.

L'analyse spatiale réalisée sous environnement SIG a conduit à l'élaboration d'une carte d'aptitude mettant en évidence les secteurs les plus favorables de la commune. Les résultats obtenus démontrent que certaines zones présentent des conditions particulièrement avantageuses grâce à une combinaison optimale entre un fort potentiel solaire, une topographie adaptée, des températures relativement modérées et une faible sensibilité environnementale. À l'inverse, les zones urbanisées denses, les espaces à forte couverture végétale ainsi que les secteurs présentant des contraintes physiques importantes apparaissent moins favorables à l'implantation de projets photovoltaïques.

Au-delà de la cartographie d'aptitude, cette étude a également permis de développer un prototype WebGIS basé sur les technologies GeoServer et Leaflet. Cette plateforme offre une visualisation interactive des résultats et facilite l'accès aux données géographiques pour les décideurs, les collectivités locales et les différents acteurs du secteur énergétique [Chakhar, 2006]. Elle démontre l'intérêt des solutions WebGIS comme outils modernes de diffusion cartographique et d'aide à la décision territoriale.

Les résultats obtenus confirment globalement les hypothèses formulées au début de la recherche. Ils montrent notamment que l'intégration des paramètres thermo-climatiques améliore la précision de l'évaluation du potentiel photovoltaïque, que l'analyse multicritère associée aux SIG permet une identification objective des zones favorables, et que la diffusion des résultats à travers une interface WebGIS renforce leur accessibilité et leur valorisation opérationnelle.

Malgré ces résultats encourageants, certaines limites doivent être soulignées. L'étude repose principalement sur des données environnementales et physiques et n'intègre pas certains paramètres socio-économiques, fonciers, réglementaires ou financiers susceptibles d'influencer la faisabilité réelle des projets. De même, les pondérations attribuées dans la méthode AHP conservent une part de subjectivité inhérente à toute approche multicritère.

En définitive, ce travail démontre l'efficacité du couplage entre les SIG, l'analyse multicritère et les technologies WebGIS pour la planification spatiale des projets photovoltaïques à l'échelle locale. Il constitue une contribution méthodologique pouvant servir de référence pour d'autres communes algériennes souhaitant valoriser leur potentiel solaire dans une perspective de développement durable et de transition énergétique.

En perspectives, ce travail pourrait être enrichi par l'intégration de modèles prédictifs basés sur l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique afin d'améliorer l'identification des zones favorables à l'implantation photovoltaïque et d'anticiper l'évolution des paramètres environnementaux. L'intégration de nouvelles variables, notamment les critères économiques, fonciers, réglementaires et socio-économiques, permettrait également d'obtenir une évaluation plus complète de la faisabilité des projets solaires. Par ailleurs, l'extension de la zone d'étude à l'échelle de la wilaya d'Oran, voire à d'autres régions du territoire national, contribuerait à renforcer la portée opérationnelle du modèle proposé. Enfin, le développement du prototype WebGIS par l'ajout de fonctionnalités d'analyse avancée, de mise à jour dynamique des données et d'outils d'aide à la décision constituerait une perspective prometteuse pour accompagner les acteurs locaux dans la planification énergétique durable.

Références

- ARGILLOS Amal, & BOUBEKEUR Mohammed . (2023). Intégration des sources d'énergie renouvelables en Algérie, Réalisation et perspective. *Modern Economic and Sustainable Development*, 71-83.
- (IEA), I. E. (2011). *Renewable Energy and Energy Efficiency Development Plan 2011-2030 (Algeria)*. Retrieved from IEA Policies and Measures Database: <https://www.iea.org/policies/95-renewable-energy-and-energy-efficiency-development-plan-2011-2030>
- (IRENA), I. R. (2025). *Renewable Energy Statistics 2023*. Retrieved from IRENA: <https://www.irena.org/Statistics>
- Akhrouf, S., & Derghoum, K. (2022). Application des méthodes d'analyse multicritère à la planification urbaine et territoriale. *Revue Algérienne des Sciences Humaines et Sociales*, 112-129.
- Algeria Invest. (2024). Project to build 15 solar power stations: "A new era of clean, sustainable energy", says Boukhalfa Yaïci. *Algeria Invest*.
- Angliviel de La Beaumelle, N., Blok, K., de Chalendar, J., Clarke, L., Hahmann, A., Huster, J., . . . Azevedo, I. (2023). The Global Technical, Economic, and Feasible Potential of Renewable Electricity. *Annual Review of Environment and Resources*, 419-449.
- Chakar, S. (2007). *Cartographie décisionnelle multicritère : Formalisation et implémentation informatique*. Paris: Université Paris Dauphine.
- Chen Jong, F., & Mohamud Ahmed, M. (2024). Multi-Criteria Decision-Making Solutions for Optimal Solar Energy Sites Identification: A Systematic Review and Analysis. *IEEE Access*, 143458-143484.
- CREG. (s.d.). Programme national EnR. creg.gov.dz, 1.
- Database, C. P. (2020, 11). *Renewable Energy and Energy Efficiency Development Plan 2011-2030 (Algeria)*. Retrieved from Climate Policy Database: <https://climatepolicydatabase.org/policies/renewable-energy-and-energy-efficiency-development-plan-2011-2030>
- Djediane Ilham. (2023 – 2024). *Analyse du développement solaire photovoltaïque et modélisation du groupements de consommateurs propres a « la wilaya de*. Oran: Université D'Oran 02 Faculté de la science De la terre Et l'univers GEOGRAPHIE ET AMENAGEMENT DE TERRITOIRE.
- El Amraoui Sidi Mohamed, Rouchdi Mohamed, Mourad Bouziani, & El Idrissi Abdelwahed. (May 2017). Integration of gis and multicriterial hierarchical analysis for aid in urban planning: Case study of khemisset province, Morocco. *Papeles de Geografía*, 71–90.
- Energy News Africa Plus. (2024, 3 20). *Algeria Launches 15 Solar Plants, Boosting Renewable Energy Drive*. Retrieved from Energy News Africa Plus: <https://energynews.africa/>
- Esri. (s.d.). *Qu'est-ce qu'un SIG ?* Récupéré sur esri.com: <https://www.esri.com/fr-fr/what-is-gis/overview>

- Fotsing Metegam, I. (2025). An MCDM-GIS based site suitability analysis for solar power plant integration in Cameroon: Solar hybridization to optimize green electricity and hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23-51.
- Groupe Sonelgaz. (2020). *Plan de développement 2021-2030*. Récupéré sur Sonelgaz: <https://www.sonelgaz.dz/fr/835/plan-de-developpement-2021-2030>
- Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for Europe, Africa and Northern Asia. *Solar Energy*, 1803-1815.
- Jacek Malczewski. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York.
- Janke, J. R. (2010). Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renewable Energy*, 2228-2234.
- Joshi, M., Dixit, S., Nikhade, S., & Talodhikar, V. (2025). Solar Site Selection: A Novel Normalized Expert Strictness for Tailored Evaluation in Decision-Making (NESTED) Approach. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 567-574.
- Lamia, H. S. (2021). *SIG et méthode AHP pour la prévision en planification urbaine*. Tébéssa: Université Larbi Tebessi .
- Meghouache, L. (s.d.). *Cours SIG et Base de données*. Université Frères Mentouri - Constantine 1.
- Ministère de la Transition écologique. (2018, août 6). *Solaire*. Récupéré sur [ecologie.gouv.fr](https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/solaire): <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/solaire>
- Ministère de l'Énergie et des Mines. (2011). Programme national des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique 2011-2030. *Bulletin officiel*, 29_31.
- Nations Unies. (s.d.). *Les énergies renouvelables : qu'est-ce que c'est ?* Récupéré sur [un.org](https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy): <https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy>
- République Algérienne Démocratique et Populaire. (2025). Journal officiel de la République algérienne démocratique et populaire n° 13. *Journal officiel de la République algérienne démocratique et populaire*.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill.
- SER, S. (2024). *Document interne*. Sonelgaz Énergies Renouvelables.
- Solargis. (2024). *Global Solar Atlas 3.0: Technical report*. World Bank Group.
- Sylvie Bernier, Sylvie Duthoit, Sylvie Ladet, & Denis Baudet. (2014). Les concepts de base des Systèmes d'Information Géographique (SIG) : les données et les fonctions générales. *Cahier des Techniques de l'INRA*, 19-27.
- Tahar, D. L., & Fares, M. K. (s.d.). *La pratique de l'analyse multicritères dans la prise de décision administrative: l'intégration la méthode d'aide à la* .
- Vincke Phillipe. (1989). *L'aide à la décision multicritère*. BRUXELLE: l'Université de Bruxelles.

Watson, J., & Hudson, M. (2015). Regional scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation. *Landscape and Urban Planning*, 20_30.