



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

Implantation des sites de forage des puits d'eau à
l'aide d'un SIG et des AMC.
Cas d'étude : le plateau de Mostaganem.

Réalisé et présenté par les étudiants :

M^r Ellaout Ahmed Oussama.

M^{lle} Djelaila Meriem.

Sous la direction de : **M^{me} Soraya SIDI YKHLEF.**

Devant le jury composé de :

M^r BENDIB Abdelhalim	Professeur	Université d'Oran 2 – Mohamed Ben Ahmed	Président
M^{me} SIDI YKHLEF Soraya	MAA	Université d'Oran 2 – Mohamed Ben Ahmed	Encadrante
M^{me} KHALFAOUI Houria	MAA	Université d'Oran 2 – Mohamed Ben Ahmed	Examinatrice

Année universitaire 2025/2026

Résumé :

Cette étude vise à optimiser l'implantation de forages hydrogéologiques durables sur le plateau de Mostaganem (Algérie) pour le compte de la startup *Eye Tech Water*. La méthodologie repose sur l'intégration des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de l'Analyse Multicritère Floue (Fuzzy AHP). Dix critères hydrogéologiques, morpho-topographiques et socio-économiques ont été standardisés et croisés via un algorithme personnalisé (*Fuzzy AHP Overlay Locator*). Pour sécuriser l'aquifère, une contrainte automatisée d'espacement radial minimal de 500 mètres a été intégrée via ArcGIS afin d'éviter l'interférence des cônes de rabattement. Les résultats démontrent la supériorité incontestable de l'approche floue, qui génère un continuum spatial fluide éliminant les "faux positifs" des méthodes conventionnelles (Somme Pondérée et AHP classique). Le modèle a isolé chirurgicalement les véritables sites d'excellence (*Sweet Spots*), garantissant l'absence totale de chevauchement entre les zones tampons de sécurité. Enfin, ce flux de travail a été déployé au sein d'une plateforme web interactive permettant aux clients de détourner dynamiquement leurs parcelles pour déclencher l'analyse, offrant ainsi une solution d'ingénierie clé en main, hautement rentable et protectrice de la ressource hydrique.

Abstract:

This study aims to optimize the siting of sustainable hydrogeological boreholes on the Mostaganem plateau (Algeria) for the startup **Eye Tech Water**. The methodology is based on integrating Geographic Information Systems (GIS) with Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP). Ten hydrogeological, morpho-topographical, and socio-economic criteria were standardized and combined using a custom-developed algorithm (*Fuzzy AHP Overlay Locator*). To secure the aquifer, an automated technical constraint enforcing a minimum radial spacing of 500 meters between wells was integrated via ArcGIS to prevent drawdown cone interference. The results demonstrate the undeniable superiority of the fuzzy approach, which generates a smooth spatial continuum that eliminates "false positives" produced by conventional methods (Weighted Sum and classical AHP). The model surgically isolated the true sites of excellence (*Sweet Spots*), ensuring zero overlap between safety buffer zones. Finally, this workflow was deployed within an interactive web platform, allowing clients to dynamically trace their land plots to trigger spatial analysis, thereby delivering a turnkey engineering solution that is highly profitable and protective of water resources.

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين اختيار مواقع حفر آبار المياه الجوفية المستدامة على مستوى هضبة مستغانم (الجزائر) لصالح المؤسسة الناشئة **Eye Tech Water**. تعتمد المنهجية على دمج نظم المعلومات الجغرافية (SIG) والتحليل متعدد المعايير الضبابي (Fuzzy AHP). تم توحيد وتقاطع عشرة معايير هيدروجيولوجية، مورفولوجرافية، واجتماعية-اقتصادية عبر أداة برمجية مخصصة (*Fuzzy AHP Overlay Locator*). ولحماية الحامل المائي، تم إدراج شرط تقني مؤتمت يفرض مسافة أمان نصف قطرية لا تقل عن 500 متر بين الآبار باستخدام برنامج ArcGIS لمنع تداخل مخاريط الانخفاض الديناميكي. أظهرت النتائج التفوق الواضح للمقاربة الضبابية، والتي أنتجت تدرجاً مكانياً مستمراً قضي على "الإيجابيات المزيفة" التي خلفتها الطرق التقليدية (المجموع الموزون والـ AHP الكلاسيكي). نجح النموذج في عزل "نقاط التميز المطلق" (*Sweet Spots*) جراحياً، مع ضمان عدم تداخل هوامش الأمان الدائرية. أخيراً، تم دمج هذا التدفق العملي في منصة إلكترونية تفاعلية تتيح للعملاء رسم حدود أراضيهم ديناميكياً لتفعيل نظام التحليل المكاني، مما يوفر حلاً هندسياً جاهزاً للاستخدام، عالي الربحية، ومحافظةً على الثروة المائية.

Sommaire

Introduction générale.....	1
I.1 Introduction.	3
I.2 Concepts théoriques sur les ressources en eau souterraine et le forage.....	4
I.2.1 Définition des eaux souterraines :	4
I.2.2 Importance stratégique des eaux souterraines.	4
I.2.3 Le forage :	5
I.3 La zone d'étude.....	8
I.3.1 Situation Géographique et Topographie :	8
I.3.2 Climatologie de la zone d'étude	10
I.3.3 Les caractéristiques géologique de la zone d'étude	10
I.3.4 Caractéristiques litho-stratigraphiques :	11
I.3.5 Étude structurale : Cette section examine l'architecture des strates et les déformations qu'elles ont subies :	11
I.3.6 Les caractéristiques hydrogéologique de la zone d'étude :	12
I.4 Conclusion	13
II.2 Introduction.....	15
II.2 Les Systèmes d'Information Géographique (SIG)	16
II.2.1 Définition des SIG]	16
II.2.2 Les composantes des SIG	16
II.2.3 Fonctionnalités des SIG les 5A	17
II.2.4 Modélisation cartographique et analyse de surface (Raster/Vecteur)	18
II.3 L'aide à la décision et l'Analyse Multi-Critère (AMC).....	21
II.3.1 Définition de l'analyse multicritère	21
II.3.2 Concepts généraux de l'Analyse Multicritère.....	21
II.3.3 L'importance de l'AMC dans le choix des sites de forage.....	21
II.3.4 Définition de l'AHP.....	22
II.3.4.1 Limites de l'AHP traditionnel dans la gestion de l'incertitude	22
II.4 La logique floue et l'Approche fuzzy AHP.....	22
II.4.1 Principes de la logique floue (Fuzzy Logic)	22
II.4.2 Les fonctions d'appartenance et la transformation des données	23
II.5 Intégration SIG-AMC-Fuzzy	24

II.5.1 Architecture du modèle hybride : Intégration SIG-AMC-Fuzzy	24
II.5.2 Le rôle des SIG dans la préparation des critères de décision.....	25
II.5.3 Synthèse et perspectives du modèle hybride.....	25
II.6 Conclusion.....	25
III.1 Introduction	28
III.2 Détermination et justification des critères	28
III.2.1 Critères hydrogéologiques (Le potentiel aquifère)	28
III.2.2 Critère morpho-topographiques (La dynamique de surface).....	33
III.2.3 Critère logistiques et socio-économiques (Accessibilité et Rentabilité)	40
III.3 Numérisation et préparation des couches de données.....	44
III.3.1 Géoréférencement et numérisation	45
III.3.2 Interpolation spatiale des données ponctuelles	45
III.3.3 Extraction des dérivés topographiques à partir du MNT (DEM).....	45
III.3.4 Standardisation et rastérisation	46
III.4 Le fonctionnement des trois méthodes (weighted sum, AHP, Fuzzy AHP).....	46
III.4.1 La méthode Weighted Sum (Somme pondérée) sous ArcMap	46
III.4.2 La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) ou Processus d'Hiérarchie Analytique [21]	47
III.4.3 La méthode Fuzzy AHP (Approche Floue Hiérarchique)	47
III.5 Conclusion	50
IV Introduction.....	52
IV.2 Architecture de la plateforme digitale " <i>Eye Tech Water</i> "	52
IV.3 Résultats cartographique	56
IV.3.1 Résultats de la méthode Weighted sum	56
IV.3.2 Résultats de la méthode AHP.....	60
IV.3.3 Application de la méthode FuzzyAHP	65
IV.4 Extraction des sites de forage optimaux respectant la contrainte de distancement Inter-Puits	70
IV.4.1 Protocole d'extraction géospatiale des sites d'excellence (Sweet Spots)	71
IV.5 Conclusion	76
Conclusion Générale	78
Références documentaires.	79
I. Références Bibliographiques.	79
II. Webographie.....	79

Liste Figures

Figure I.1 : La localisation du plateau de Mostaganem.....	8
Figure II.1 : Les composantes des SIG.....	16
Figure II.2 : Fonctionnalités des SIG les 5A.....	17
Figure II.3 : Modèle de raster (format matriciel)	18
Figure II.4 : Représentation du modèle vectoriel.....	18
Figure II.5 : La différence entre modèle de raster et vecteur.....	21
Figure II.6 : Les nombres flous triangulaires.....	23
Figure III.1 : La lithologie de plateau de Mostaganem.....	28
Figure III.2 : La lithologie de plateau de Mostaganem reclassé.....	28
Figure III.3 : Densité des linéaments du plateau de Mostaganem.....	28
Figure III.4 : Densité des linéaments du plateau de Mostaganem reclassé.....	33
Figure III.5 : Densité du drainage du plateau de Mostaganem.....	33
Figure III.6 : Densité du drainage du plateau de Mostaganem reclassé.....	34
Figure III.7 : Indice d'Humidité Topographique de plateau de Mostaganem.....	35
Figure III.8 : Indice d'Humidité Topographique de plateau de Mostaganem reclassé....	37
Figure III.9 : La pente de plateau de Mostaganem.....	38
Figure III.10 : La pente de plateau de Mostaganem reclassé.....	38
Figure III.11 : L'Altitude du plateau de Mostaganem.....	39
Figure III.12 : L'Altitude du plateau de Mostaganem reclassé.....	40
Figure III.13 : L'Aspect du plateau de Mostaganem.....	41
Figure III.14 : L'Aspect du plateau de Mostaganem reclassé.....	41
Figure III.15 : Distance au réseau électrique du plateau de Mostaganem.....	42
Figure III.16 : Distance au réseau électrique du plateau de Mostaganem reclassé.....	42
Figure III.17 : Distance des pistes de plateau de Mostaganem.....	43
Figure III.18 : Distance des pistes de plateau de Mostaganem reclassé.....	43
Figure III.19 : Occupation du sol de plateau de Mostaganem.....	44
Figure III.20 : Occupation du sol de plateau de Mostaganem reclassé.....	44
Figure III.21 : Les coordonnées des forages.....	45
Figure III.22 : Pseudo-code de l'algorithme d'intégration et d'analyse spatiale floue (Fuzzy AHP)développé pour l'outil Fuzzy AHP Overlay Locator.....	47
Figure IV.1 : Interface d'accueil principale de la plateforme digitale Eye Tech Water....	52

Figure IV.2 : Interface d'authentification et de connexion sécurisée à l'espace utilisateur.....	52
Figure IV.3 : Tableau de bord utilisateur et catalogue des services de cartographie décisionnelle..	52
Figure IV.4 : Interface de connexion administrateur.....	53
Figure IV.5 : Notification de succès de la soumission et transfert automatique des données vers le système de traitement géomatique.....	53
Figure IV.6 : Emplacement de l'outil Weighted Sum dans l'extension Spatial Analyst.....	56
Figure IV.7 : Exemple d'échelle d'évaluation discrète (1 à 9) des critères reclassés.....	56
Figure IV.8 : Intégration des critères et l'application des coefficients de pondération de l'outil Weighted Sum.....	56
Figure IV.9 : Carte du potentiel en eau souterraine du plateau de Mostaganem par la méthode standard de la Somme Pondérée (Weighted Sum).....	56
Figure IV.10 : Structuration hiérarchique du problème décisionnel hydrogéologique sous l'extension AHP.....	60
Figure IV.11 : Interface de saisie et d'ajustement de la matrice de comparaison par paires selon l'échelle de Saaty.....	60
Figure IV.12 : Vecteur des poids générés et validation de la cohérence globale ($CR = 0$).....	60
Figure IV.13 : Carte du potentiel en eau souterraine du plateau de Mostaganem par l'approche décisionnelle classique AHP.....	64
Figure IV.14 : Intégration de l'outil développé Fuzzy AHP Overlay Locator dans ArcToolbox.....	66
Figure IV.15 : Interface de saisie unifiée associant les rasters et la matrice floue triangulaire.....	67
Figure IV.16 : Console de suivi du script Python illustrant la défloutation des poids et la superposition cellulaire.....	68
Figure IV.17 : Rapport de finalisation de l'outil avec succès et modélisation cartographique.....	68
Figure IV.18 : Carte d'implantation et de favorabilité hydrogéologique continue générée par l'outil développé Fuzzy AHP Overlay Locator.....	69
Figure IV.19 : Requêtage spatial conditionnel pour l'isolement des pixels optimaux via l'outil Raster Calculator.....	71
Figure IV.20 : Extraction et intégration des indices de favorabilité flous dans la table attributaire.....	72
Figure IV.21 : Paramétrage de la tolérance d'intégration spatiale à 500m sous l'environnement ArcGIS.....	73
Figure IV.22 : Carte comparative composite (Points d'implantation extraits avec zones tampons).....	74

Introduction générale

Introduction générale

Les ressources en eau souterraine représentent un pilier stratégique pour le développement socio-économique et la sécurité hydrique mondiale, particulièrement dans les régions semi-arides subissant de profonds bouleversements climatiques. En Algérie, le plateau de Mostaganem (750 km²) fait face à une pression anthropique intense, marquée par une exploitation agricole et industrielle effrénée de son aquifère. Face à la multiplication des forages anarchiques, les méthodes d'exploration traditionnelles sur le terrain montrent leurs limites techniques, opérationnelles et financières, menant souvent à des échecs d'implantation ou à l'assèchement prématuré des nappes par l'interférence des cônes de rabattement.

L'émergence de la géomatique moderne offre aujourd'hui des perspectives révolutionnaires. Le couplage des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de l'Analyse Multicritère (AMC) s'impose comme une approche d'ingénierie incontournable pour modéliser la complexité des milieux hydrogéologiques. Cependant, l'exploration des données souterraines est intrinsèquement liée à une forte part d'incertitude et de subjectivité humaine que l'analyse déterministe classique peine à intégrer de manière fluide.

C'est dans cette optique que s'inscrit notre projet de fin d'études, qui porte à la fois une ambition scientifique et une vision entrepreneuriale à travers la startup **"Eye Tech Water"**. L'objectif principal de cette étude est de développer un outil informatique personnalisé basé sur la logique floue (**Fuzzy AHP Overlay Locator**) pour optimiser et sécuriser l'implantation des futurs forages hydriques sur le plateau de Mostaganem.

Pour aborder cette problématique, notre manuscrit est structuré en quatre chapitres complémentaires :

- Le premier chapitre : pose le cadre théorique des ressources en eau et présente les caractéristiques géographiques et hydrogéologiques de la zone d'étude.
- Le deuxième chapitre : examine les concepts fondamentaux des SIG, de l'Analyse Multicritère et les fondements de la logique floue.
- Le troisième chapitre : est dédié à la structuration de notre base de données spatiale (10 critères) et à la programmation algorithmique de notre outil personnalisé.
- Le quatrième chapitre : concrétise la simulation cartographique, confronte notre modèle aux méthodes classiques (Somme Pondérée, AHP) et valide le déploiement opérationnel via notre plateforme web interactive.

Chapitre I : Ressources en Eau et Zone d'Étude.

I.1 Introduction.

Les eaux souterraines constituent la principale et la plus influente composante des masses d'eau sur les continents, représentant 99 % des eaux douces liquides de la planète. Cette ressource revêt une importance stratégique capitale, fournissant de l'eau potable à la moitié de la population mondiale et contribuant à une hauteur de 43 % à l'irrigation. La gestion durable de cette richesse « cachée » est donc essentielle pour relever les défis posés par la croissance démographique mondiale, qui devrait atteindre 11 milliards d'habitants d'ici 2100.

Ce chapitre est divisé en deux parties. En premier lieu il aborde le concept théorique des ressources en eau, en définissant l'« aquifère » comme une unité de stockage rocheuse capable de produire des quantités d'eau utilisables, et en examinant le rôle vital que jouent ces réservoirs dans l'équilibre écologique et le réapprovisionnement des rivières et des oasis. On présentera aussi les aspects techniques du forage de puits, les méthodes modernes telles que le forage rotatif au forage fond de trou (DTH), avec une analyse détaillée des difficultés géologiques et techniques susceptibles d'entraver le succès de ces opérations, comme la stabilité des parois du puits ou la contamination des eaux souterraines.

Suivra après une présentation des caractéristiques géographiques spécifiques de notre zone d'étude qui est le plateau de Mostaganem, une zone de 750 km² au climat méditerranéen semi-aride. L'étude vise à analyser la structure géologique complexe du plateau, composée de couches miocènes et pliocènes reposant sur des formations quaternaires très perméables. Cette présentation examinera les caractéristiques hydrogéologiques de la principale nappe phréatique (calabrienne) et ses mécanismes de recharge, compte tenu des préoccupations actuelles quant à l'insuffisance de la recharge annuelle pour compenser les prélèvements, menaçant ainsi l'épuisement des réserves accumulées. Cette compréhension approfondie de l'environnement physique et technique permettra de définir les critères fondamentaux de sélection des sites de forage optimaux, garantissant la durabilité de la ressource en eau et sa protection contre la pollution et la salinisation.

I.2 Concepts théoriques sur les ressources en eau souterraine et le forage.

I.2.1 Définition des eaux souterraines : [1]

Les eaux souterraines sont la fraction significative de la masse d'eau présente sur les continents. Elles sont logées dans des aquifères sous la surface de la Terre. Le volume d'eau souterraine est beaucoup plus important que la masse d'eau retenue dans les lacs ou en circulation.

Une eau souterraine occupe la zone de saturation, de l'eau douce située sous la surface de la terre dans les espaces des sols poreux et dans les fractures de formations rocheuses. Une unité de stockage en roches ou un dépôt meuble est appelé un aquifère quand il peut produire une quantité d'eau utilisable.

La profondeur à laquelle les pores du sol ou des fractures et des cavités dans la roche deviennent complètement saturées d'eau est appelée la nappe phréatique. Dans un sens étroit, l'expression ne s'applique qu'à l'eau se trouvant en dessous du niveau hydrostatique. L'eau thermale est une eau souterraine étudiée en phréatobiologie. D'autres eaux naturelles souterraines sont étudiées en hydrologie, hydrochimie et hydrogéologie.

Bien qu'inférieure aux plus grands glaciers, les masses d'eaux souterraines les plus étendues peuvent atteindre un million de kilomètres carrés ou plus (comme l'aquifère Guarani en Amérique du Sud). L'eau souterraine est une ressource importante qui est fournie à un tiers de la population mondiale mais difficile à gérer en raison de sa sensibilité à la pollution et à la surexploitation.

I.2.2 Importance stratégique des eaux souterraines. [2]

a. Les eaux souterraines et l'humanité :

Les eaux souterraines sont une source d'approvisionnement en eau vitale pour l'humanité. Elles fournissent de l'eau potable en tout ou en partie à 50 % de la population mondiale et représentent 43 % de toute l'eau utilisée pour l'irrigation.

Dans le monde, 2,5 milliards de personnes dépendent uniquement des ressources en eaux souterraines pour satisfaire leurs besoins quotidiens de base en eau. La population mondiale de près de 8 milliards d'habitants en 2020 devrait atteindre 11 milliards d'ici 2100.

Les humains devront apprendre à produire suffisamment de nourriture sans détruire le sol, l'eau et le climat. C'est ce qu'on a appelé le plus grand défi auquel l'humanité ait été confrontée. La gestion durable des eaux souterraines est au cœur de la solution.

La compréhension scientifique et la bonne gestion des eaux souterraines sont essentielles, car les eaux souterraines peuvent atténuer le problème si nous recherchons leur utilisation et leur reconstitution responsables.

b. Les eaux souterraines et la Terre :

Bien que cachées sous la surface de la Terre, les eaux souterraines constituent 99 % de l'eau douce liquide de la Terre et jouent un rôle important dans le cycle de l'eau.

Les rivières, les lacs et les zones humides sont des manifestations de surface des eaux souterraines. Ces milieux échangent leur débit avec le réservoir d'eau souterraine, qui les alimente en cas de besoin et absorbe une partie de leur flux lorsque l'eau de surface est en excès.

Les eaux souterraines contrôlent également de nombreuses caractéristiques à la surface de la Terre. La profondeur de la nappe phréatique est en partie responsable des différentes espèces végétales occupant différentes positions le long des pentes d'une colline à l'autre, car seules les plantes tolérantes à la sécheresse peuvent vivre sur les flancs secs des collines et les plantes tolérantes à l'eau vivent près des ruisseaux. La dissolution des roches carbonatées par l'écoulement des eaux souterraines crée des grottes et des dolines.

Dans les environnements désertiques, l'écoulement des eaux souterraines forme des oasis, qui fournissent des habitats aux animaux et aux plantes.

I.2.3 Le forage : [3]

Le forage des puits est le processus consistant à créer un trou étroit et profond dans le sol à l'aide d'un équipement spécialisé. Ces forages, ou puits, sont construits pour une large gamme d'applications, allant de l'accès aux ressources souterraines comme l'eau, le gaz naturel et le pétrole, à la réalisation d'enquêtes géotechniques et d'évaluations environnementales.

Les méthodes de forage et les machines utilisées varient considérablement en fonction des conditions géologiques et de l'objectif du forage, mais elles servent toutes l'objectif fondamental d'atteindre et d'extraire ou d'étudier ce qui se trouve sous la surface de la Terre.

a. Types des forages

Le forage de puits englobe plusieurs méthodes distinctes, chacune adaptée aux conditions géologiques et aux exigences du projet. Le choix de la technique de forage dépend de facteurs tels que le type de sol ou de roche, la profondeur souhaitée et l'objectif du forage. La technologie moderne a permis le développement de méthodes de forage hautement efficaces, capables de pénétrer diverses formations, des sédiments meubles aux roches dures, tandis que les méthodes plus anciennes et plus traditionnelles restent utiles dans certains contextes. Les types de forage de puits les plus courants sont :

a.1 Forage rotatif : C'est l'une des méthodes les plus courantes, utilisant un foret rotatif pour percer le sol. Efficace dans une grande variété de formations, elle est souvent utilisée pour les puits en eau profonde et l'exploration pétrolière et gazière.

a.2 Forage à câble (forage à percussion) : Une méthode ancienne, mais toujours d'actualité, qui utilise un foret lourd, semblable à un ciseau, que l'on laisse tomber à plusieurs reprises pour écraser la roche. Fiable pour percer la roche dure, elle est souvent utilisée pour les projets de petite envergure.

a.3 Forage à la tarière : Cette technique utilise une vis hélicoïdale (tarière) pour forer le sol. Elle est particulièrement adaptée aux sols meubles et cohésifs et constitue une méthode simple et rapide pour les forages peu profonds.

a.4 Forage fond de trou (DTH) : Cette méthode utilise un puissant marteau percutant placé au bas du train de tiges pour briser la roche dure. Elle est très efficace pour forer des formations rocheuses difficiles et atteindre des taux de pénétration rapides.

a.5 Forage à circulation inverse (RC) : Variante du forage rotatif qui utilise un système à double tube pour amener les déblais à la surface à l'intérieur de la tige de forage, permettant un échantillonnage continu et précis. Ce type de forage est couramment utilisé pour l'exploration minière.

b. Les défis de l'implantation des forages : [4]

b.1 Défis géologiques et hydrogéologiques : La nature des formations rocheuses et des sols constitue le principal obstacle à la réussite du forage.

- Incertitude structurale : Difficulté à prédire avec précision l'emplacement des aquifères et la présence de sel ou de couches contaminées.
- Stabilité des parois du puits : Risque d'effondrement du sol pendant le forage, notamment dans les formations sableuses non consolidées.
- Perte de circulation de forage : Absorption du fluide de forage par la formation rocheuse, entravant le refroidissement et l'évacuation des déblais.

b.2 Défis techniques et logistiques : Ces défis concernent la qualité du matériel et la précision de l'exécution hydraulique.

- Corrosion et effondrement : L'interaction des eaux souterraines avec les canalisations métalliques ou l'encrassement des crépines par le calcaire ou des dépôts bactériens réduit la durée de vie du puits.
- Déviations verticale : Maintenir la verticalité du puits à grande profondeur pour faciliter l'installation de la pompe.
- Isolation de la formation : Garantir l'absence de contamination de la formation cible par les eaux provenant des couches supérieures (cimentation). [5]

b.3 Défis environnementaux et durabilité : Le défi réside non seulement dans le forage, mais aussi dans la protection de la ressource en eau elle-même.

- Surexploitation : Risque de baisse du niveau des nappes phréatiques due à un pompage excessif, pouvant entraîner l'assèchement des puits voisins.
- Salinisation : Dans les zones côtières, le forage non réglementé provoque l'intrusion d'eau de mer dans les sources d'eau douce.
- Pollution de surface : Risque de transport de polluants depuis la surface par la tête de puits si celle-ci n'est pas correctement étanche. [6]

b.4 Défis socio-économiques :

- Coût élevé et rentabilité : Équilibrer le coût du forage profond et la probabilité de trouver un débit suffisant.
- Maintenance durable : De nombreux puits tombent en panne dans les régions en développement faute de pièces de rechange ou d'expertise locale pour la maintenance après le départ de l'équipe de forage. [7]

I.3 La zone d'étude

Le choix du Plateau de Mostaganem comme zone d'étude repose sur plusieurs critères d'ordre géographique, géologique et socio-économique. Sur le plan structural, cette région présente une grande complexité tectonique, caractérisée par une alternance de horsts et de grabens au sein du domaine tello-rifain, offrant ainsi un cadre idéal pour analyser la dynamique des reliefs et de l'orogénèse alpine. De plus, sa position stratégique en Oranie centrale, bordée par la Méditerranée et de grandes plaines comme celle de Relizane et de la Macta, en fait un espace d'interface crucial où se croisent des enjeux majeurs d'aménagement du territoire, de gestion des ressources naturelles et d'expansion urbaine.

I.3.1 Situation Géographique et Topographie :

Le plateau de Mostaganem se trouve en Oranie centrale, à la limite NE du littoral oranais. Il s'étend sur 750 km². Il est bordé à l'ouest par la Méditerranée et les massifs littoraux oranais (Montd'Arzew, Montagne des Lions et Murdjadjo) ; au nord, par le bas Chélif ; à l'est, par la vallée de la Mina, affluent du bas Chélif, et la plaine de Relizane, limitée elle-même par l'Ouarsenis ; enfin au sud, par la Macta et les Béni Chougrane. Tous ces reliefs appartiennent, sur le plan structural, au domaine tello-rifain lequel appartient à la zone externe de l'orogénèse alpine (Fenet, 1975). Ces reliefs sont tous des horsts séparés par des zones effondrées, grabens ou fossés tectoniques, comme la plaine de la Macta ou celle de Relizane.

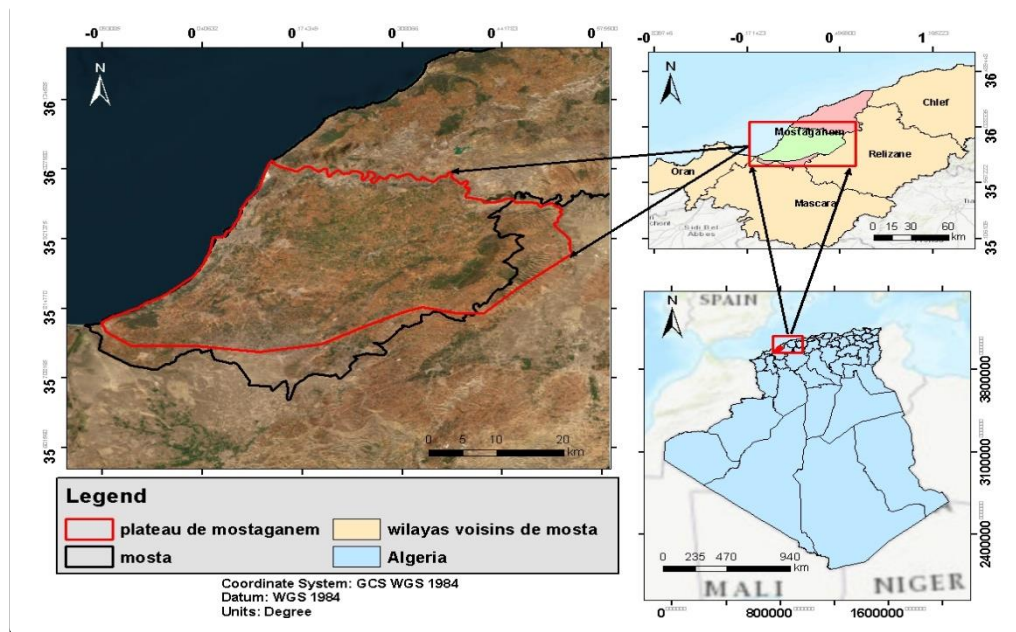


Figure I.1 : La localisation du plateau de Mostaganem.

En bordure de la mer méditerranée, le plateau de Mostaganem se présente comme une aire tabulaire, comprise entre la vallée du Chélif au Nord, la dépression de la Mactaa au Sud,

enfin la vallée de la Mina et les Monts de Bel Hacel à l'Est. Ce plateau s'abaisse régulièrement vers l'Ouest en direction de la plaine de l'Habra et du Golfe d'Arzew. Il comporte une série de rides et de dépressions parallèles orientées Sud-Ouest/Nord-Est, dont l'altitude voisine 200 m, s'abaisse progressivement jusqu'à 100 m au niveau de la Mactaa. Au Nord, le plateau surplombe régulièrement la basse vallée du Chélif, montrant une suite de falaises dont les hauteurs varient de 150 m à 200 m. Au Nord-Est, il vient buter sur l'éperon crétacé du Djbel Diss (Dahra) qui culmine à une altitude de 400 m. Au Sud-Est, il est bordé par une ligne de relief matérialisée par les fortes de l'Akboube et d'Ennaro qui le sépare de la plaine de Relizane.

Le plateau de Mostaganem est bien individualisé même si ses limites topographiques sont malaisées à tracer. Il appartient administrativement à la wilaya de Mostaganem, et est couvert par 13 communes. Une grande partie, de l'Oranie, appartient à l'étage méditerranéen bioclimatique semi-aride avec des pluies irrégulières, liées à la variation interannuelle des précipitations. Il est constitué de trois types de formations intéressantes : - Les marnes du Miocène supérieur et du Pliocène inférieur. - Des niveaux à perméabilité variable d'âge Pliocène supérieur : ce sont des micro poudingues, des grès et des sables ou grès jaunâtres. - Des grès, des sables et de la croûte calcaire quaternaire, discordant et dont l'épaisseur varie d'une zone à une autre. De point de vue structural, il est formé d'une suite d'anticlinaux et synclinaux parallèles à la côte, orientée selon une direction principale SW/NE. La structure la plus favorable, qui constitue les réserves en eau, se trouve au point bas des synclinaux qui correspondent à des dépressions – les anticlinaux, quand eux, correspondent à des collines ou bien des djebels qui favorisent l'alimentation en eau des synclinaux. L'étude consiste donc à mettre en évidence les potentialités en eau en s'intéressant plus spécialement aux précipitations qui sont à l'origine de la ressource en eau souterraine et qui sont influencées par la sécheresse qui s'est installée depuis 1977. Ces potentialités sont appelées à être gérées de façon rationnelle pour en éviter l'épuisement de la nappe qui constitue le principal réservoir d'eau de la région de Mostaganem. Actuellement, on craint que l'alimentation annuelle des nappes ne parvienne plus à compenser les prélèvements, et que l'on soit déjà, au stade actuel, entrain de puiser sur les réserves accumulées antérieurement. Des études hydrogéologiques ont été effectuées sur le plateau de Mostaganem par J. Gaucher (1970), par la direction des études du milieu et de la recherche hydraulique (D.E.M.R.H) (1978) et par A. Baiche (2010). Malgré l'insuffisance, parfois le manque de fiabilité de certaines données statistiques, une analyse des caractéristiques fondamentales du climat avec ses irrégularités spatio-temporelles sera tentée à partir des données météorologiques pour les stations suivantes: la station d'Oran-Sénia, de Mostaganem,

de Cap-Falcon et de Mascara. Les données ont été recueillies auprès de l'Office National de Météorologique (O.N.M) à Oran, de la période de 1986 à 1991. Ce sont Oran-Sénia, Mostaganem, Cap Falcon et Mascara. Les lacunes ont été comblées par le calcul des coefficients de corrélation existants entre deux stations voisines et des constantes d'ajustement pour les stations présentant les meilleures corrélations. [8]

I.3.2 Climatologie de la zone d'étude [9] :

Le plateau se caractérise par un régime climatique de type méditerranéen, doux et humide en hiver, sec et chaud en été. La pluviométrie annuelle est fortement irrégulière. L'indice de Martonne $I=11.2$ témoigne d'un climat semi-aride. L'indice sur le niveau de l'évaporation est tangible. En cela, l'évaporation est bien sûr très importante en été (169.4 mm en juillet) qu'en hiver (59.6 mm en février).

Le tableau suivant donne un aperçu global sur le climat de la wilaya de Mostaganem.

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Octo	Nov	Déc
Température moyenne (°C)	10.9	11.4	13.6	16.1	19.4	23.5	26.3	26.9	24	20.6	15.1	12.1
Température minimale moyenne (°C)	7.2	7.5	9.5	11.8	15	18.7	21.5	22.3	20	16.6	11.6	8.6
Température maximale (°C)	15	15.7	18.3	20.8	24.1	28.6	31.7	32.2	28.8	25.3	19	16.1
Précipitations (mm)	56	45	44	38	24	4	1	3	15	34	74	49
Humidité (%)	78%	75%	74%	70%	68%	63%	62%	64%	67%	71%	74%	77%
Heures de soleil (h)	7.3	8.1	9.0	10.1	11.1	11.9	11.9	11.1	10.1	9.0	7.6	7.1

Tableau I.1 : Aperçu global sur le climat de la wilaya de Mostaganem.

- Données 1991 - 2021 : Température minimale moyenne (°C), Température maximale (°C), Précipitations (mm), Humidité.
- Données 1999 – 2019 : Heures de soleil/jours. Une différence de pluviométrie de 73 mm est enregistrée entre le mois le plus sec et le mois le plus humide de l'année. Une variation de 16 °C est constatée sur l'ensemble de l'année

I.3.3 Les caractéristiques géologique de la zone d'étude

a. Formations géologiques : Les formations géologiques du plateau de Mostaganem se divisent en deux unités structurales reflétant l'histoire tectonique de la région :

- **Formations allochtones :** Il s'agit de masses rocheuses qui se sont déplacées sur de longues distances par rapport à leur emplacement d'origine sous l'effet de forces de compression.
 - Nappes de charge : Ces zones constituent des « unités révélatrices » qui ont glissé sur les strates locales. Elles se caractérisent par leur instabilité géologique et sont souvent composées de roches argileuses déformées.
 - Diapyrisme : Ce phénomène correspond à la remontée de roches salines ou argileuses moins denses (souvent d'âge triasique) à travers les strates sus-jacentes, entraînant la déformation des aquifères et la création de barrières qui empêchent l'écoulement de l'eau ou modifient sa salinité.
- **Formations autogènes (autochtones) :** Ce sont des couches qui se sont déposées à leur emplacement actuel et n'ont pas subi de déplacement horizontal significatif. Elles constituent la structure de base des réservoirs souterrains:
 - Miocène : Il représente le substratum. Il est souvent composé de marne bleue dense, qui forme une base imperméable, empêchant l'eau de s'infiltrer en profondeur et permettant la formation de la nappe phréatique au-dessus.
 - Pliocène : Il s'agit d'une importante phase de transition, débutant par des sédiments marins (argile et sable) et se terminant par des sédiments continentaux suite au retrait de la mer. Cette diversité en fait une zone de stockage d'eau secondaire.
 - Quaternaire : Cette période comprend des sédiments récents tels que les sables dunaires, les limons et les formations alluviales. Elle se caractérise par une très forte perméabilité, ce qui en fait la principale zone de recharge, où elle absorbe l'eau de pluie et la transporte vers les couches inférieures.

I.3.4 Caractéristiques litho-stratigraphiques :

Cette section examine la relation entre le type de roche (lithologie) et la stratigraphie :

- Sable et calcaire sableux (Grès) : Ce sont les roches « réservoirs ». Grâce à leur forte porosité, ces roches permettent le stockage de grandes quantités d'eau et sa circulation aisée. Le calcaire sableux de Mostaganem est souvent compact, mais présente des fissures qui augmentent sa perméabilité.
- Argiles et marnes (Marnes) : Ce sont des roches à grain fin. Leur fonction hydrogéologique est celle d'« aquitard/aquiclude ». La présence de couches de marne entre des couches de sable engendre parfois plusieurs niveaux de nappe phréatique (aquifères captifs ou semi-captifs).

I.3.5 Étude structurale : Cette section examine l'architecture des strates et les déformations qu'elles ont subies :

- Limites géographiques et géologiques : Le plateau est bordé au nord par la mer Méditerranée et au sud par les monts Dahra et la plaine du Chelif. Ces limites ne sont pas de simples lignes, mais des zones de contact géologique qui déterminent la direction de l'écoulement de l'eau.
- Les failles : sont des fractures de la croûte terrestre. Sur le plateau de Mostaganem, les failles jouent deux rôles contrastés :
 - Corridors : Elles peuvent servir de chenaux, facilitant la circulation de l'eau entre deux couches différentes.
 - Blocs : Si une faille crée une couche d'argile face à une couche de sable, elle interrompt l'écoulement de l'eau et provoque son accumulation dans une zone. Ceci explique la différence de niveau d'eau entre deux puits, même proches l'un de l'autre.

I.3.6 Les caractéristiques hydrogéologique de la zone d'étude :

a. Le réservoir : Il est formé essentiellement par le Calabrien. Les terrains imperméables du Miocène et du Pliocène inférieur constituent le mur de la nappe. La topographie actuelle reflète bien l'allure du toit du substratum. L'épaisseur du Calabrien est maximum dans les dépressions où elle atteint 100 à 120 m, tandis que sur les reliefs qui correspondent à des bombements du Mio-Pliocène elle est de 20 à 30 mètres seulement. Le tableau 2.2 donne un récapitulatif sur les formations aquifères au niveau du plateau de Mostaganem.

b. Alimentation et exutoires : L'alimentation de la nappe libre du plateau de Mostaganem se fait par :

- Des infiltrations directes dans les zones d'affleurement ;
- Percolation au travers des terrains sus-jacents ;
- Communication (réduite vue la lithologie des terrains) avec les grès, sables argileux et micro poudingue sous-jacents.

Le substratum de l'aquifère est principalement constitué les marnes bleues du Pliocène inférieur. Cependant, dans le cas où une lacune existerait au niveau du Pliocène, le Miocène constitue également un écran imperméable pour la nappe du Calabrien. La plaine de Bordjias, au Sud du plateau, est potentiellement en continuité hydraulique avec celui-ci. Elle constitue alors une partie de l'exutoire des eaux souterraines du plateau. On note également qu'au niveau de cette plaine, les grès calabriens sont saturés et forment une nappe captive.

c. Les aquifères secondaires :

La nappe côtière : Entre la mer et la bordure du plateau existe une zone littorale à recouvrement sableux qui renferme une nappe phréatique. Cette petite nappe est alimentée par la pluviométrie, et par des fuites de la nappe du plateau. D'extension réduite et abondamment exploitée par de nombreux puits fermiers elle a des ressources peu importantes.

La plaine des Bordjias : Au sud de la ligne Ain Nouissy, Blad Touaria débute la plaine d'effondrement des Bordjias. Le Calabrien et les grès du Pliocène s'enfoncent rapidement sous des alluvions à prédominance argileuse. Le Calabrien semble disparaître vers le sud tandis que les grès pliocènes affectés de nombreuses variations de faciès renferment une nappe captive. L'écoulement de cette nappe se fait vers le sud-ouest, son exutoire et ses possibilités sont assez mal connues.

I.4 Conclusion

En conclusion, l'étude analytique présentée dans ce chapitre a démontré que les ressources en eaux souterraines du plateau de Mostaganem sont soumises à des conditions géologiques et hydrogéologiques complexes. Les formations calabraises et le rôle crucial des aquifères libres et captifs contribuent de manière fondamentale à l'approvisionnement en eau. Toutefois, la pression croissante due à la surexploitation, au changement climatique et à la vulnérabilité de la région à la pollution et à la salinisation imposent l'adoption d'une méthodologie scientifique rigoureuse pour la sélection des futurs sites de forage.

Au vu de ces résultats, les études de terrain traditionnelles ne suffisent plus, compte tenu de l'interaction des facteurs géologiques, topographiques et environnementaux. Il est donc urgent de disposer d'outils technologiques avancés capables de traiter ces données spatiales diversifiées. Ce point sera abordé en détail au chapitre 2, où nous examinerons le cadre conceptuel des systèmes d'information géographique (SIG) et de l'analyse multicritères (AMC), outils modernes et efficaces pour la modélisation et l'identification des zones à fort potentiel hydrique, afin de favoriser une prise de décision durable.

Chapitre II : SIG et Analyse Multicritère.

II.2 Introduction

Le choix des sites optimaux pour le forage de puits d'extraction d'eau souterraine représente un défi technique et environnemental nécessitant le traitement d'une immense quantité de données disparates. Ce chapitre vise à présenter le cadre méthodologique et technique adopté dans cette étude, lequel repose sur l'intégration de la technologie géographique aux modèles mathématiques pour l'aide à la décision.

L'étude commence par l'identification des Systèmes d'Information Géographique (SIG), qui sont des systèmes intégrés reliant les données de localisation (Où ?) aux informations descriptives (Quoi ?), offrant ainsi un environnement analytique capable de comprendre des relations spatiales complexes. Nous y examinerons la différence entre la modélisation vectorielle (Vector) et la modélisation matricielle (Raster), ainsi que la manière de transformer les données hydrogéologiques brutes en « couches thématiques » géoréférencées.

Dans la deuxième partie, nous aborderons l'Analyse Multicritère (AMC), qui constitue le moteur mathématique permettant d'organiser le processus de prise de décision en équilibrant les alternatives et les pondérations attribuées à chaque critère (tels que la perméabilité, la pente et la profondeur). Étant donné que les données souterraines sont souvent marquées par l'incertitude, l'accent sera mis sur la Logique Floue (Fuzzy Logic). Cette approche permet de passer d'une logique binaire stricte (0 ou 1) à une logique flexible imitant le raisonnement humain, où l'aptitude d'un site est exprimée par des « degrés d'appartenance » linguistiques et mathématiques. L'objectif final de ce chapitre est de construire un modèle hybride (SIG-AMC-Fuzzy) garantissant la transformation de l'observation géographique en une décision scientifique objective, réduisant ainsi les risques d'échec lors des opérations de prospection.

II.2 Les Systèmes d'Information Géographique (SIG)

II.2.1 Définition des SIG [10]

Un Système d'Information Géographique (SIG) est un système qui crée, gère, analyse et cartographie tous les types de données. Le SIG connecte des données à une carte et intègre aux données de localisation (où se trouvent les choses) tous types d'informations descriptives (à quoi ressemblent les choses à cet endroit). Cela constitue la base de la cartographie et de l'analyse utilisées en sciences et dans presque tous les secteurs. Le SIG aide les utilisateurs à comprendre des modèles, des relations et un contexte géographique. Une meilleure communication, une efficacité accrue et l'amélioration de la gestion et de la prise de décision figurent au nombre des avantages qu'il présente.

II.2.2 Les composantes des SIG [11]

- **Matériel** : Le matériel SIG fait référence aux appareils physiques nécessaires pour exécuter un logiciel SIG et stocker de grandes quantités de données spatiales. Cela inclut les ordinateurs, les serveurs, les unités GPS et même les drones.

- **Logiciel** : Le logiciel est l'endroit où la magie opère. Cela inclut les applications et programmes utilisés pour saisir, stocker, récupérer, gérer, analyser et visualiser des données géospatiales. Les logiciels SIG populaires incluent ArcGIS, QGIS et GRASS GIS.

- **Données** : Les données sont l'élément vital du SIG. Il peut s'agir de vecteurs (points, lignes et polygones) ou matriciels (basés sur une grille, comme les images satellite). Les données peuvent représenter n'importe quoi, depuis les types d'utilisation des terres, la répartition de la population jusqu'à la propagation des maladies.

- **Personnes** : Ce sont les personnes qui gèrent les systèmes SIG : les cartographes, les analystes, les géomètres sur le terrain et les décideurs.

- **Méthodes** : Les méthodes font référence aux procédures et techniques utilisées pour collecter, analyser et présenter des données spatiales. C'est le « comment » du SIG, qui guide les processus et les opérations.

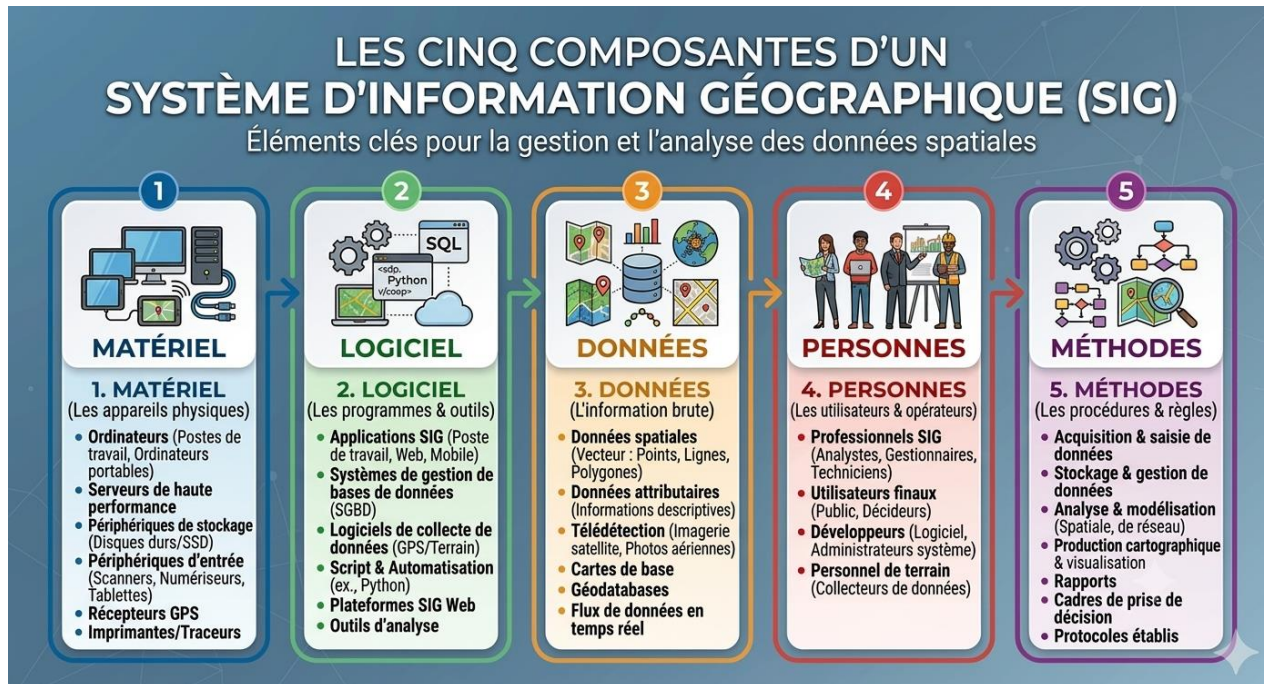


Figure II.1 : Les composantes des SIG.

II.2.3 Fonctionnalités des SIG les 5A [12]

- **Abstraction** : créer un modèle qui structure les données en fonction de leurs composants géométriques et de leurs attributs descriptifs, ainsi que de définir les relations entre les objets.
- **Acquisition** : fournir des données au SIG. Les fonctions d'apprentissage impliquent d'une part l'entrée de la forme géométrique des objets.
- **Archivage** : sauvegarde des données manipulées de manière organisée et structurée dans une base de données, afin de faciliter leur accès.
- **Analyse** : Répondre aux interrogations posées à un SIG "Requêtes", ce qui transforme un SIG en un tableau de bord cartographique et un outil d'aide à la prise de décision.
- **Affichage** : Afficher pour percevoir les relations spatiales entre objets et pour visualiser les données tout en faisant lien avec leurs localisations spatiales, un mode hyper texte peut être retenu.



Figure II.2 : Fonctionnalités des SIG les 5A.

II.2.4 Modélisation cartographique et analyse de surface (Raster/Vecteur) [13]

La modélisation cartographique repose sur l'Abstraction, qui consiste à créer un modèle structurant les données selon leurs composants géométriques et leurs attributs descriptifs. Elle définit également les relations logiques entre les objets pour représenter fidèlement la réalité.

L'analyse de surface exploite deux modes de données :

- **Modèle de raster (format matriciel) :**

Le modèle raster (ou format matriciel) est le modèle le plus simple d'utilisation. Il divise l'ensemble de la zone étudiée en une grille de cellules régulières. Cette grille représente une subdivision continue et régulière de la zone. Chaque cellule est un carré de taille fixée appelé pixel, représentant l'unité élémentaire de ce type de stockage. Chaque pixel est identifié par une valeur particulière modélisant un ensemble d'attributs (alphanumériques) de l'information géographique étudiée.

Chaque pixel possède des coordonnées de la forme (i,j) (indice de la ligne et indice de la colonne). La saisie des données se fait par l'intermédiaire d'un scannér de la surface

de la Terre en utilisant des satellites ou des caméras numériques ou à partir d'un scannérisation d'autres supports de données (photographies aériennes, orthophotographies, cartes, etc...)

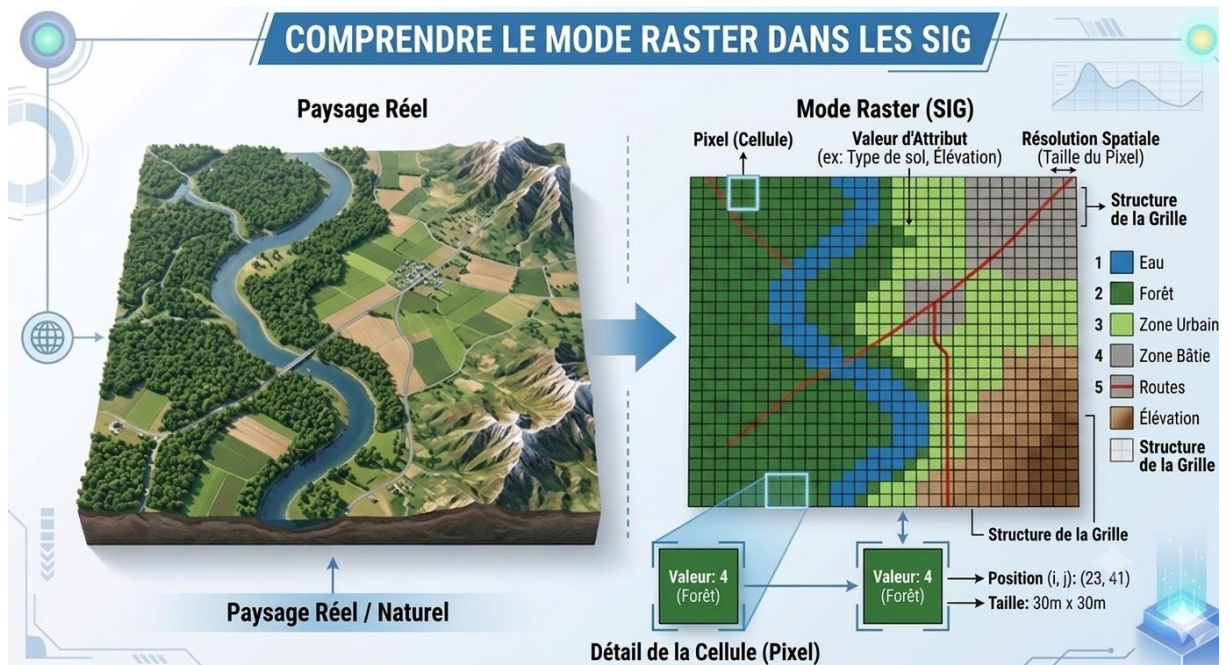


Figure II.3 : Modèle de raster (format matriciel).

- Modèle de Vecteur

Dans les données vectorielles, la partie spatiale de l'information est codée sous forme de points, de lignes ou de polygones géo référencés.

- Point : est désigné par ses coordonnées et à la dimension spatiale la plus petite.
- Ligne : a une dimension spatiale constituée d'une succession de points proches les uns des autres.
- Polygone (zone ou surface) : est un élément de surface défini par une ligne fermée ou la ligne qui le délimite.

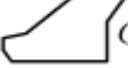
Exemples	Information géographique	Traduction en mode vecteur
 <i>Maison</i>  <i>Château d'eau</i>	ponctuelles	×
 <i>Route</i>  <i>Cours d'eau</i>	linéaires	
 <i>Parcelle</i>  <i>Commune</i>	surfaciques	

Figure II.4 : Représentation du modèle vectoriel. [14]

La différence entre modèle de raster et vecteur

Mode vecteur	Mode raster
Volume de stockage compact	Volume de stockage important
Structure des données complexe	Structure des données simple
Mise en œuvre facile des relations topologiques de voisinage	Mise en œuvre difficile de la topologie
« Saisie » possible des objets	On ne « saisit » que des pixels
Il peut être difficile de se repérer sur une sortie brute des données	Les cartes et photos scannées sont interprétables comme les originales
Ne contient que les informations spécifiées	Exhaustivité des photographies raster
Adapté aux objets discrets	Adapté aux objets ayant une limite floue
Croisement thématique plus complexe	Croisement thématique simple

Figure II.5 : La différence entre modèle de raster et vecteur. [14]

Cette étape d'Analyse est cruciale car elle transforme les données brutes en un outil d'aide à la prise de décision. Enfin, l'Affichage permet de visualiser ces résultats et de percevoir les relations spatiales entre les objets.

II.3 L'aide à la décision et l'Analyse Multi-Critère (AMC) [15]

II.3.1 Définition de l'analyse multicritère

« Analyse multicritère, également connue sous le nom de MCDM (Multi-Criteria Decision Making) est une méthode d'évaluation qui porte sur la prise de décisions impliquant plusieurs critères. Elle est particulièrement utilisée pour déterminer la solution optimale parmi un ensemble d'options, en prenant en compte diverses perspectives. »

II.3.2 Concepts généraux de l'Analyse Multicritère

Dans l'analyse multicritère, plusieurs concepts clés doivent être compris pour une bonne utilisation. Voici quelques-uns des plus importants :

Critères : Ils représentent les dimensions ou attributs mesurables utilisés pour évaluer les alternatives.

Alternatives : Ce sont les différentes options disponibles parmi lesquelles il faut choisir.

Pondérations : Elles expriment l'importance ou la préférence de chaque critère dans l'ensemble du processus de décision.

L'objectif est d'obtenir une solution qui maximise ou minimise un ensemble d'objectifs tout en tenant compte des différentes pondérations données à chaque critère. Par exemple ces éléments sont généralement exprimés par des modèles mathématiques pour résoudre les problèmes décisionnels.

II.3.3 L'importance de l'AMC dans le choix des sites de forage. [16]

L'importance de l'Aide Multi-critère à la Décision (AMC) réside dans son rôle indispensable pour pallier les limites des méthodes d'exploration traditionnelles lors de l'implantation des forages. Elle permet de structurer un processus décisionnel complexe en intégrant des données hétérogènes (hydrodynamiques, opérationnelles et environnementales). L'originalité de cette approche dans l'étude tient à son couplage avec la logique floue, qui permet de traiter l'imprécision et l'incertitude inhérentes aux données souterraines via des variables linguistiques. Alors que le SIG assure une présélection spatiale, l'AMC intervient pour classer les sites potentiels et optimiser le choix final. En résumé, elle transforme l'observation

géographique en une décision robuste et fiable, garantissant ainsi un compromis idéal entre la productivité du forage, son coût et la pérennité de la ressource en eau.

II.3.4 Définition de l'AHP

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) est une méthode de décision multicritères qui utilise des comparaisons par paires et des concepts mathématiques et psychologiques pour évaluer différents facteurs et prendre des décisions dans des situations complexes. Développée par Saaty en 1970, elle a depuis été largement étudiée et utilisée dans divers domaines tels que le commerce, l'industrie, la santé, l'éducation et l'administration publique. L'AHP consiste à convertir des données qualitatives en valeurs quantitatives.

II.3.4.1 Limites de l'AHP traditionnel dans la gestion de l'incertitude

- **Lourdeur des Comparaisons** : Le nombre de comparaisons par paires augmente rapidement ($n*(n-1)/2$), ce qui peut devenir fastidieux et chronophage.
- **Subjectivité des Jugements** : Les jugements initiaux restent intrinsèquement subjectifs. La qualité des résultats dépend de l'expertise des décideurs.
- **Renversement de Rang** : L'ajout ou suppression d'une alternative non pertinente peut modifier le classement des alternatives existantes.
- **Dépendance à la Structure** : La pertinence des résultats est liée à la qualité de la décomposition hiérarchique.
- **Incertitude non Gérée** : L'AHP classique ne gère pas directement l'incertitude des jugements

II.4 La logique floue et l'Approche fuzzy AHP

II.4.1 Principes de la logique floue (Fuzzy Logic) [17]

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965, en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, nous permettons à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux.

Dans ce cas, la logique floue accorde une flexibilité très appréciable aux raisonnements qu'elle utilise, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes. Dans la logique binaire une variable ne peut prendre que deux valeurs vraie (1) ou fausse (0). Les propositions énoncées en prémisses d'une règle et en conclusion ne peuvent être, dans ce cas, que totalement vraies ou bien totalement fausses (si P alors C). Contrairement, la logique floue proche du raisonnement humain ne suit pas la logique basée sur le (vrai) ou le (faux). C'est une

logique linguistique, floue ou approximative. Les valeurs de vérité sont des mots du langage courant plutôt vrai, presque faux, etc.

II.4.2 Les fonctions d'appartenance et la transformation des données

Dans le cadre de la logique floue, la fonction d'appartenance représente l'élément fondamental permettant d'assurer la transition entre les données réelles (crisp) et les concepts flous. Elle définit la manière dont chaque point de l'espace d'entrée est associé à un degré d'appartenance compris entre 0 et 1. Pour la sélection des sites de forage, le choix de la forme de cette fonction est crucial car il reflète la sensibilité de chaque critère hydrogéologique ou physique par rapport à l'objectif de décision.

II.4.2.1 Les nombres flous triangulaires (TFN – Triangular Fuzzy Numbers)

Le nombre flou triangulaire est le cas particulier le plus utilisé dans ce processus. Il s'agit d'un type de nombre flou (L-R) où les fonctions L et R sont linéaires. Un TFN est défini par un triplet (a_1, a_2, a_3) , et sa fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ est donnée par :

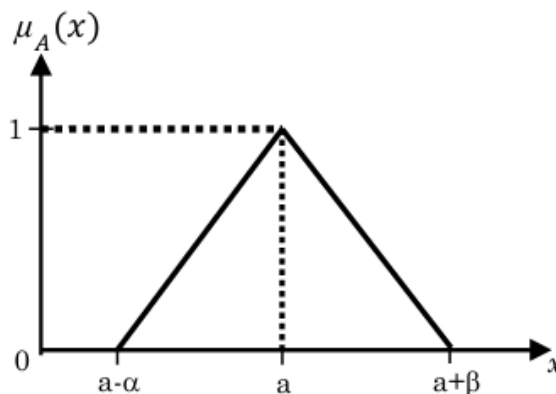


Figure II.6 : Les nombres flous triangulaires.

Où $[a_1, a_3]$ représente l'intervalle de confiance et $[a_2]$ la valeur modale (le sommet). Cette fonction est privilégiée pour modéliser des critères ayant une valeur optimale précise, où la pertinence du site diminue linéairement dès que l'on s'éloigne de ce sommet.

II.4.4.2 Autres types de fonctions d'appartenance

Outre la forme triangulaire, d'autres fonctions sont utilisées selon la nature des critères :

- **La fonction Trapézoïdale** : Elle est utilisée pour représenter des critères dont la zone de "faisabilité maximale" n'est pas un point unique mais un intervalle $[a, b]$. C'est une extension de la fonction triangulaire offrant plus de flexibilité pour des paramètres tels que la pente ou la lithologie.
- **La fonction Gaussienne** : Caractérisée par sa forme en cloche, elle permet d'exprimer une transition douce et continue des degrés d'appartenance, idéale pour modéliser des phénomènes naturels complexes sans seuils de rupture brusques.
- **La fonction Sigmoidale (en S)** : Particulièrement utile pour les critères de type "plus c'est grand, mieux c'est" (comme le débit) ou "plus c'est petit, mieux c'est" (comme la distance aux sources de pollution).

En somme, l'intégration de ces fonctions dans un système d'information géographique (SIG), via les outils d'analyse spatiale fuzzy membership, permet de transformer les cartes de paramètres hydrogéologiques hétérogènes en cartes de probabilité standardisées. Cette étape est essentielle pour produire la carte finale de convenance de forage.

II.5 Intégration SIG-AMC-Fuzzy

II.5.1 Architecture du modèle hybride : Intégration SIG-AMC-Fuzzy

L'approche méthodologique adoptée dans cette étude repose sur la conception d'un Système d'Aide à la Décision Spatiale (SADS) hybride. Ce modèle combine la puissance de traitement des Systèmes d'Information Géographique (SIG) avec la flexibilité de l'Analyse Multi-Critère (AMC) en environnement flou. La structure de ce modèle se décline en trois phases opérationnelles majeures.

- a. **Le processus de Fuzzification des critères** : Afin de pallier l'imprécision inhérente aux données hydrogéologiques et topographiques, nous avons procédé à une "fuzzification". Cette étape consiste à transformer les valeurs réelles (mesures physiques) en degrés d'appartenance flous compris entre $[0 \text{ et } 1]$. Ce passage par des variables linguistiques permet de mieux refléter la réalité du terrain où les limites entre une zone "favorable" et "peu favorable" ne sont jamais nettes.
- b. **L'intégration SIG-Fuzzy AHP** : L'originalité de cette architecture réside dans l'utilisation de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) dans un contexte flou. Contrairement à l'AHP classique, cette variante utilise des nombres flous triangulaires (TFN) pour pondérer les critères (débit, transmissivité, pente, etc.). Cela permet de capturer l'incertitude du jugement expert lors de la comparaison par paire des paramètres.
- c. **La superposition floue (Fuzzy Overlay)** : La phase finale consiste à réaliser une synthèse cartographique par superposition floue. Contrairement à la superposition pondérée traditionnelle, le Fuzzy Overlay analyse les relations d'interdépendance entre toutes les couches de critères reclassées. Ce mécanisme permet d'identifier avec précision

les zones de forte potentialité en eaux souterraines, en produisant une carte de convenance finale qui minimise les risques d'erreur lors de l'implantation des forages.

II.5.2 Le rôle des SIG dans la préparation des critères de décision

Le rôle des SIG dans la préparation des critères de décision réside dans leur capacité à transformer des données hydrogéologiques et environnementales brutes en "couches thématiques" géoréférencées. Les SIG permettent d'intégrer et de manipuler divers critères (tels que la perméabilité, la profondeur de la nappe et la proximité des réseaux) pour générer des cartes d'aptitude. En outre, ils jouent un rôle crucial dans l'identification des zones de contraintes, permettant d'exclure les sites techniquement ou juridiquement non conformes. Ainsi, le SIG offre une base de données visuelle et numérique précise qui facilite l'évaluation et l'arbitrage entre les différents sites potentiels pour l'implantation des forages.

II.5.3 Synthèse et perspectives du modèle hybride

L'intégration de la logique floue au sein d'un SIG marque une avancée significative dans la précision des modèles de décision hydrogéologique. En substituant les méthodes de superposition classiques par une approche basée sur la Fuzzification et le Fuzzy Overlay, ce modèle hybride parvient à transformer l'incertitude des données de terrain en une probabilité de succès spatialement explicite. Cette méthodologie réduit considérablement la subjectivité de l'expert tout en offrant une plateforme robuste pour l'analyse multicritère.

Toutefois, ce modèle ouvre la voie à plusieurs perspectives de développement :

- **L'intégration du Machine Learning** : L'évolution de ce système pourrait inclure des algorithmes d'apprentissage automatique pour ajuster dynamiquement les poids des critères en fonction des données historiques de forage.
- **La prise en compte de la temporalité** : L'ajout de données dynamiques liées aux changements climatiques permettrait de passer d'une cartographie statique des potentialités à une gestion prévisionnelle des ressources en eau.
- **Automatisation via Web-SIG** : Le déploiement de cette architecture sur des plateformes de Cloud Computing faciliterait la mise à jour en temps réel des zones de captage prioritaires.

II.6 Conclusion

Au vu de ce qui a été exposé, il apparaît clairement que l'utilisation de modèles hybrides intégrant les systèmes d'information géographique et la logique floue représente un saut qualitatif dans la précision de la modélisation hydrogéologique. L'étude méthodologique de ce chapitre a démontré que le processus de « Fuzzification » et l'usage des nombres flous triangulaires (TFN) sont les moyens les plus efficaces pour représenter la réalité de terrain, qui manque souvent de limites nettes entre les zones favorables et défavorables.

L'intégration de la technique AHP floue avec les outils de superposition spatiale (Fuzzy Overlay) ne permet pas seulement de classer les sites selon leur priorité, mais contribue également à éliminer les biais personnels de l'analyste, faisant du choix de l'emplacement du puits un processus transparent basé sur des fondements mathématiques solides. De plus, les perspectives de développement de ce modèle, à travers l'intégration d'algorithmes d'apprentissage automatique ou de données dynamiques liées au changement climatique, ouvrent de nouveaux horizons pour la gestion durable des ressources en eau.

Sur la base de ce cadre conceptuel établi, nous disposons désormais de la feuille de route méthodologique nécessaire pour entamer la phase appliquée. C'est ce que nous aborderons dans le troisième chapitre (Analyse spatiale et critères de traitement des données), où nous commencerons à traduire ces concepts en une réalité concrète à travers le traitement des données géographiques de la zone du plateau de Mostaganem, la construction de couches d'information, et l'application des opérations de superposition floue pour produire les cartes finales déterminant avec précision les sites de forage prioritaires.

Chapitre III : Analyse Spatiale et Critères.

III.1 Introduction

Ce troisième chapitre constitue le pivot méthodologique de notre contribution scientifique. Après avoir cerné les spécificités géographiques du plateau de Mostaganem, il devient impératif de structurer une démarche technique rigoureuse capable de transformer la donnée spatiale brute en indicateurs décisionnels opérationnels.

L'objectif de ce chapitre est double : d'une part, sélectionner et justifier les dix critères hydrogéologiques, morpho-topographiques et logistiques indispensables au ciblage des aquifères, en explicitant leur standardisation sur une échelle d'aptitude de 1 à 9. D'autre part, introduire l'architecture de l'outil informatique personnalisé que nous avons développé (Fuzzy AHP Overlay Locator). Nous exposerons ainsi le passage conceptuel d'une base de données géospatiales figée vers un modèle algorithmique flou, posant les fondations théoriques nécessaires à la simulation des zones potentielles d'implantation des forages dans le cadre de notre projet Start Up *Eye Tech Water*.

III.2 Détermination et justification des critères

L'étape de détermination des critères est la phase la plus influente sur la fiabilité du modèle final. Dans cette étude dédiée au plateau de Mostaganem, nous avons sélectionné 10 critères spatiaux basés sur le croisement de trois piliers fondamentaux : la revue de littérature hydrogéologique (notamment les travaux de [9]), l'analyse spatiale avancée, et l'expertise de terrain issue de notre enquête par questionnaire adressée aux experts de la région.

III.2.1 Critères hydrogéologiques (Le potentiel aquifère)

Ces critères définissent la capacité de stockage et la transmission de l'eau dans le sous-sol.

- **Lithologie** : Elle permet de classer les formations géologiques selon leur perméabilité (sables, grès, calcaires vs marnes).

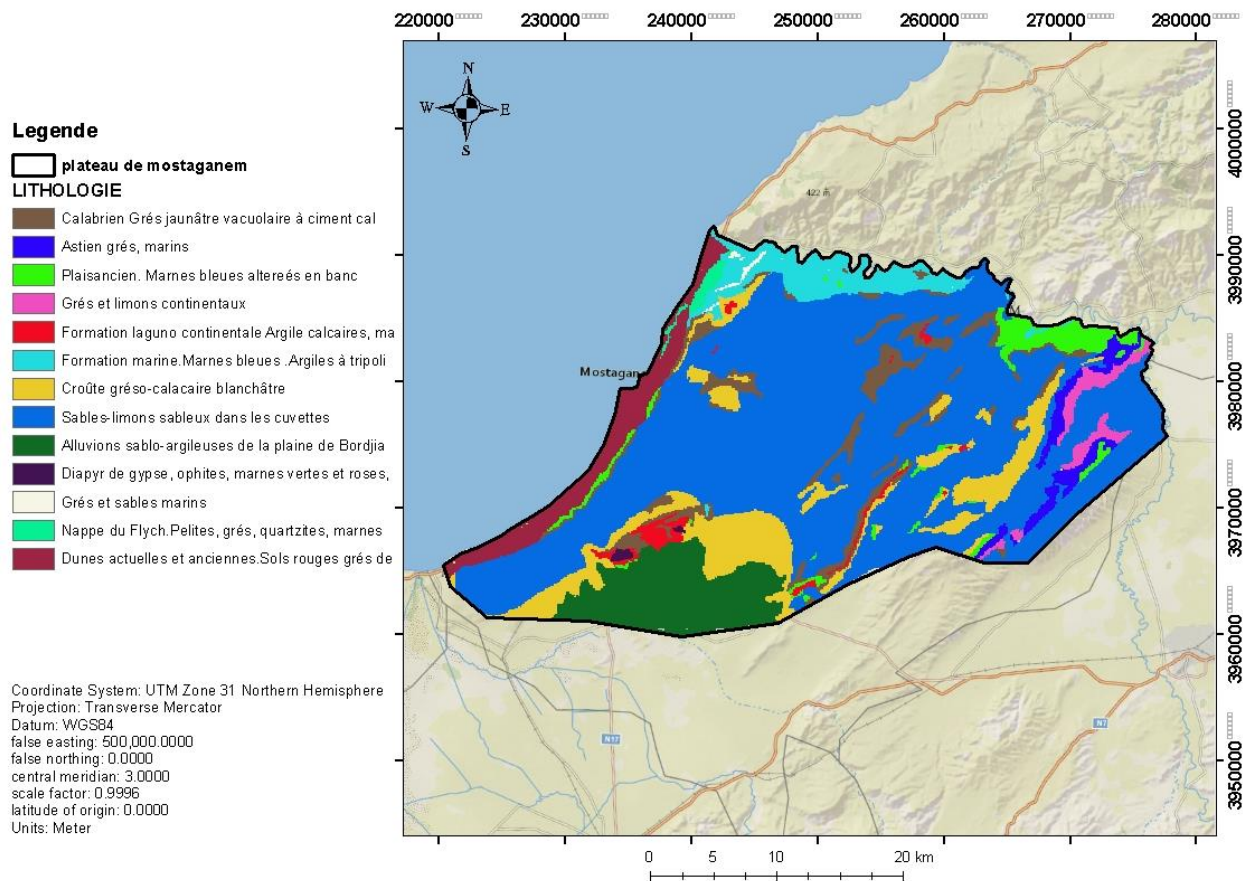


Figure III.1 : La lithologie de plateau de Mostaganem. Source des données [18]

La figure III.1 illustre la distribution spatiale des formations géologiques du plateau, reclassées selon une échelle d'aptitude hydrogéologique allant de 1 à 9. Les valeurs minimales de la légende (1 à 3) correspondent aux faciès marneux et argileux compacts, caractérisés par une imperméabilité quasi-totale qui constitue un obstacle majeur à l'infiltration. À l'inverse, les valeurs maximales (7 à 9) représentent les formations de grès, de sables et de calcaires fracturés, dotées d'une forte perméabilité matricielle et d'une excellente capacité de stockage aquifère.

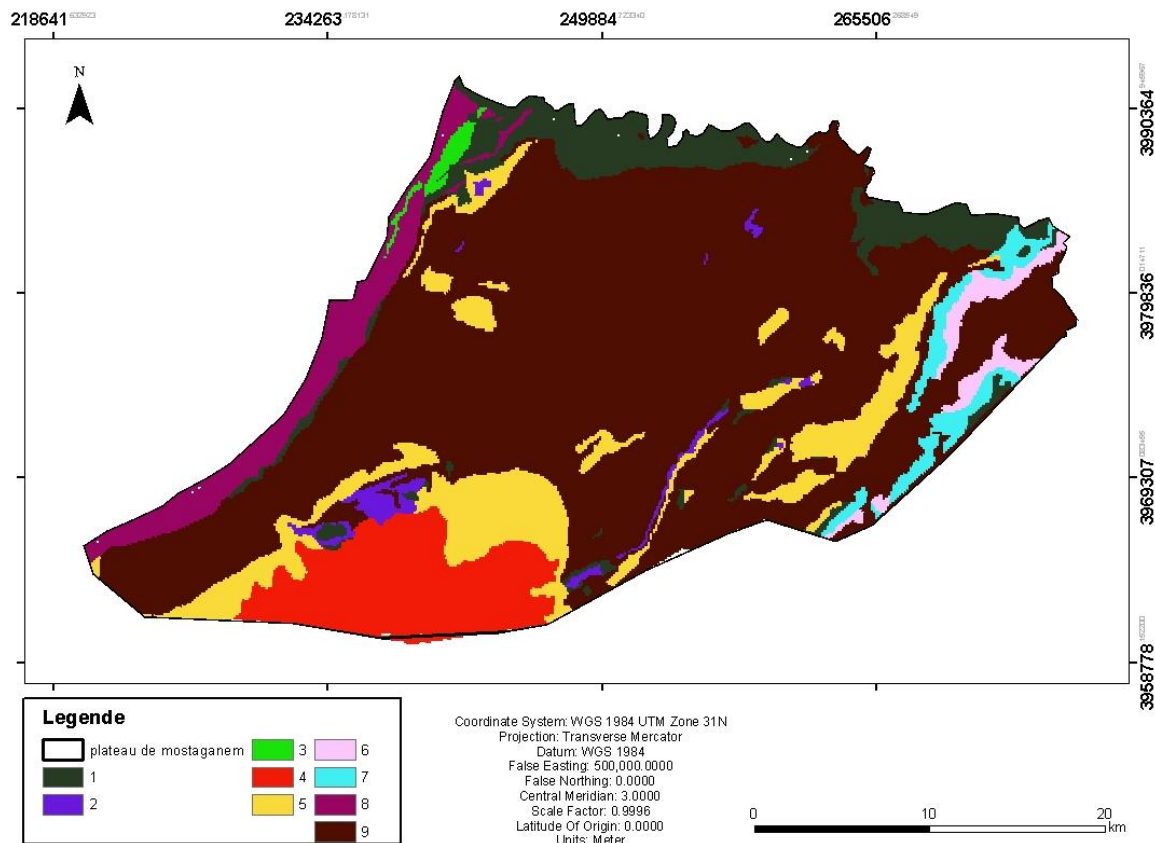


Figure III.2 : La lithologie de plateau de Mostaganem reclassé. Source des données [18]

- **Densité des linéaments :** Elle identifie les zones de fracturation rocheuse qui agissent comme des vecteurs de circulation et des réservoirs secondaires pour les eaux souterraines.

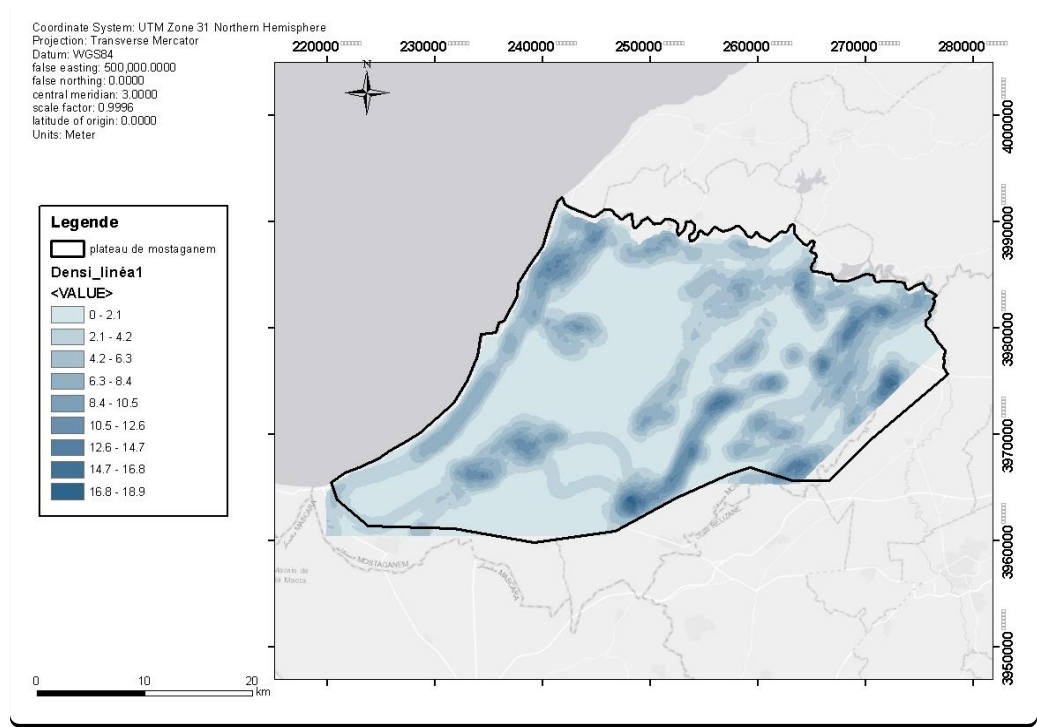


Figure III.3 : Densité des linéaments du plateau de Mostaganem. Source des données [14]

Cartographiant le degré de fracturation tectonique du milieu sous-jacent, cette couche est discrétisée de 1 à 9. Les valeurs basses (1 à 3) désignent les secteurs sains ou peu fracturés où la perméabilité secondaire est faible. Les valeurs les plus élevées de la légende (7 à 9) localisent avec précision les couloirs de forte densité linéamentaire, lesquels agissent comme des vecteurs préférentiels de percolation verticale et des réservoirs structuraux majeurs pour les eaux souterraines.

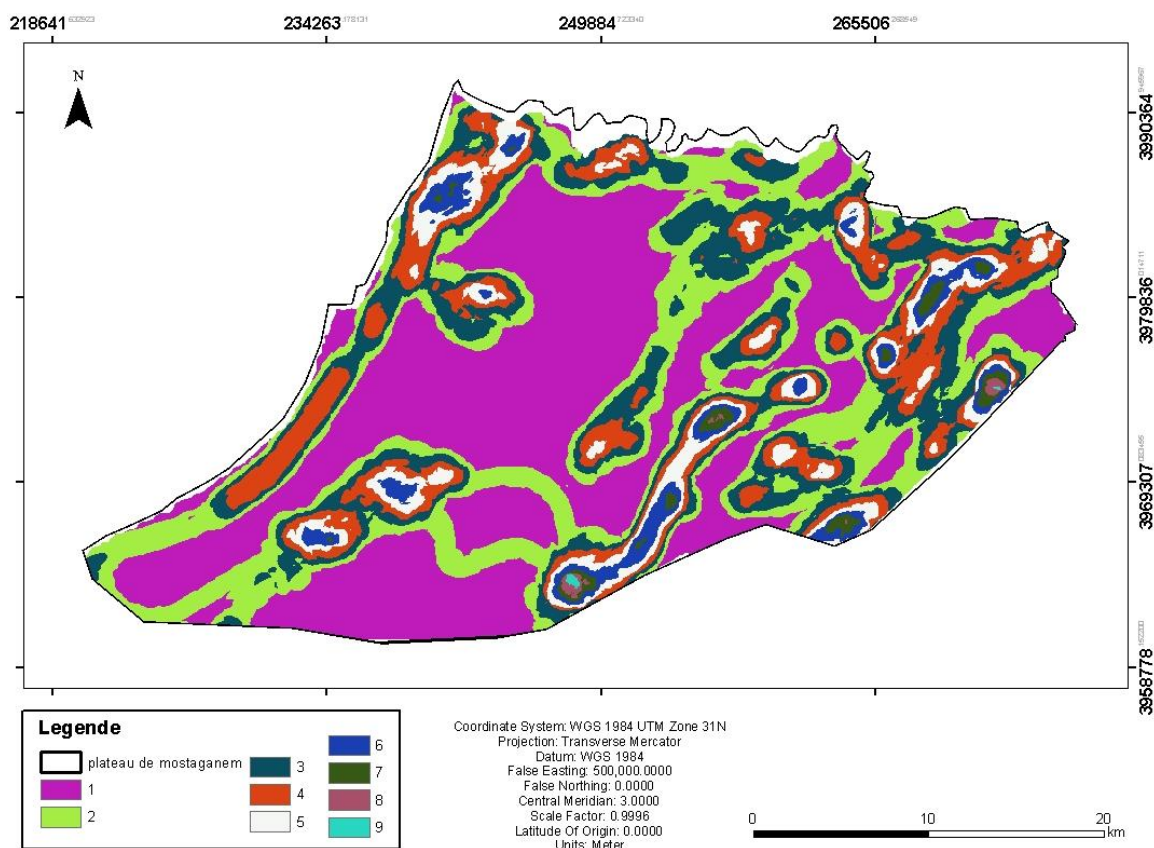


Figure III.4 : Densité des linéaments du plateau de Mostaganem reclassé. Source des données [14]

- **Densité de drainage** : Ce critère reflète la relation inverse entre le ruissellement de surface et l'infiltration profonde ; une faible densité favorise la recharge de la nappe.

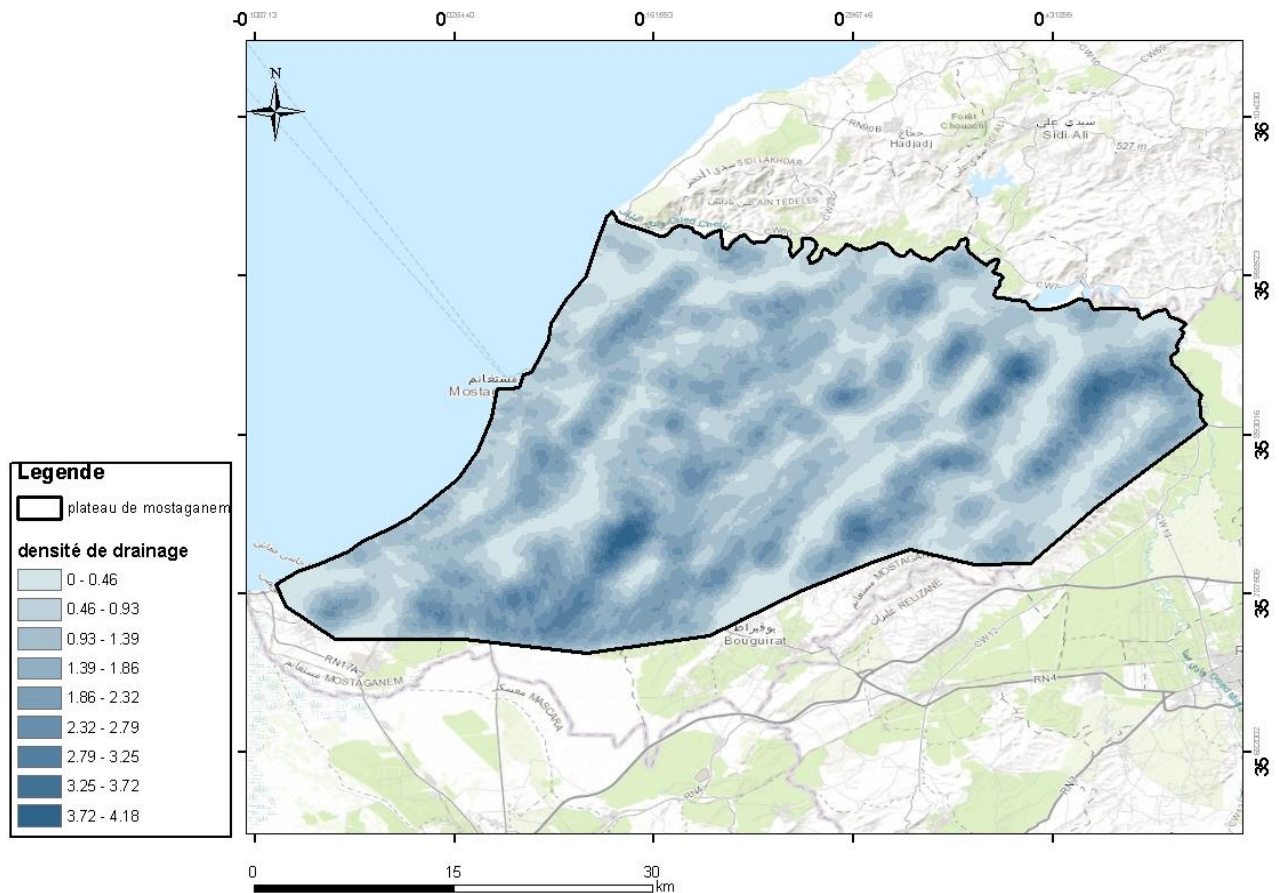


Figure III.5 : Densité du drainage du plateau de Mostaganem.

Source des données [14]

Ce critère exprime la relation inverse entre l'écoulement de surface et l'infiltration profonde, standardisé de 1 (potentiel minimal) à 9 (potentiel maximal). Les valeurs sommitales (7 à 9) coïncident avec les zones de faible densité de drainage, où l'absence de réseau hydrographique superficiel dense favorise la stagnation et l'infiltration des eaux météoriques. En revanche, les valeurs minimales (1 à 3) signalent un chevelu hydrographique dense qui accélère le ruissellement érosif au détriment de la recharge de la nappe.

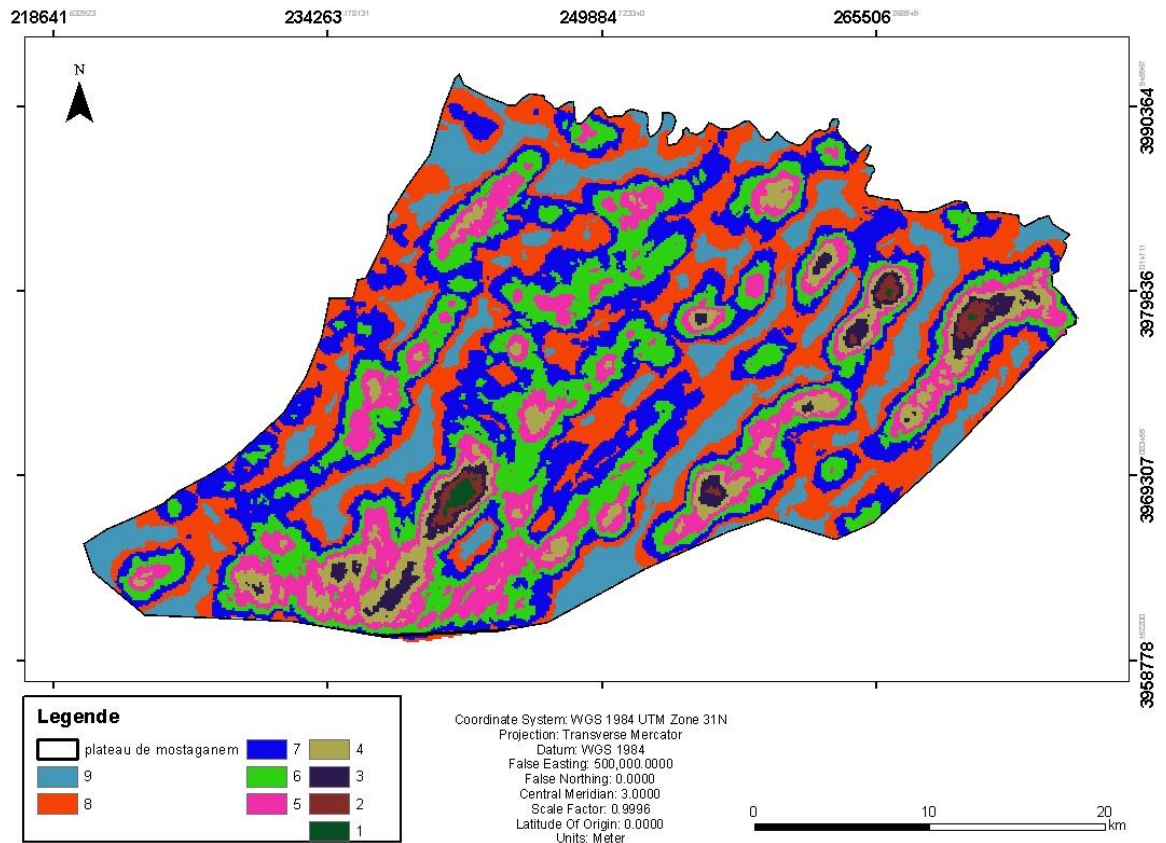


Figure III.6 : Densité du drainage du plateau de Mostaganem reclassé.
 Source des données [14]

III.2.2 Critère morpho-topographiques (La dynamique de surface)

Ils régissent le comportement des eaux en surface avant leur infiltration :

- **TWI (Topographic Wetness Index)** : Un indice composé qui identifie les zones de saturation hydrique naturelle.

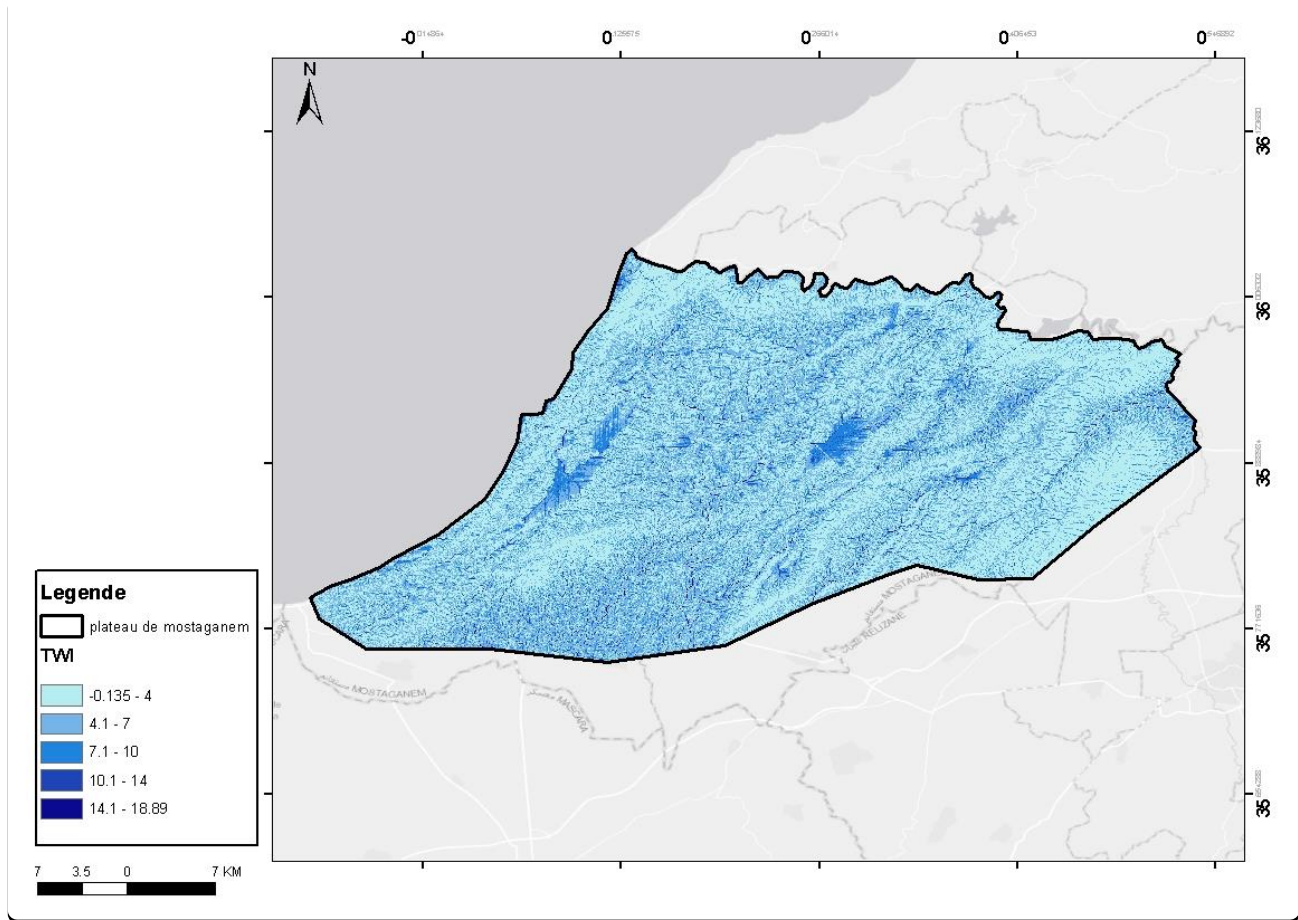


Figure III.7 : Indice d'Humidité Topographique de plateau de Mostaganem. Source des données [14]

L'indice composite TWI quantifie le contrôle topographique sur les zones d'accumulation hydrique, réparti sur une plage reclassée de 1 à 9. Les indices faibles (1 à 3) caractérisent les crêtes et les hauts versants secs, soumis à une forte dynamique d'évacuation des flux. Les classes maximales (7 à 9) identifient rigoureusement les zones plates, les dépressions synclinales et les talwegs naturellement propices à une saturation hydrique prolongée et continue du sol.

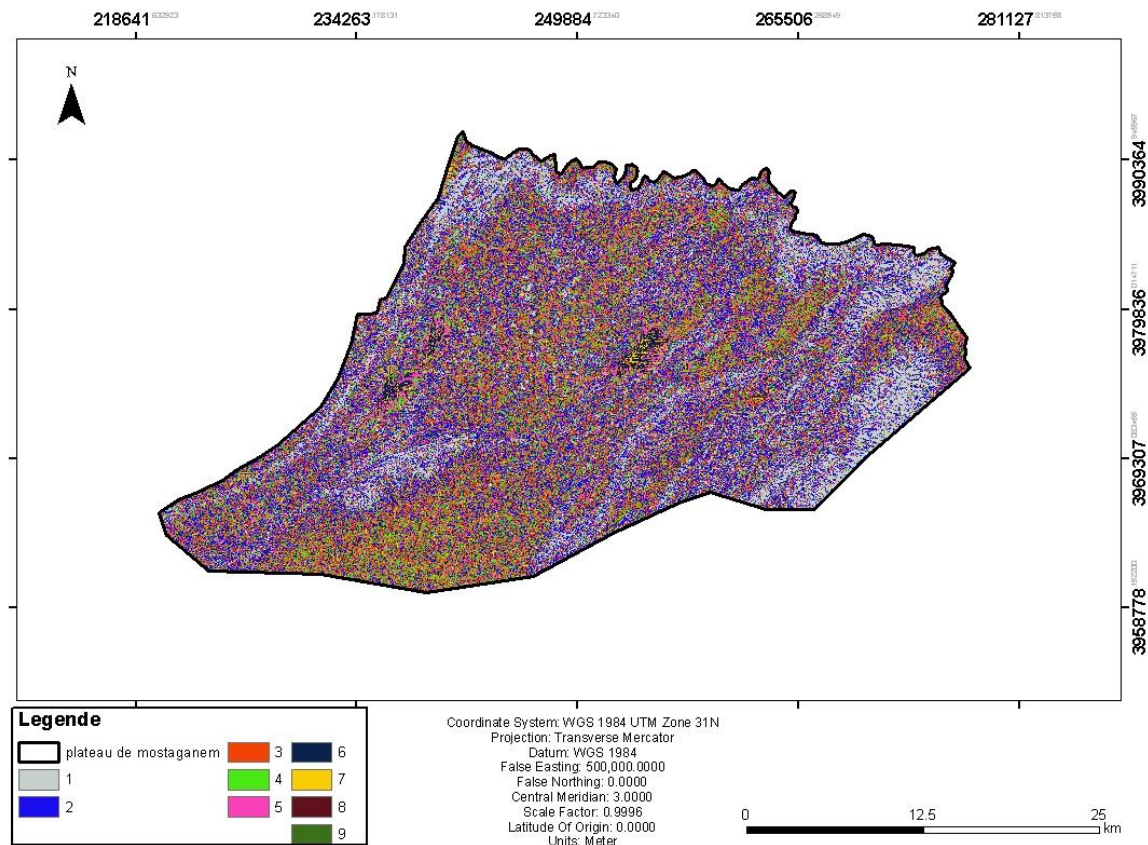
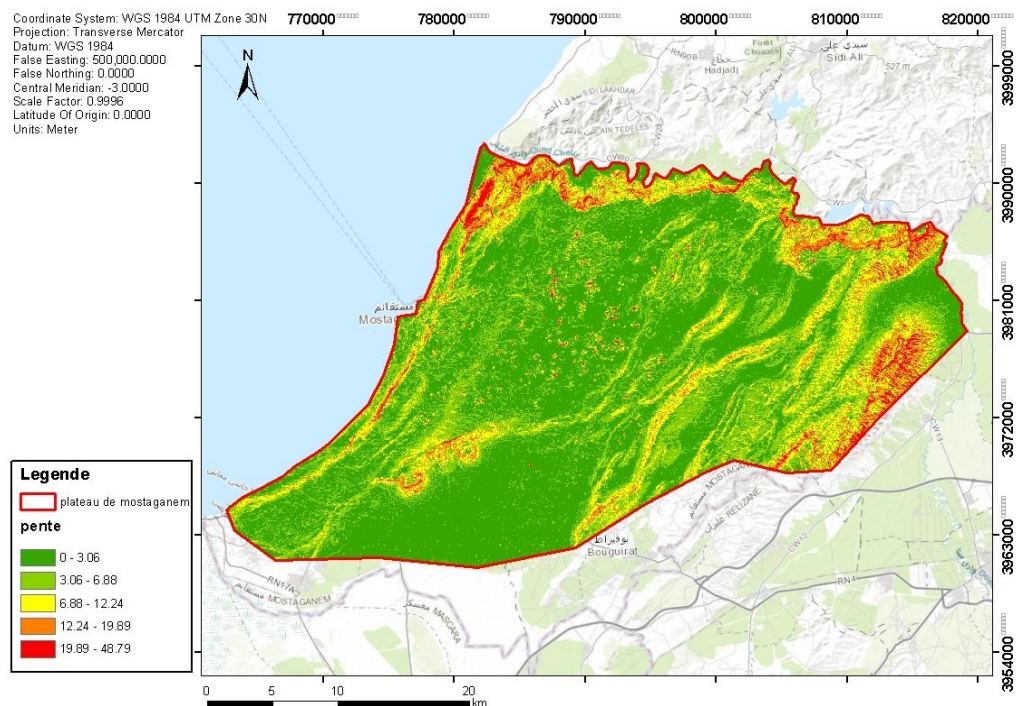


Figure III.8 : Indice d'Humidité Topographique de plateau de Mostaganem reclassé.
Source des données [14]

- **Pente :** Les pentes faibles sont privilégiées car elles ralentissent le ruissellement, favorisant ainsi un temps de contact prolongé pour la recharge.



- **Figure III.9** : La pente de plateau de Mostaganem. Source des données [14]

La carte des pentes quantitative détermine la vitesse d'écoulement superficiel des eaux. Dans la légende standardisée (1 à 9), la valeur 1 correspond aux pentes fortes (supérieures à 19°), qui accélèrent le ruissellement et réduisent le temps de contact eau-sol. La valeur 9 est attribuée aux surfaces planes ou à pentes très faibles (0° à 3°), offrant des conditions optimales pour une infiltration lente et efficace.

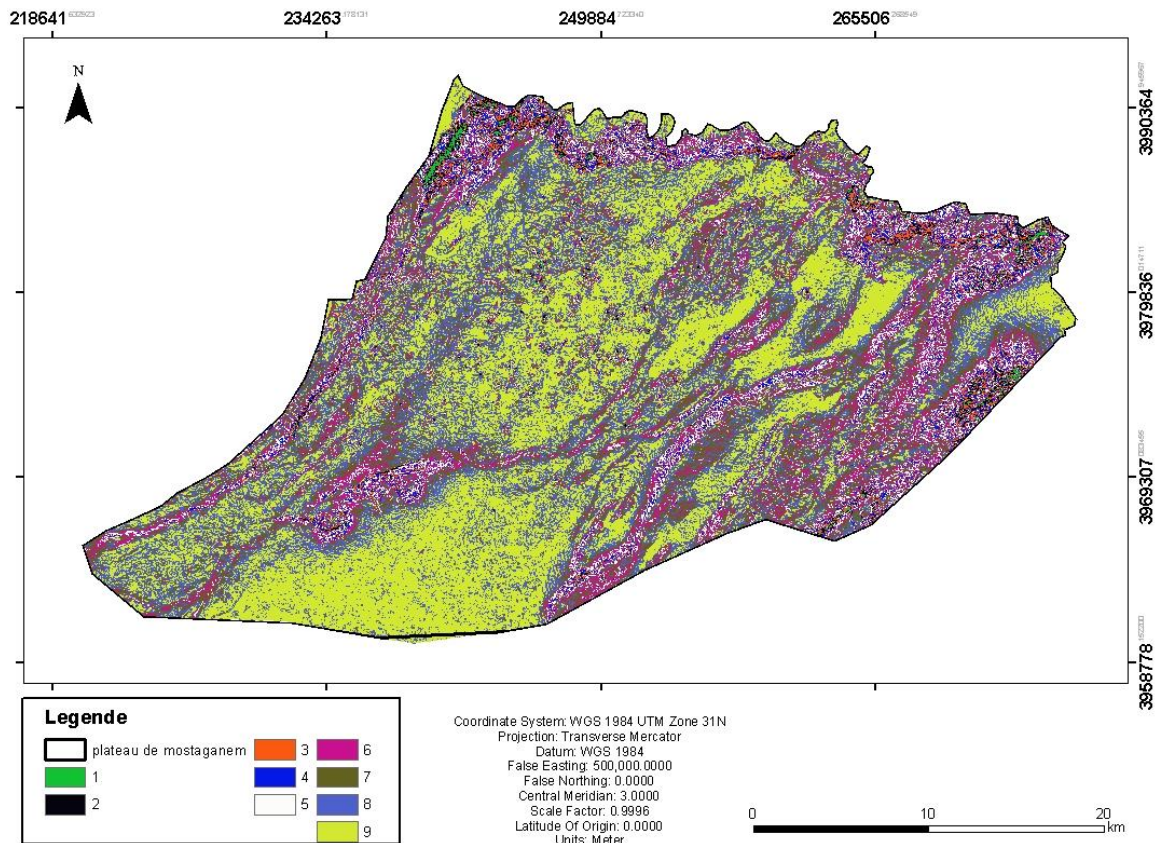


Figure III.10 : La pente de plateau de Mostaganem reclassée. Source des données [14]

- **Aspect & Altitude** : Utilisés pour étudier l'influence de l'orientation topographique sur l'évapotranspiration et pour comprendre le gradient hydraulique général du plateau.

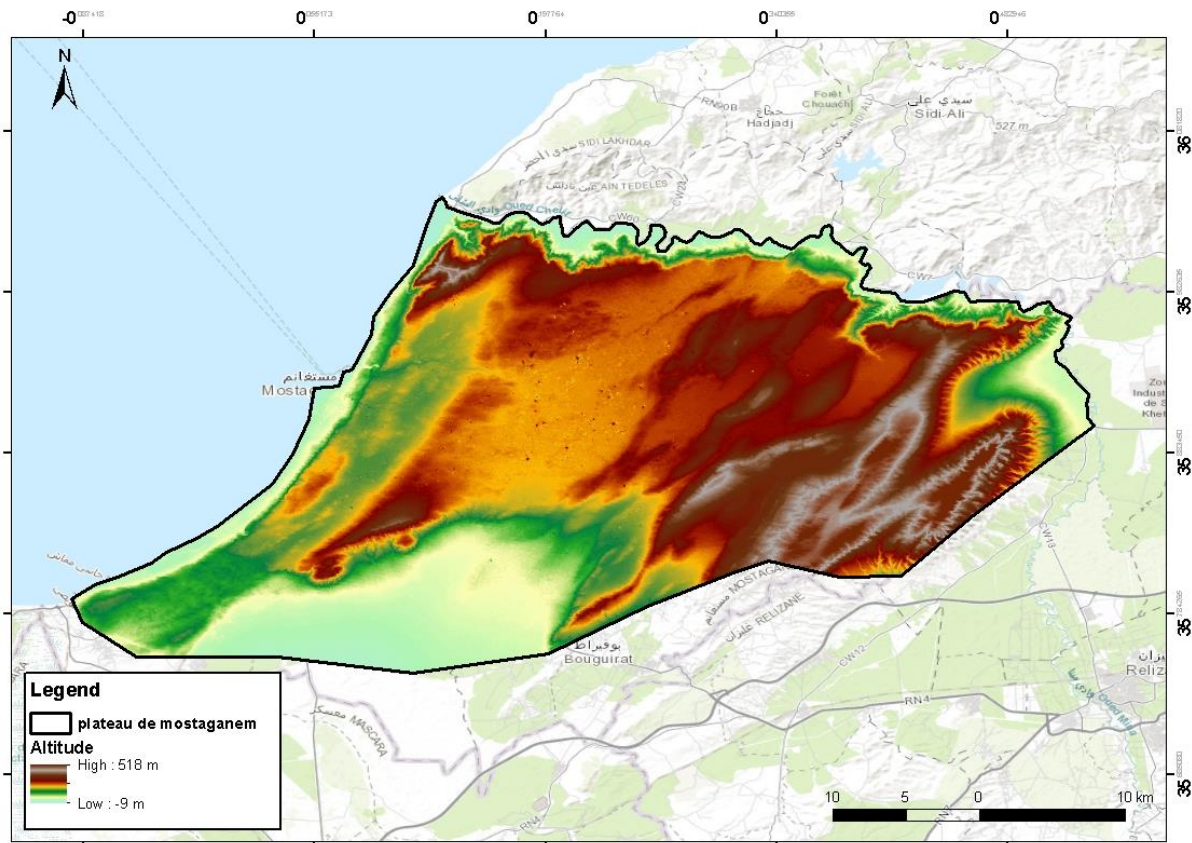


Figure III.11 : L'Altitude du plateau de Mostaganem. Source des données [14]

La Figure III.6 représente le gradient altimétrique et la configuration morphologique globale de la zone d'étude. L'échelle de notation (1 à 9) est calibrée par rapport à la dynamique d'écoulement : la valeur 1 caractérise les altitudes les plus élevées du plateau, correspondant aux zones d'initiation du ruissellement, tandis que la valeur 9 désigne les zones de basse altitude, propices à la convergence hydraulique et à l'accumulation des eaux souterraines.

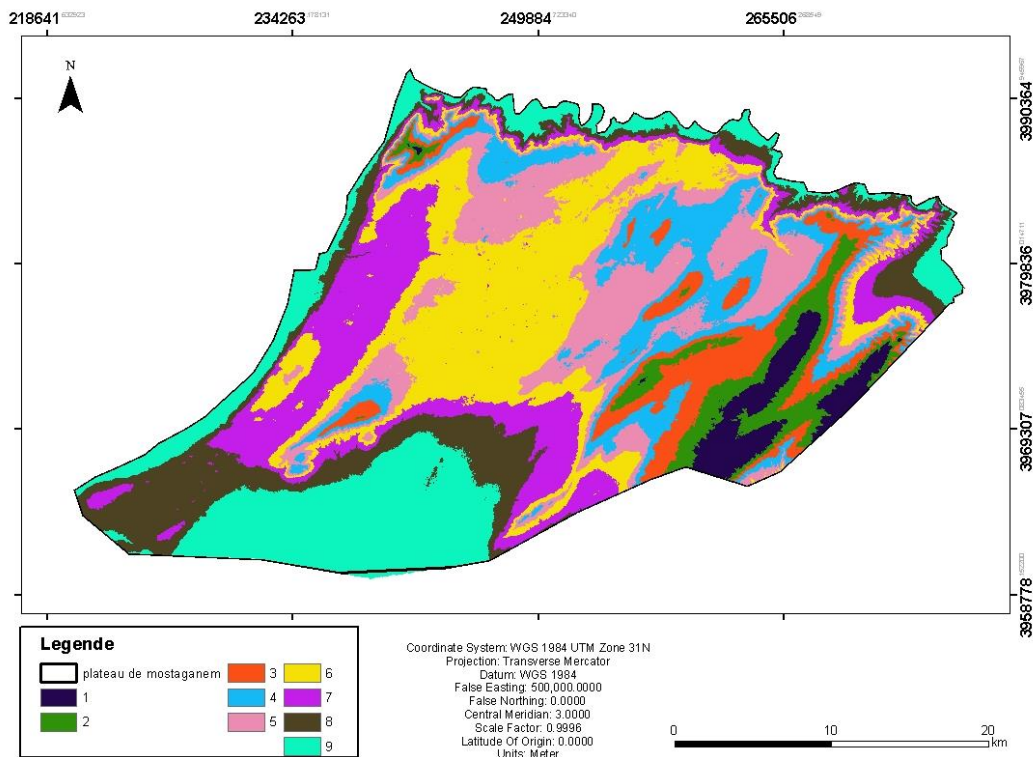


Figure III.12 : L'Altitude du plateau de Mostaganem reclassé. Source des données [14]

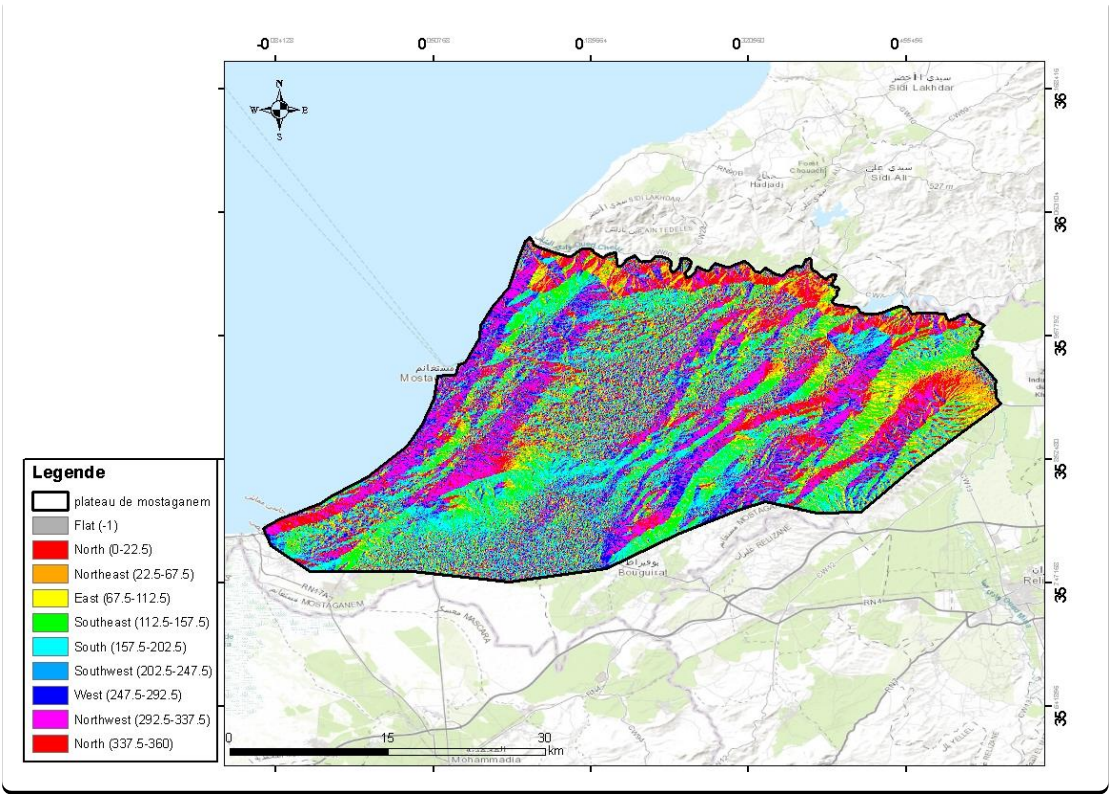
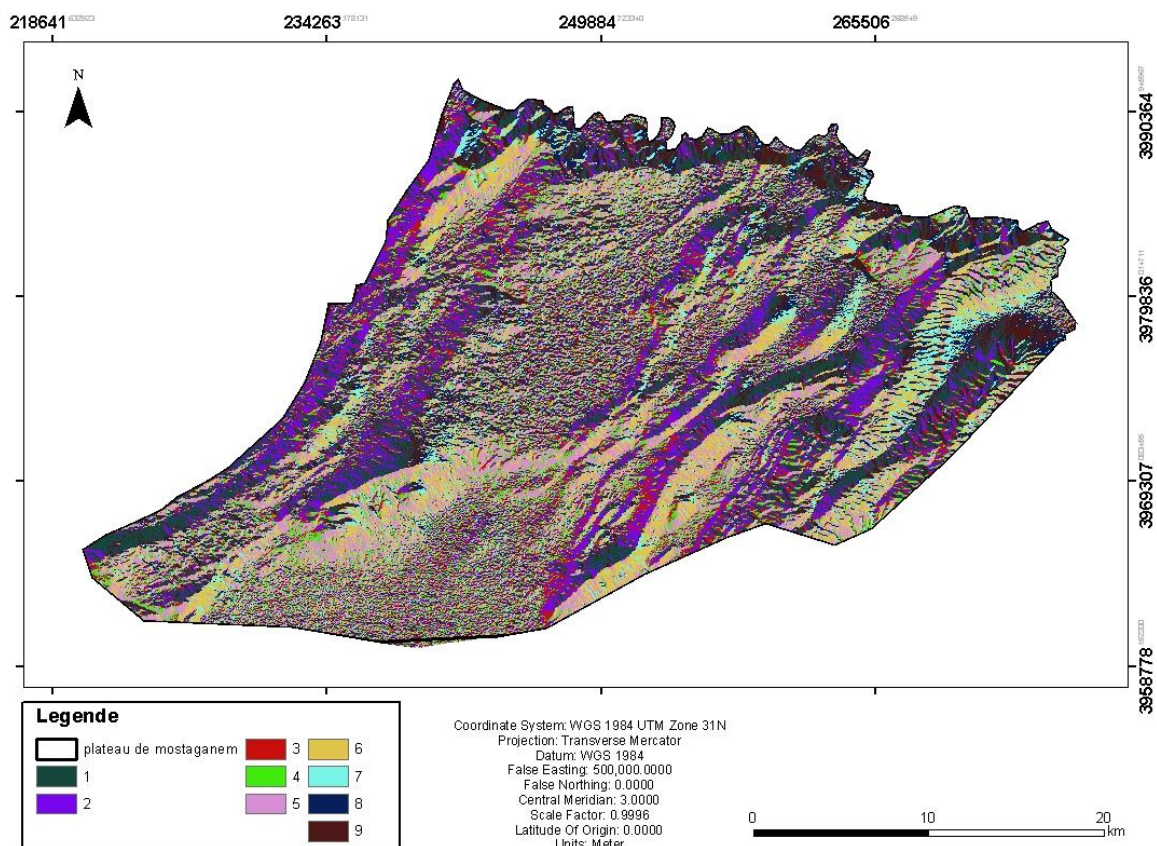


Figure III.13 : L'Aspect du plateau de Mostaganem. Source des données [14]

Cette couche d'information morphologique expose l'orientation des versants par rapport au rayonnement solaire. Les valeurs de la légende (1 à 9) reflètent l'influence indirecte de l'exposition sur l'évapotranspiration : la valeur 1 est attribuée aux versants orientés vers le Sud (fortement ensoleillés, subissant une perte hydrique intense par évaporation), alors que la valeur 9 correspond aux versants orientés vers le Nord ou aux zones plates, préservant une humidité relative plus élevée dans le sol.

**Figure III.14** : L'Aspect du plateau de Mostaganem reclassé. Source des données [14]

III.2.3 Critère logistiques et socio-économiques (Accessibilité et Rentabilité)

Cette dimension représente l'aspect opérationnel et entrepreneurial du projet :

- **Distance au réseau électrique** : Visant à réduire les coûts d'investissement liés à l'énergie de pompage.

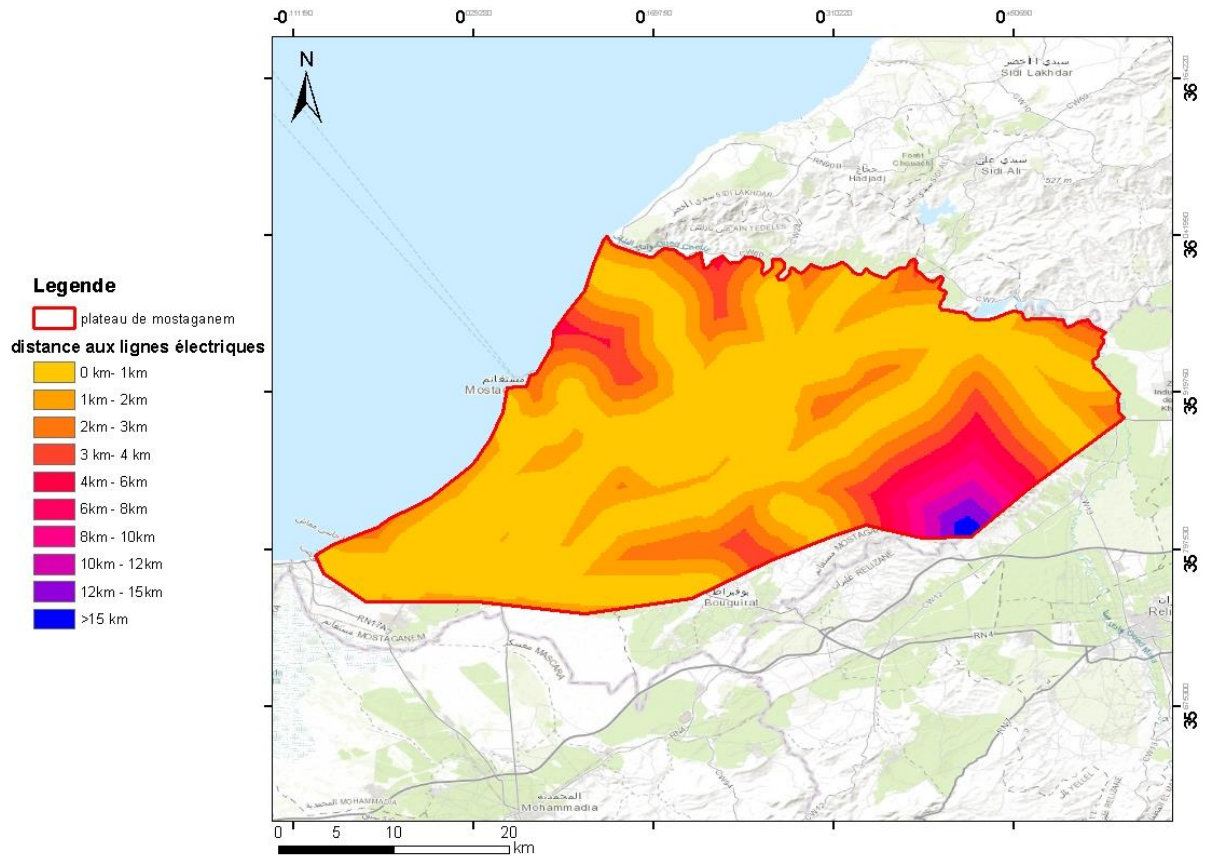


Figure III.15 : Distance au réseau électrique du plateau de Mostaganem. Source des données. [18]

Cet indicateur logistique évalue l'accessibilité énergétique nécessaire à l'exploitation des futurs forages. La légende (1 à 9) traduit une contrainte de coût économique : la valeur 1 indique un éloignement maximal par rapport aux lignes électriques existantes, impliquant des coûts d'infrastructure prohibitifs pour le pompage. La valeur 9 désigne une proximité immédiate du réseau, garantissant une rentabilité opérationnelle optimale pour le projet.

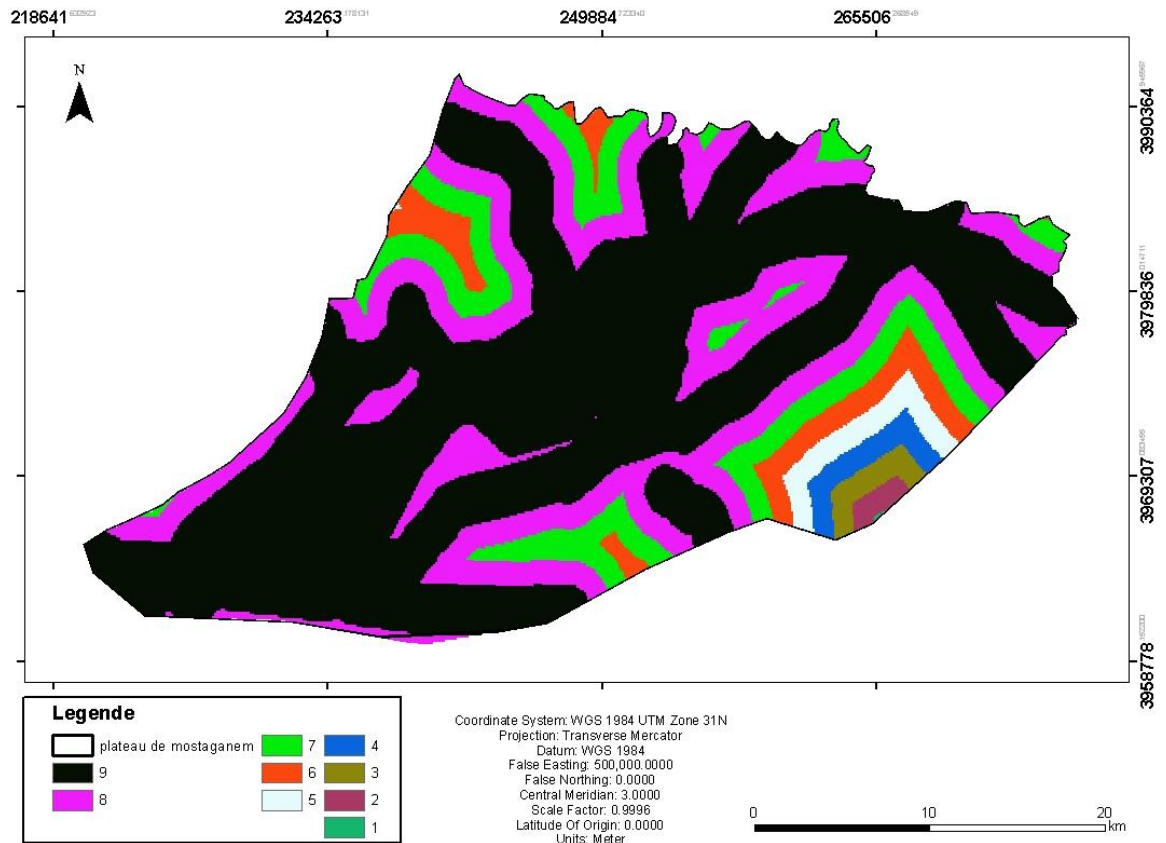


Figure III.16 : Distance au réseau électrique du plateau de Mostaganem reclassé.

Source des données. [18]

- **Distance au réseau routier (Proximité des pistes)** : Visant à faciliter l'accessibilité des engins de forage lourds (camions de forage, citernes) et à réduire les coûts logistiques liés au transport des équipements et aux travaux d'aménagement des voies d'accès lors de la phase de chantier.

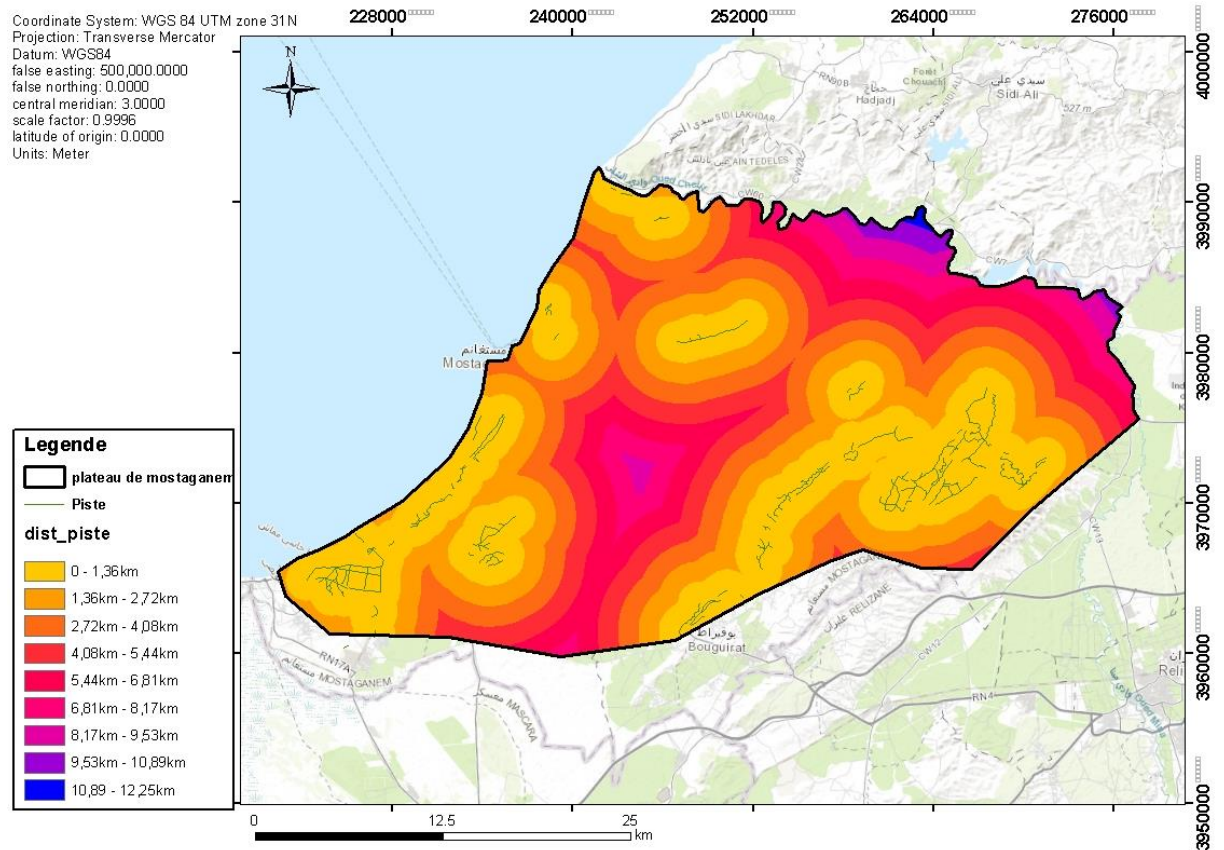


Figure III.17 : Distance des pistes de plateau de Mostaganem.
 Source des données. [18]

La Figure III.9 analyse l'accessibilité physique du territoire pour les contraintes de chantier. L'échelle de la légende (1 à 9) mesure la faisabilité technique du déploiement logistique : la valeur 1 correspond aux zones enclavées et très éloignées des voies de communication, rendant difficile l'accès des machines lourdes de forage. La valeur 9 identifie les secteurs situés à proximité immédiate des pistes et routes, facilitant le transport des équipements et réduisant les coûts d'aménagement des voies d'accès.

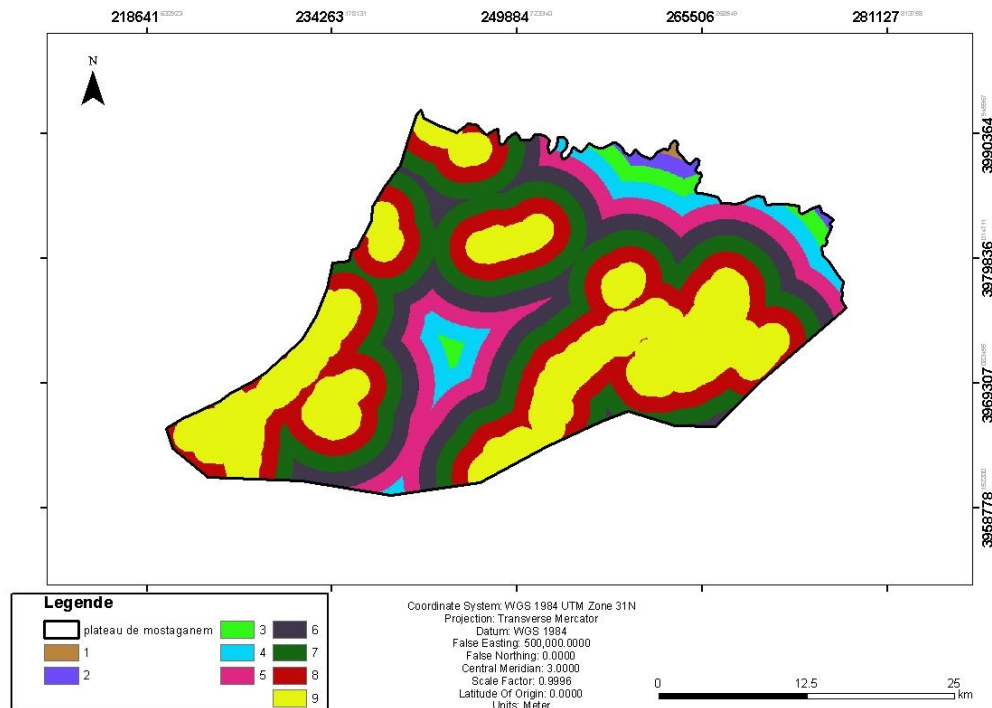


Figure III.18 : Distance des pistes de plateau de Mostaganem reclassé.
 Source des données. [18]

- **Occupation du sol (Land Use) :** Permet d'exclure les zones urbanisées et d'orienter les forages vers les zones agricoles bénéficiaires.

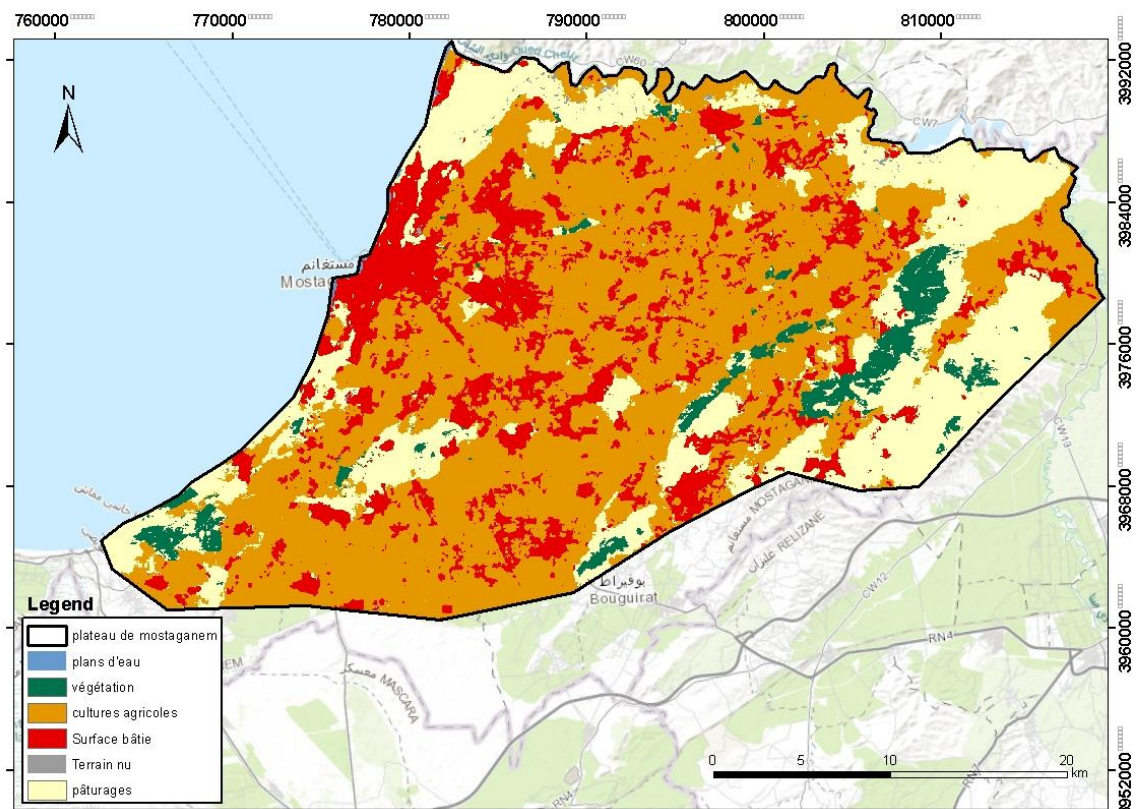


Figure III.19 : Occupation du sol de plateau de Mostaganem.
Source des données [18] [19]

Ce critère environnemental structure l'aptitude socio-économique des sols vis-à-vis de l'implantation des ouvrages hydriques, comme le montre la Figure III.10. La légende de 1 à 9 intègre des restrictions d'aménagement : la valeur 1 est affectée aux tissus urbains et zones bâties, définis comme des zones d'exclusion stricte pour des raisons de sécurité et de salubrité. À l'opposé, la valeur 9 est attribuée aux zones agricoles irriguées et aux sols nus cultivables, représentant les secteurs prioritaires où la demande en eau est maximale.

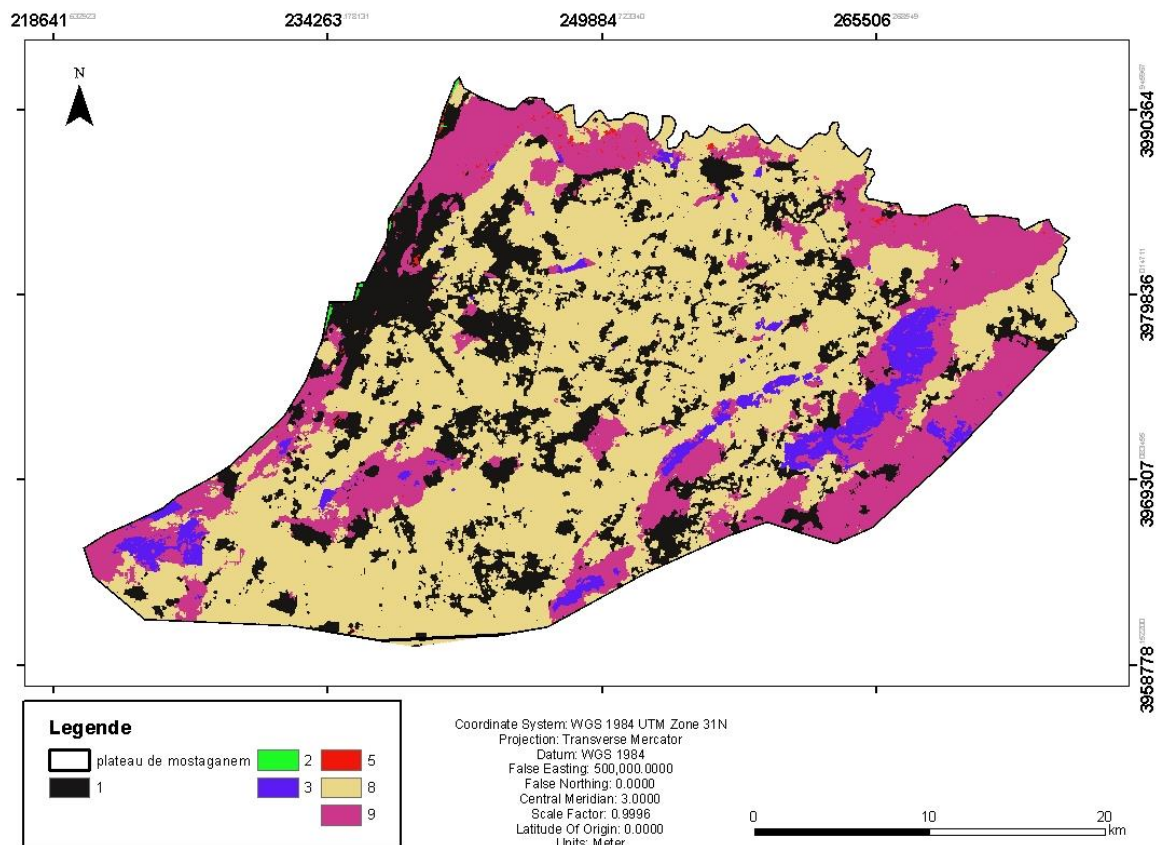


Figure III.20 : Occupation du sol de plateau de Mostaganem reclassé.
Source des données [18] [19]

III.3 Numérisation et préparation des couches de données

Cette étape constitue le pont entre les données brutes et la modélisation spatiale. Elle vise à harmoniser le format et le référencement de tous les critères sélectionnés afin

de garantir la précision du processus de superposition (Overlay) ultérieur. Ce processus s'est déroulé selon les étapes techniques suivantes :

III.3.1 Géoréférencement et numérisation

Pour les données issues des cartes analogiques (telles que la carte géologique de Mostaganem) :

- **Géoréférencement** : Les cartes scannées ont été projetées selon le système de coordonnées mondial WGS 84 / UTM zone 31N afin d'assurer leur parfaite concordance avec la réalité spatiale.
- **Numérisation** : Les entités géologiques (formations rocheuses et failles) ainsi que le réseau routier ont été convertis du format image vers des couches vectorielles (Vector) à l'aide des outils de saisie du logiciel ArcGIS.

III.3.2 Interpolation spatiale des données ponctuelles

Pour les données statistiques et de terrain obtenues sous forme de points (les coordonnées des forages) :

forage2010.mosta													
ID	Shape	NUM	COMMUNES	NOMSFORAGE	LOCALISATI	DESTINATIO	X	Y	PROFONDEUR	Debitmax J	debitexplo	Année	obs
1	Point	44	FORNAKA	FK 3	Fornaka	Kedra	254850	275100	76	45	18	1985	Exploité
2	Point	45	FORNAKA	FK 3 Bis	Fornaka	Fornaka	256000	275010	150	30	15	2003	Exploité
3	Point	47	FORNAKA	F1/O Tine	Fornaka	Centre et douars	256800	275000	145	26	14	2007	Exploité
4	Point	46	FORNAKA	Z/A Fornaka	Fornaka	Douars	257000	276700	140	25	15	2005	Exploité
5	Point	48	FORNAKA	F3/O Tine	Fornaka	Centre et douars	256000	275000	143	25	15	2007	Exploité
6	Point	110	STIDA	STIDA 1	STIDA	STIDA 1	259000	264000	50	8	2	1985	Exploité
7	Point	39	EL-HAGANE	BEN YAH BY3	El hacane	BEN YAH	259350	276470	102	25	12	2007	Exploité
8	Point	3	AIN NOUSSY	AN2	Stida	AIN NOUSSY	259550	263950	55	8	2	1988	Exploité
9	Point	42	EL-HAGANE	KOUARA	El hacane	KOUARA	260200	276400	150	45	18	1995	Exploité
10	Point	2	AIN NOUSSY	AIN NOUVEAU	Stida	AIN NOUSSY	260200	264550	60	10	2	1995	Exploité
11	Point	29	EL-HAGANE	BEN YAH BY2 Bis	El hacane	BEN YAH	260600	277150	130	25	15	2006	Exploité
12	Point	28	EL-HAGANE	BEN YAH BY2	El hacane	BEN YAH	260650	277200	138	8	3	1983	Exploité
13	Point	49	FORNAKA	F4 Bordias	Fornaka	Centre et douars	261350	276550	171	15	13	2007	Exploité
14	Point	5	AIN NOUSSY	OHamdane	Hassi Manèche	OAMADANE	261500	264850	47	7	2	1988	Exploité
15	Point	109	STIDA	DRACB 2	STIDA	DRACB	261800	265750	81	18	2	1999	Exploité
16	Point	4	AIN NOUSSY	AN 5	Ain Noussy	AIN NOUSSY	261950	278500	70	12	7	2004	Exploité
17	Point	72	MAZAGRAN	Oursah	Hassi Manèche	Oursah	262400	287350	90	15	6	1988	Exploité
18	Point	50	FORNAKA	F5 Bordias 2	Fornaka	Centre et douars	262475	278650	173	22	12	2007	Exploité
19	Point	51	HASSI MAMECHE	BRAROLE	Hassi Manèche	BRAROLE	262600	286450	50	7	2	1986	Exploité
20	Point	55	HASSI MAMECHE	H-MAMECHE HMI	Hassi Manèche	HASSI MAMECHE	262700	287750	100	8	5	2007	Exploité
21	Point	57	HASSI MAMECHE	REHAHLA	Hassi Manèche	REHAHLA	262850	288600	56	6	2	1990	Exploité
22	Point	53	HASSI MAMECHE	H-MAMECHE HMI	Hassi Manèche	HASSI MAMECHE	263300	287900	75	10	6	1987	Exploité
23	Point	54	HASSI MAMECHE	H-MAMECHE HMI	Hassi Manèche	HASSI MAMECHE	263600	287750	60	18	5	1992	Exploité
24	Point	7	AIN NOUSSY	AIN OULARS	Ain Noussy	Amara ferata	263700	273700	100	25	7	1992	Exploité
25	Point	112	MAZAGRAN	Mazagran (Parc)	Mazagran	Centre	263700	291700	60	6	4	2009	Exploité
26	Point	70	MAZAGRAN	MAZ 2	Mazagran	MAZAGRAN(nouveau)	263850	289000	122	25	9	1996	Exploité
27	Point	69	MAZAGRAN	MAZ 1	Mazagran	MAZAGRAN	264000	289000	118	18	10	1988	Exploité
28	Point	71	MAZAGRAN	MAZ3	Hassi Manèche	Mazagran	264000	289500	100	12	8	2004	Exploité
29	Point	6	AIN NOUSSY	OHamdane bis	Ain Noussy	OAMADANE	264100	286550	175	14	6	2004	Exploité
30	Point	56	HASSI MAMECHE	MAZIA	Hassi Manèche	MAZAGRAN	264150	286250	51	12	5	1990	Exploité
31	Point	15	MAZAGRAN	ZET (F18)	Hassi Manèche	MAZAGRAN	264600	289950	55	15	5	1996	Exploité
32	Point	43	EL-HAGANE	Koubet Tedala	El hacane	Douars El hacane	264650	277250	308	18	8	2001	Exploité
33	Point	52	HASSI MAMECHE	DOUAR DUEID	Hassi Manèche	DOUAR DUEID	265500	290300	70	18	4	1988	Exploité
34	Point	16	MOSTAGANEM	ZAO(F17)	Hassi Manèche	MOSTAGANEM	266050	290650	53	13	5	1996	Exploité
35	Point	17	MOSTAGANEM	F16	Hassi Manèche	MOSTAGANEM	266175	290950	55	12	4	1990	Exploité
36	Point	58	HASSI MAMECHE	06 Douars bis	Ain Noussy	Douars	266200	280950	150	15	7	2004	Exploité
37	Point	41	EL-HAGANE	EL-HAGANE 2	El hacane	EL-HAGANE CENTRE	266350	276250	96	8	2	1992	Exploité
38	Point	40	EL-HAGANE	Wahala 2	El hacane	El hacane	266500	276250	117	8	6	2004	Exploité
39	Point	9	AIN SICHERRIF	ASC 2	Ain Sid Cherif	Centre	267000	282300	175	10	13	2004	Exploité
40	Point	94	Sirat	Zorgue	Sirat	Zorgue	267150	278750	100	13	6	2004	Exploité
41	Point	21	MOSTAGANEM	POSTE MOBILE	Mostaganem	MOSTAGANEM	267250	296400	40	25	9	1920	Exploité
42	Point	66	SAYADIA	HACHEM N°2	Sayadia	HACHEM	267550	297300	75	12	8	1998	Exploité
43	Point	90	SAYADIA	OHamdi	Sayadia	Hamdi	268000	298500	95	15	8	2007	Exploité
44	Point	8	AIN SICHERRIF	ASC Douar	Ain Sid Cherif	Chemana	268300	283250	151	14	6	1992	Exploité

Figure III.21 : Les coordonnées des forages. Source de données [18].

III.3.3 Extraction des dérivés topographiques à partir du MNT (DEM)

À partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) du plateau de Mostaganem, les couches suivantes ont été générées automatiquement :

- Les cartes de Pente (Slope), d'Exposition (Aspect).
- Le calcul de l'indice d'humidité topographique (TWI) en utilisant les équations mathématiques intégrées aux outils d'analyse spatiale.
- La réalisation d'une analyse hydrologique (Fill > Flow Direction > Flow Accumulation) pour extraire la densité de drainage.

III.3.4 Standardisation et rastérisation

Afin d'assurer le bon fonctionnement de notre module algorithmique (Fuzzy AHP), toutes les couches ont été soumises aux opérations suivantes :

- **Rastérisation** : Conversion de toutes les couches vectorielles (réseau électrique) en format matriciel (Raster).
- **Rééchantillonnage (Resampling)** : La taille de la cellule (Cell Size) a été fixée à 30 mètres pour toutes les cartes afin de garantir une compatibilité totale entre les pixels.
- **Découpage (Clip)** : Toutes les cartes ont été découpées selon les limites géographiques précises du plateau de Mostaganem pour assurer l'uniformité de la zone d'étude pour l'ensemble des critères.

III.4 Le fonctionnement des trois méthodes (weighted sum, AHP, Fuzzy AHP)

III.4.1 La méthode Weighted Sum (Somme pondérée) sous ArcMap [20]

La méthode sous forme d'outil de géo-traitement (extension Spatial Analyst) qui permet de combiner plusieurs rasters en multipliant chaque cellule par une pondération spécifique, puis en additionnant le tout. Elle est principalement utilisée pour les analyses multicritères.

Le calcul repose sur la formule mathématique suivante en passant par les étapes ci-dessous:

$$\text{Résultat} = \sum_{(i|1)}^n (\text{Raster}_i \times \text{Poids}_i)$$

La reclassification : Avant d'utiliser la Somme pondérée, chaque raster doit être harmonisé (ex: notes de 1 à 9, où 9 est le plus favorable).

La pondération : Un coefficient d'importance est attribué à chaque critère (ex: 0.5 pour la proximité à l'eau, 0.3 pour la nature du sol, 0.2 pour la pente). La somme des poids doit idéalement totaliser 1 (ou 100%).

L'addition : ArcMap multiplie la valeur de chaque cellule par le poids du critère et additionne les résultats pour créer une carte de synthèse finale.

III.4.2 La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) ou Processus d'Hiérarchie Analytique) [21]

est une approche d'aide à la décision très utilisée en analyse multicritère spatiale (SIG). Développée par Thomas Saaty, elle permet de déterminer le poids (l'importance relative) de plusieurs critères géographiques.

Les trois étapes fondamentales de la méthode AHP :

- a. **Comparaison par paires** : Les critères sont comparés deux à deux. À l'aide de l'échelle de Saaty (de 1 à 9), on attribue une note indiquant quel critère est le plus important par rapport à l'autre. Par exemple : le critère "Pente" est-il aussi important, légèrement plus important ou infiniment plus important que le critère "Distance aux routes" ?
- b. **Calcul des pondérations** : À partir de la matrice de comparaison, un calcul mathématique (vecteur propre principal) permet de normaliser les valeurs pour que la somme des poids de tous les critères soit égale à 100 % (ou 1).
- c. **Validation de la cohérence** : La méthode AHP calcule un *Ratio de Cohérence* (RC). Ce test mathématique permet de vérifier que les comparaisons deux à deux sont logiques et ne contiennent pas de contradictions. En général, ce ratio doit être inférieur ou égal à 0,1 (ou 10 %) pour que la pondération soit valide.

III.4.3 La méthode Fuzzy AHP (Approche Floue Hiérarchique) [22]

III.4.3.1 Concept de la méthode : Contrairement aux approches classiques (AHP Standard et Weighted Sum) qui imposent des jugements rigides et des frontières abruptes (dites "Crisp"), l'approche Fuzzy AHP repose sur la philosophie de la Logique Floue (Fuzzy Logic). En milieu naturel, et particulièrement dans l'hydrogéologie du plateau de Mostaganem, les phénomènes physiques ne changent pas de manière soudaine ou binaire. La perméabilité

d'une roche, l'influence d'une fracture ou l'inclinaison d'une pente ne s'arrêtent pas aux limites géométriques strictes d'un pixel.

L'esprit de cette méthode est d'introduire la notion de "degré d'appartenance" (Degree of Membership). Au lieu de classer un site comme "totalement favorable" ou "totalement défavorable", le modèle Fuzzy AHP exprime le potentiel de recharge en eau souterraine sous forme de probabilités continues et de transitions douces, reflétant ainsi la réalité et la complexité du terrain.

III.4.3.2 Mécanisme opérationnel et fonctionnement (En arrière-plan du script Python)

Le fonctionnement de cet outil personnalisé, développé et optimisé via un script Python, s'articule autour de deux phases complémentaires :

- a. La Fuzzification des Critères (Standardisation Floue) : Bien que les couches thématiques aient été initialement standardisées via une reclassification discrète (de 1 à 9) pour unifier les échelles, le moteur flou transforme ces valeurs entières en un continuum numérique compris strictement entre 0 et 1. À l'aide d'une fonction d'appartenance linéaire (Fuzzy Linear Membership), chaque cellule du raster reçoit une valeur décimale:
 - 0 : Exprime une non-appartenance totale (Mise à l'écart / Potentiel nul).
 - 1 : Exprime une appartenance absolue (Potentiel hydrogéologique optimal).
 - Les valeurs intermédiaires (ex. 0.54, 0.72) : Expriment les zones de transition naturelle et continue.
- b. L'intégration des poids flous (Agréation pondérée) : Une fois les critères "fuzzifiés", le script Python fusionne mathématiquement ces surfaces probabilistes avec les poids d'importance relative extraits de la matrice de Saaty (AHP). L'équation brise définitivement la structure pixelisée géométriquement rigide pour générer un gradient de couleur parfaitement fluide (Smooth Gradient).

```

Algorithmme 1 : Logique d'intégration spa Untitled-2
1  Algorithme 1 : Logique d'intégration spatiale et de pondération floue
2  DÉBUT_ALGORITHME : Outil_Fuzzy_AHP_Overlay_Locator
3
4  // Étape 1 : Phase de sécurisation de l'environnement SIG
5  VÉRIFIER la disponibilité de la licence logicielle "Spatial Analyst"
6  SI la licence est absente ALORS
7  | AFFICHER "Erreur : Licence Spatiale non disponible"
8  | ARRÊTER l'exécution
9  FIN_SI
10
11 // Étape 2 : Récupération des structures de données de l'interface graphique
12 CHARGER la liste ordonnée des 10 critères hydrogéologiques rééchantillonnés
13 LIRE la matrice textuelle brute des jugements flous triangulaires (l, m, u)
14 DÉFINIR le chemin physique d'exportation pour le Raster composite final
15 // Étape 3 : Processus de Défloutation (calcul automatisé des poids)
16 POUR chaque ligne de la matrice floue FAIRE
17 | EXTRAIRE la valeur centrale (m) du triplet flou triangulaire
18 | STOCKER la valeur (m) dans le vecteur de calcul des priorités
19 FIN_POUR
20
21 CALCULER la somme cumulative de toutes les valeurs centrales (m)
22 // Normalisation pour obtenir une somme de poids égale à 1.0
23 POUR chaque critère hydrogéologique FAIRE
24 | POIDS_CRITÈRE = (Valeur centrale courante / Somme cumulative)
25 FIN_POUR
26 // Étape 4 : Fuzzification Matricielle Cellulaire
27 POUR chaque couche de critère allant de 1 à 10 FAIRE
28 | APPLIQUER la fonction d'appartenance linéaire continue (Fuzzy Linear Membership)
29 | TRANSFORMER l'échelle discrète [1 à 9] en un continuum standardisé [0.0 à 1.0]
30 FIN_POUR
31 // Étape 5 : Agrégation cumulative pondérée (Overlay)
32 POUR chaque cellule (Pixel) de l'espace géographique FAIRE
33 | VALEUR_FINALE = Somme cumulative de (Raster_Fuzzifié * Poids_Critère)
34 FIN_POUR
35 // Étape 6 : Finalisation et Exportation
36 ENREGISTRER le Raster résultant continu sur le disque dur
37 AFFICHER "Analyse terminée avec succès ! La carte a été générée."
38
39 FIN_ALGORITHME

```

Figure III.22 : Pseudo-code de l'algorithme d'intégration et d'analyse spatiale floue (Fuzzy AHP) développé pour l'outil Fuzzy AHP Overlay Locator.

Pour des raisons de confidentialité algorithmique, de protection de la propriété intellectuelle et de valorisation industrielle du projet 'Eye Tech Water', le code source complet sous-jacent n'est pas divulgué dans ce document. À la place, la logique globale et l'architecture fonctionnelle de notre outil développé sont formalisées ci-dessous à travers son pseudo-code conceptuel.

III.4.3.3 Avantages pour la délimitation des sites de forage

Sur le plan décisionnel, l'intérêt majeur du domaine [0 - 1] généré par le Fuzzy AHP est double :

- Technique : Il élimine les "faux positifs" (les zones artificiellement surévaluées par l'AHP classique) en affinant les contours des cibles hydrogéologiques.
- Pratique : Il permet d'évaluer mathématiquement le niveau de risque avant le forage. Les valeurs finales représentent l'indice de certitude spatiale. Les valeurs les plus

proches du seuil supérieur désignent, avec une précision chirurgicale, les "Sweet Spots" (les sites optimaux) où les conditions environnementales et physiques convergent optimalement pour garantir le succès de l'implantation

III.5 Conclusion

En somme, ce troisième chapitre a permis de formaliser l'ensemble de l'arsenal méthodologique et informatique requis pour notre étude. L'organisation structurée de nos dix critères en axes fondamentaux — hydrogéologique, morpho-topographique et socio-économique — offre désormais une vision multidimensionnelle et harmonisée du territoire d'étude. De surcroît, la modélisation de notre algorithme via le pseudo-code de l'outil développé garantit la sécurité et l'automatisation du processus de défloutation et de transition vers le continuum [0-1]. Toutefois, la validation finale de ce moteur algorithmique ne peut être concrétisée sans une phase de traitement numérique intensif et une analyse comparative approfondie des résultats. C'est précisément cette transition logique qui fera l'objet du Chapitre IV. Nous y aborderons l'application pratique, les simulations cartographiques comparatives entre l'AHP traditionnel et notre approche standardisée Fuzzy-AHP, ainsi que la discussion des livrables cartographiques indispensables à la validation terrain des futurs forages hydriques.

Chapitre IV : Résultats et discussions.

IV Introduction

Le présent chapitre constitue le pivot opérationnel et décisionnel de notre recherche. Après avoir posé les fondements théoriques et configuré les bases de données multicritères dans les étapes précédentes, nous passons ici à la phase de simulation, de confrontation et de validation des résultats sur le terrain du plateau de Mostaganem.

L'objectif majeur de ce chapitre est double : d'une part, évaluer l'efficacité de notre outil développé basé sur la logique floue (Fuzzy AHP Overlay Locator) en le comparant objectivement aux approches de superposition cartographique conventionnelles (Somme Pondérée et AHP classique) ; d'autre part, démontrer la fiabilité applicative de ce modèle à travers l'architecture digitale de notre startup *Eye Tech Water*. Nous détaillerons ainsi le flux de travail, depuis la capture interactive de la parcelle du client jusqu'à l'extraction des sites d'implantation optimaux (*Sweet Spots*), tout en intégrant une contrainte hydrodynamique stricte d'espacement radial de 500 mètres pour garantir une exploitation durable et sécurisée des ressources en eau souterraine.

IV.2 Architecture de la plateforme digitale "*Eye Tech Water*"

Dans le cadre de la vision entrepreneuriale et de la valorisation industrielle de notre projet *Eye Tech Water*, l'application de notre modèle d'analyse spatiale ne se restreint pas à des manipulations logicielles internes isolées. Elle est au contraire intégrée au cœur d'une solution numérique globale à travers notre plateforme web interactive.

Le flux de travail (Workflow) et l'interaction de l'utilisateur avec l'interface se déclinent selon les étapes successives suivantes :

1. Accès à l'interface d'accueil : Le client ou l'investisseur accède en premier lieu à la page d'accueil officielle de la startup, qui présente les services de ciblage hydrogéologique automatisé, comme le montre la Figure IV.1 ci-dessous.

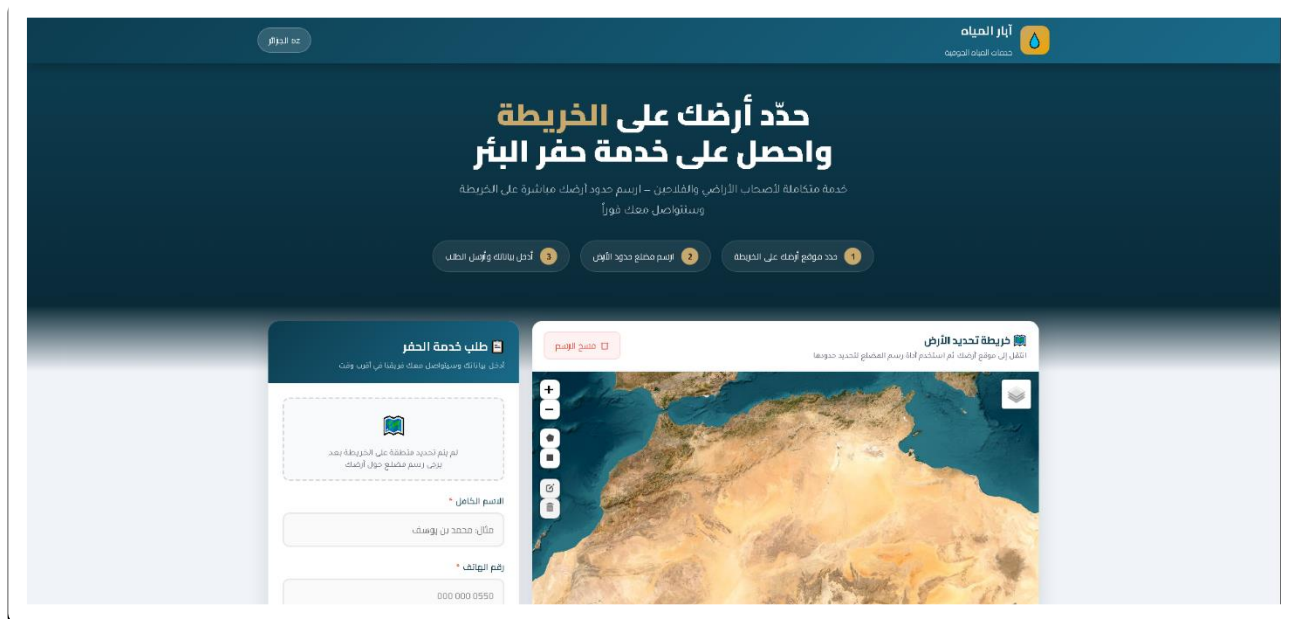


Figure IV.1 : Interface d'accueil principale de la plateforme digitale *Eye Tech Water*.

2. **Authentification et espace client :** L'accès sécurisé aux fonctionnalités cartographiques nécessite une authentification via un espace client dédié pour sauvegarder les projets d'étude. Illustration de cet accès par la Figure IV.2.

طلب خدمة الحفر

أدخل بياناتك وسيتواصل معك فريقنا في أقرب وقت

لم يتم تحديد منطقة على الخريطة بعد
يرجى رسم مخطط حول أرضك

الاسم الكامل *

مثال: محمد بن يوسف

رقم الهاتف *

000 000 0550

الولاية

البلدية

اسم البلدية

اختار

ملاحظات إضافية

مثال: عمق مياه تقريبي، نوع التربة، الغرض من البئر...

اختياري - أي معلومات إضافية تساعدنا على تقديم خدمة أفضل

إرسال طلب الحفر

Figure IV.2 : Interface d'authentification et de connexion sécurisée à l'espace utilisateur.

3. Tableau de bord et sélection du service : L'utilisateur visualise ses tableaux de bord et initialise une nouvelle demande d'analyse spatiale pour sa future zone d'exploitation (Figure IV.3).



Figure IV.3 : Tableau de bord utilisateur et catalogue des services de cartographie décisionnelle.

4. Détournage géométrique de la parcelle foncière : Grâce à un outil de dessin vectoriel intégré (basé sur des API cartographiques), le client trace directement sur l'écran les limites exactes sous forme polygonale de sa zone d'étude.

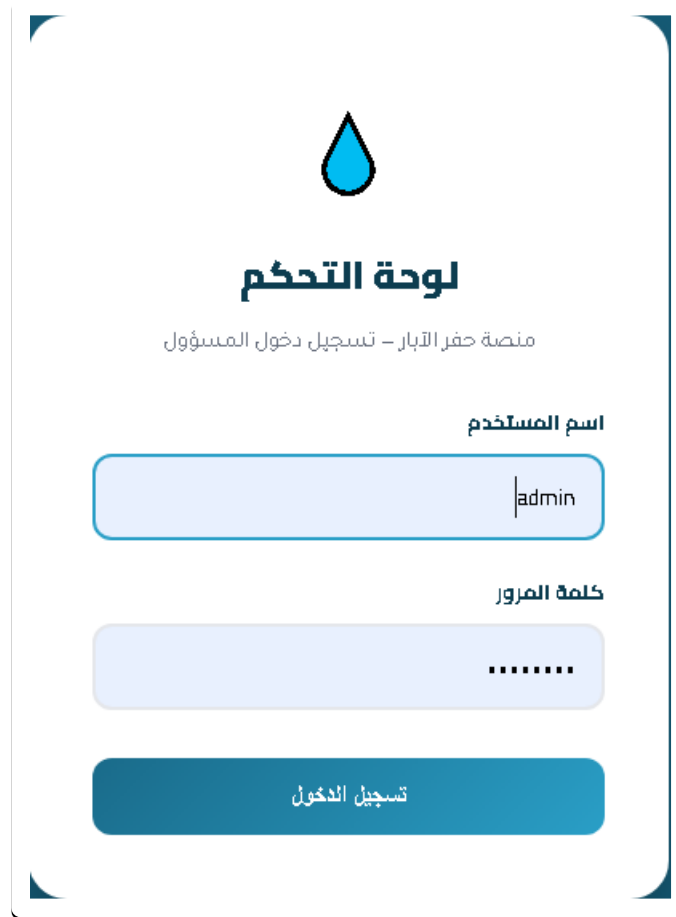


Figure IV.4 : Interface de connexion administrateur.

5. Validation et transfert des données vers le moteur SIG : Une fois le tracé validé, la plateforme confirme le succès de l'opération. Les coordonnées (X, Y) de l'emprise foncière sont instantanément envoyées en arrière-plan (Back-end) pour initialiser notre modèle Fuzzy AHP Overlay Locator sous ArcGIS.

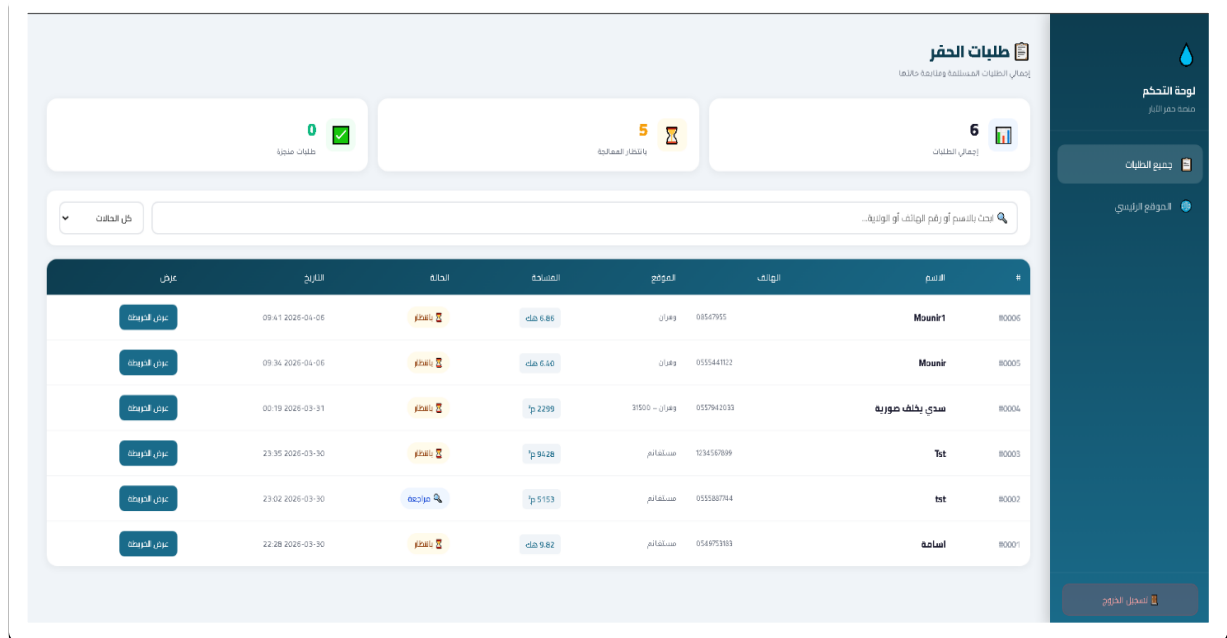


Figure IV.5 : Notification de succès de la soumission et transfert automatique des données vers le système de traitement géomatique.

IV.3 Résultats cartographique

IV.3.1 Résultats de la méthode Weighted sum

La mise en œuvre de la méthode Weighted Sum pour la délimitation des zones potentielles en eau souterraine a été réalisée selon une succession de quatre étapes clés au sein de l'environnement ArcGIS :

1. **Accès à l'outil via ArcToolbox :** En premier lieu, dans l'arborescence des extensions d'ArcGIS l'outil se situe précisément dans le chemin suivant, illustré sur la Figure IV.6.
ArcToolbox / Spatial Analyste Tools / Overlay / Weighted Sum.

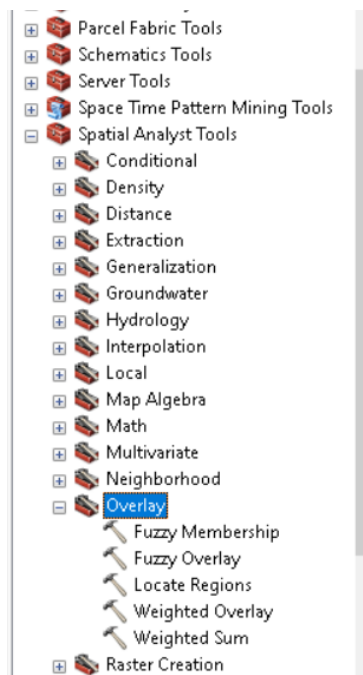


Figure IV.6: Emplacement de l'outil *Weighted Sum* dans l'extension *Spatial Analyst*

2. **Vérification de l'homogénéité des données d'entrée :** Avant toute superposition, nous avons veillé à ce que l'ensemble des 10 critères hydrogéologiques soient standardisés à la même échelle discrète allant de 1 à 9 (où 1 représente la potentialité minimale et 9 la potentialité maximale), comme montré sur la Figure IV.7.

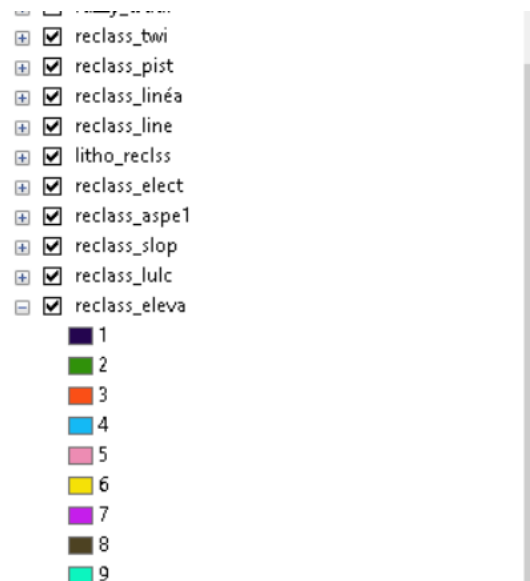


Figure IV.7 : Exemple d'échelle d'évaluation discrète (1 à 9) des critères reclassés.

3. **Paramétrage et intégration des pondérations** : Dans l'interface de l'outil *Weighted Sum*, les rasters thématiques ont été introduits un par un. Pour chaque critère, le champ d'analyse sélectionné est rigoureusement défini sur *VALUE*. Ensuite, nous avons attribué manuellement à chaque couche son poids d'importance relative calculé précédemment par la méthode AHP (par exemple : 0.22 pour la lithologie, 0.18 pour les linéaments, et 0.14 pour le TWI).

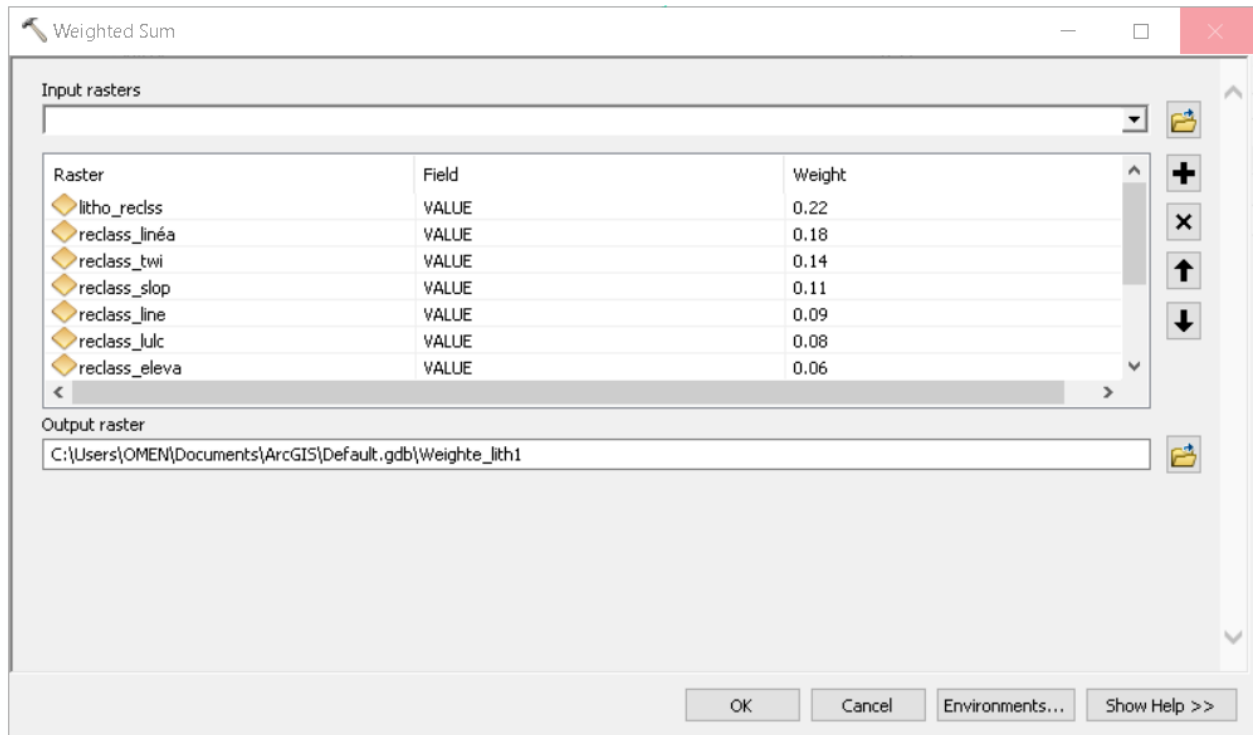


Figure IV.8 : Intégration des critères et l'application des coefficients de pondération de l'outil *Weighted Sum*.

4. **Génération du raster de sortie** : La dernière étape consiste à spécifier le chemin d'accès physique au niveau du champ *Output raster* pour enregistrer géographiquement le fichier résultant. Le logiciel exécute alors l'algorithme cellulaire pour compiler la carte brute de référence.

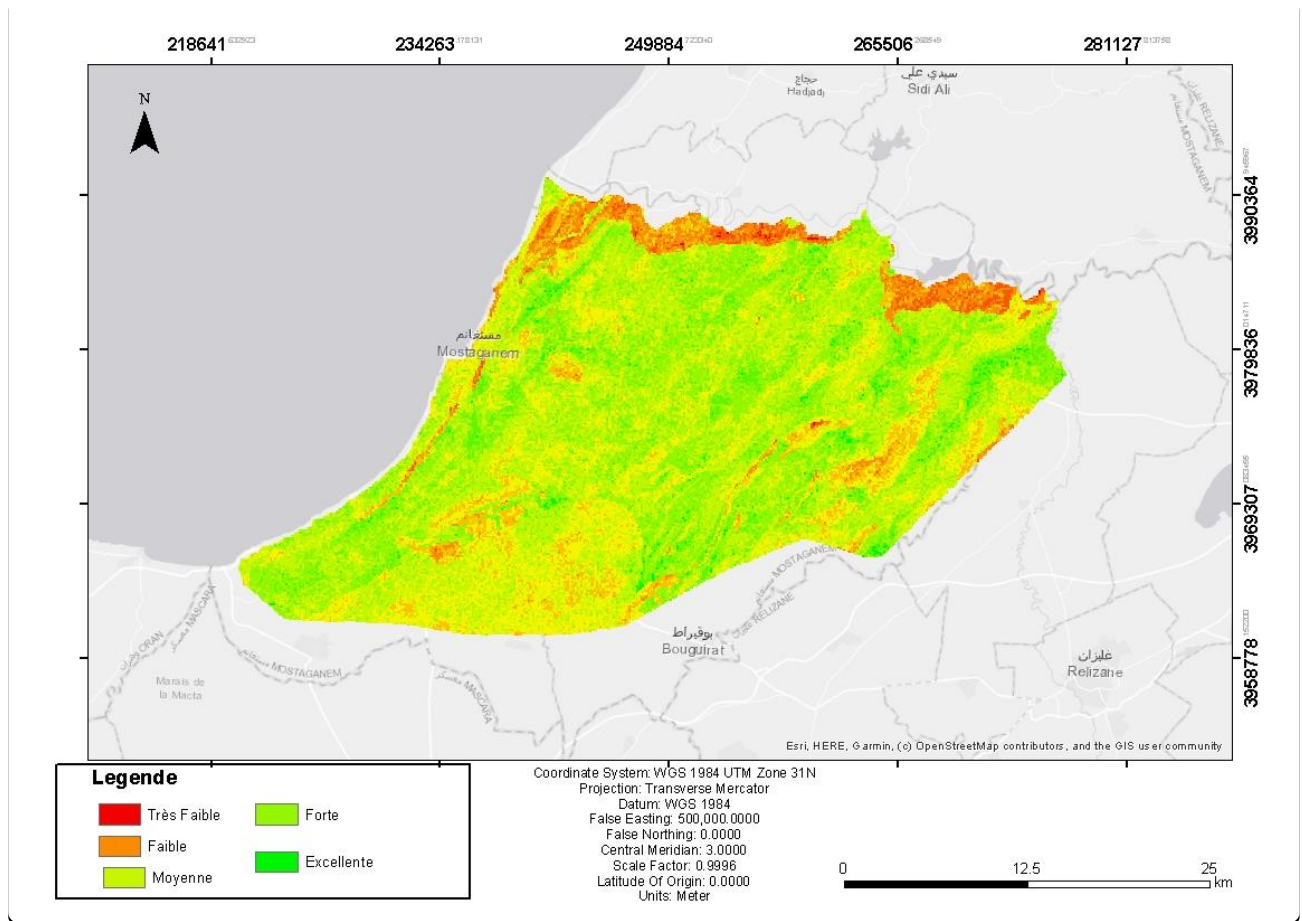


Figure IV.9 : Carte du potentiel en eau souterraine du plateau de Mostaganem par la méthode standard de la Somme Pondérée (*Weighted Sum*).

L'analyse spatiale de la carte de potentialité hydrogéologique issue de la méthode de la Somme Pondérée (*Weighted Sum*) met en évidence une répartition hétérogène des ressources, dictée par les classes numériques de la légende.

Les zones à potentiel *Très Faible* (valeurs inférieures à 3.10) s'observent principalement sous forme de poches isolées, fortement influencées par l'affleurements de formations marneuses imperméables. Les classes intermédiaires, qualifiées de *Faible* à *Modérée* (valeurs allant de 3.10 à 5.40), occupent la majeure partie de la surface centrale du plateau de Mostaganem, reflétant des zones où le ruissellement superficiel l'emporte sur l'infiltration en raison de pentes locales plus prononcées.

En revanche, les zones à *Bon potentiel* et *Excellent potentiel* (valeurs s'étendant de 5.40 à 7.13) se concentrent préférentiellement le long des couloirs de fractures tectoniques et des plaines à topographie plane. Ces secteurs coïncident avec les sables et grès hautement perméables qui optimisent la recharge de la nappe.

Cependant, l'examen de cette légende montre les limites de l'approche linéaire brute: les coupures entre les classes sont géométriquement nettes, ce qui crée des frontières artificielles sur le terrain et ne reflète pas la transition continue et floue qui caractérise la dynamique réelle des eaux souterraines.

IV.3.2 Résultats de la méthode AHP

Bien que la méthode *Weighted Sum* standard soit simple à exécuter, elle souffre d'une grande subjectivité lors de l'attribution directe des poids aux critères. Pour pallier cette limite et valider scientifiquement la pertinence de nos coefficients, nous avons intégré le processus d'analyse hiérarchique AHP développé par Thomas Saaty. Cette méthode structurée permet de comparer les critères par paires (deux à deux) afin d'évaluer leur importance relative, tout en contrôlant la cohérence logique des jugements portés à travers le calcul du Rapport de Cohérence (Consistency Ratio - CR).

A. Procédure opérationnelle et configuration matricielle sous ArcGIS

L'intégration du modèle AHP a été réalisée de manière interactive à travers les étapes illustrées par les captures d'écran suivantes :

A.1 Définition de la hiérarchie spatiale (Structure du problème) : La première étape consiste à bâtir l'arbre de décision. Comme le montre l'interface Figure IV.10, l'objectif central est placé au sommet (Niveau 1), tandis que les 10 rasters de critères reclassés (de *litho_reclss* jusqu'à *reclass_pist*) sont transférés et structurés en tant que critères de sous-niveau (Niveau 2) influençant directement la cible hydrogéologique.

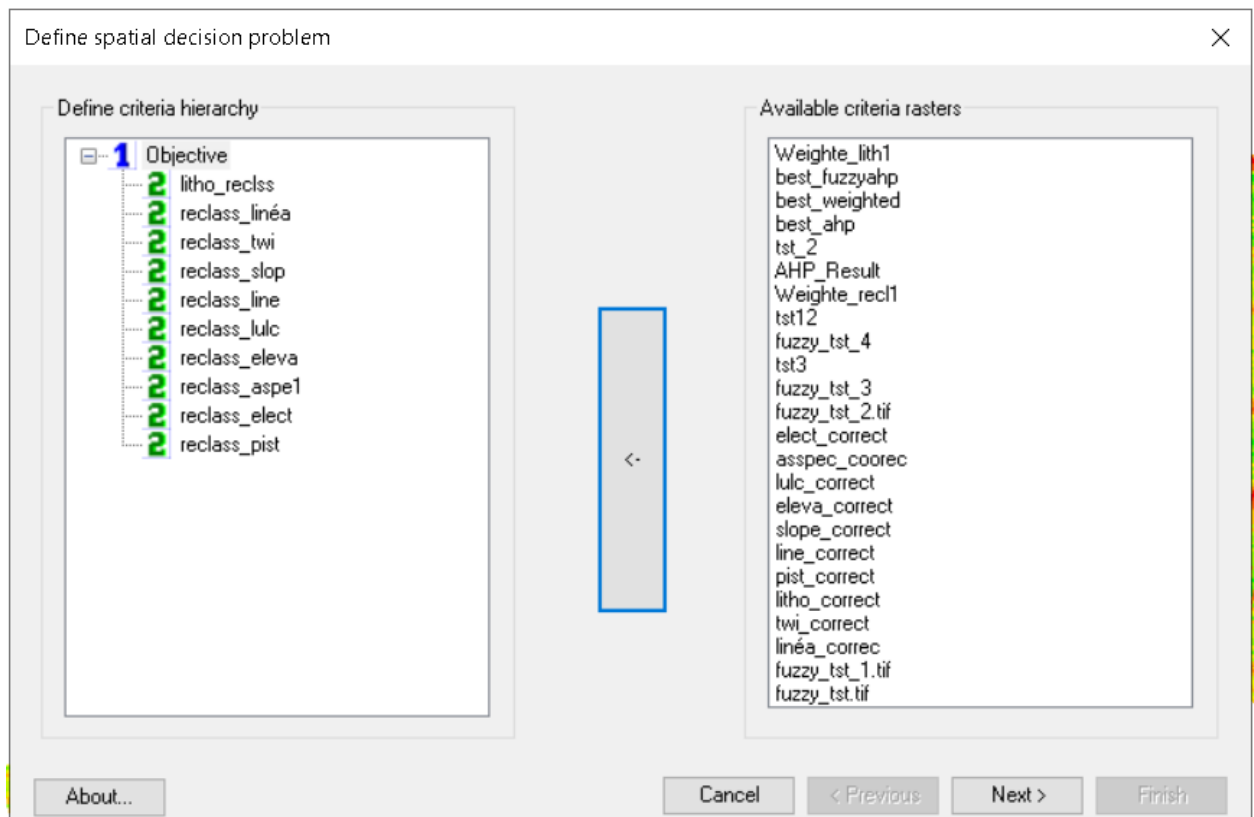


Figure IV.10 : Structuration hiérarchique du problème décisionnel hydrogéologique sous l'extension AHP.

A.2 Construction de la matrice de comparaison par paires : Une fois la structure validée, l'outil génère une matrice carrée symétrique. En se basant sur l'échelle sémantique de Saaty (allant de 1 à 9), nous avons introduit les valeurs de préférences hydrogéologiques. Par exemple, le critère *litho_reclss* présente une importance modérée à forte par rapport aux autres couches, se traduisant par des valeurs de 2, 3 et 4 dans la première ligne de la matrice. Les valeurs inverses (comme 0.5, 0.333) sont automatiquement calculées pour la partie inférieure de la matrice.

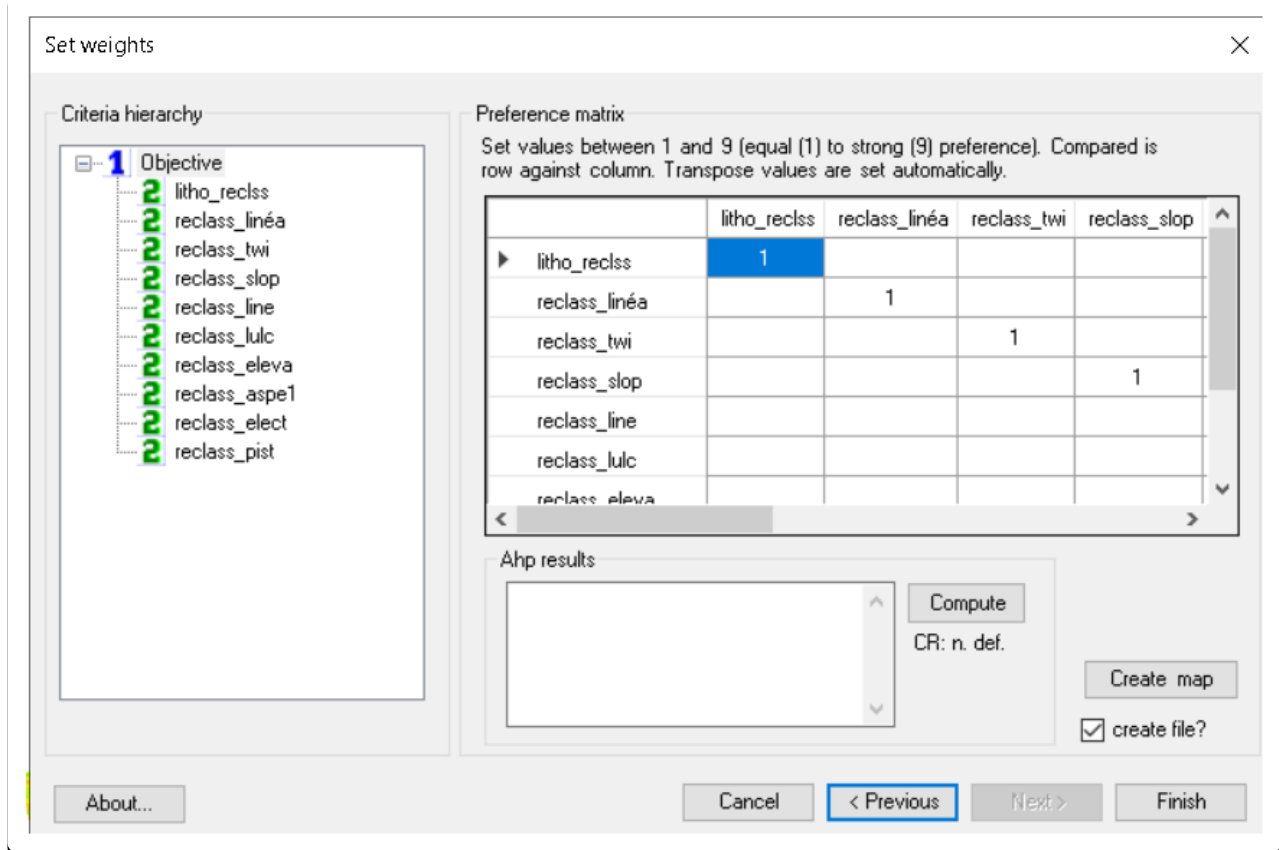


Figure IV.11 : Interface de saisie et d'ajustement de la matrice de comparaison par paires selon l'échelle de Saaty.

A.3 Calcul des poids et validation de la cohérence : En cliquant sur le bouton *Compute*, l'algorithme procède à l'extraction du vecteur propre pour déterminer les poids finaux (exprimés ici en pourcentage) :

- *litho_reclss* (Lithologie) : **29.437 %**
- *reclass_linéa* (Densité des linéaments) : **21.498 %**
- *reclass_twi* (Indice topographique d'humidité) : **15.365 %**
- *reclass_slop* (Pente) : **10.872 %**
- Les critères restants se partagent le reste de l'influence cumulative.

Validation cruciale : Le rapport de cohérence affiché est CR: 0, montré par la Figure IV.12 ci-dessous. Étant rigoureusement inférieur au seuil critique de 0.10 (10%), cela confirme

mathématiquement que nos jugements hydrogéologiques sur le plateau de Mostaganem sont parfaitement cohérents et exempts de contradictions aléatoires.

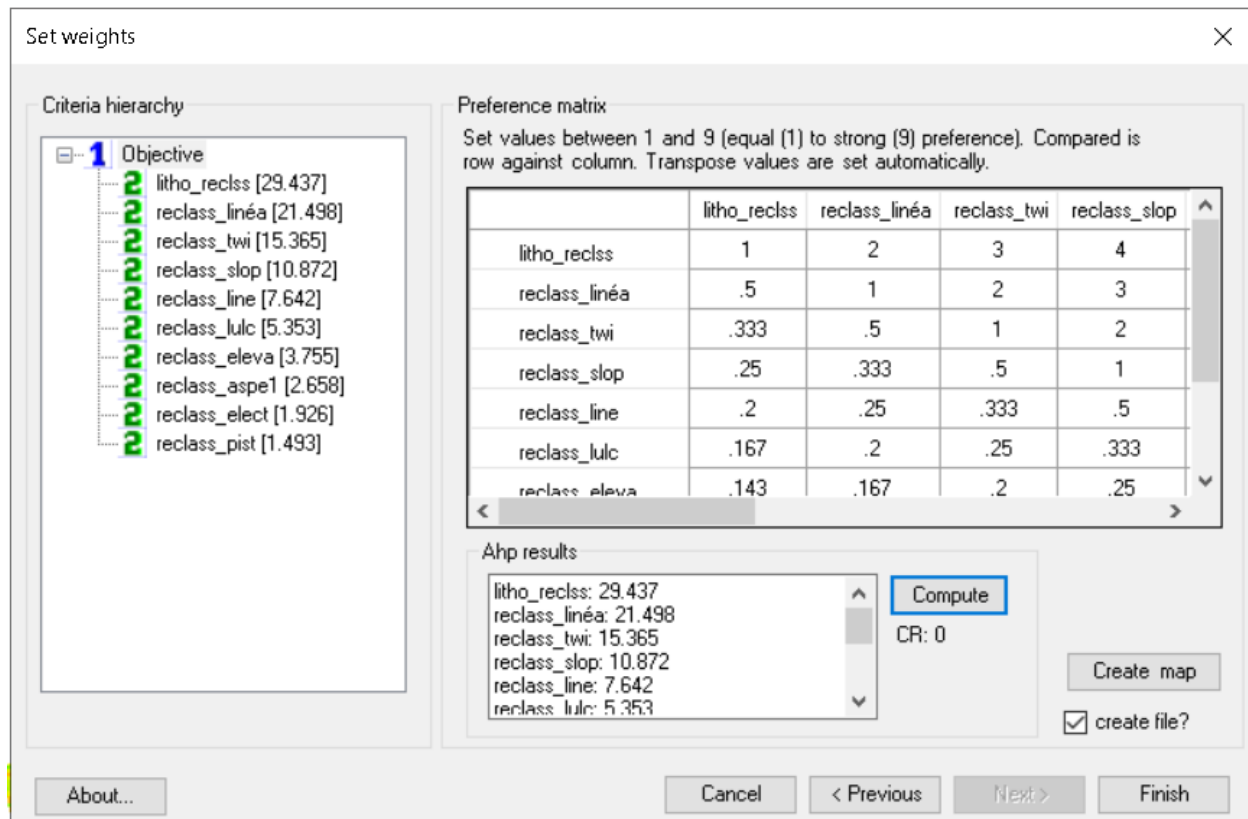


Figure IV.12 : Vecteur des poids générés et validation de la cohérence globale (CR = 0).

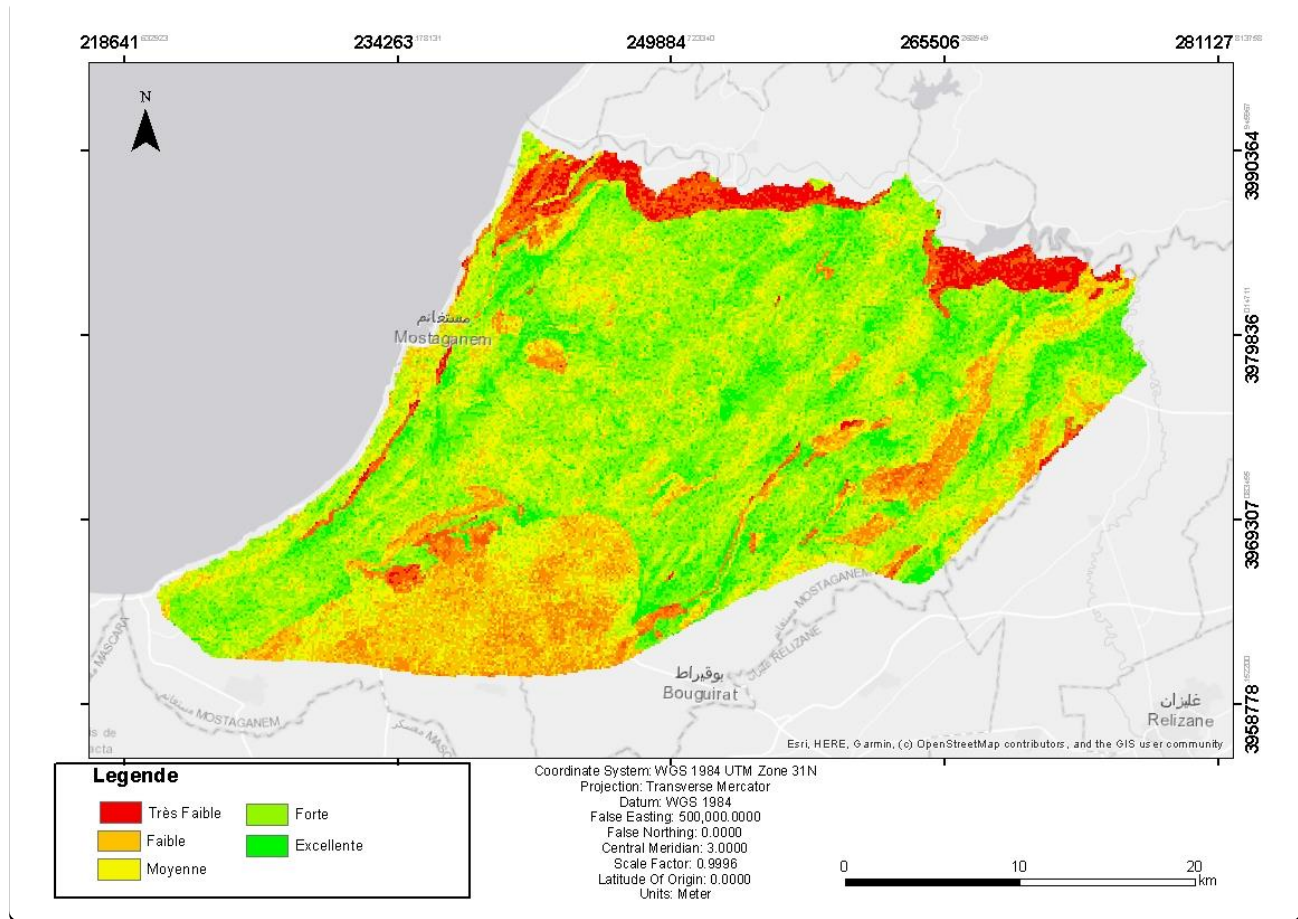


Figure IV.13 : Carte du potentiel en eau souterraine du plateau de Mostaganem par l'approche décisionnelle classique AHP.

L'application du vecteur propre standard a permis de générer la carte de potentialité classique (Figure IV.13), caractérisée par des frontières spatiales nettes et abruptes. L'analyse de la carte du potentiel hydrogéologique par la méthode AHP classique montre une nette amélioration de la discrimination spatiale, structurée selon les intervalles numériques de la légende.

Les zones à potentiel *Très Faible* (valeurs inférieures à 3.10) restent circonscrites aux secteurs dominés par des formations géologiques compactes (marnes) et de fortes pentes, agissant comme des barrières à la recharge. Les classes *Faible* et *Moyenne* (intervalles de 3.10 à 5.40) caractérisent les zones de transition du plateau de Mostaganem, où les conditions morpho-topographiques imposent un équilibre variable entre le ruissellement et l'infiltration. En revanche, les zones qualifiées de *Bonne* et *Excellente* potentialité (valeurs s'étendant de 5.40 à 7.13) s'étendent de manière plus cohérente que

dans le modèle précédent. Elles épousent fidèlement les couloirs à haute densité linéamentaire (fracturation active) et les plaines d'accumulation sablo-gréseuses, offrant les meilleures perspectives géométriques pour l'implantation de forages.

Toutefois, bien que la hiérarchisation de la légende soit scientifiquement plus robuste grâce à la matrice de comparaison par paire, le modèle AHP classique souffre encore d'une délimitation géométrique rigide. Les frontières nettes imposées entre les classes ne traduisent pas le caractère continu et dynamique de l'écoulement souterrain, justifiant ainsi le recours à la logique floue (Fuzzy AHP) pour affiner la précision.

IV.3.3 Application de la méthode FuzzyAHP

Bien que la méthode AHP traditionnelle valide la cohérence des poids, elle reste confinée dans une logique mathématique rigide (*Crisp Numbers*) qui ne reflète pas l'incertitude et la transition graduelle inhérentes aux phénomènes hydrogéologiques. Pour surmonter cette rigidité, nous avons implémenté l'approche *FuzzyAHP* (Analyse Hiérarchique Floue) basée sur les Nombres Flous Triangulaires (TFN : l, m, u). Afin d'automatiser entièrement ce processus complexe, nous avons conçu et codé notre propre outil de géo-traitement personnalisé intégré nativement dans ArcGIS.

IV.3.3.1 Procédure opérationnelle et exécution de l'outil développé

Le déploiement de notre solution algorithmique s'est déroulé à travers les étapes illustrées ci-dessous :

A. Appel de l'outil personnalisé depuis ArcToolbox : Dans l'arborescence du logiciel, nous avons créé un conteneur dédié nommé *Fuzzy Logic Groundwater Toolbox*, au sein duquel est logé notre script d'extension : *Fuzzy AHP Overlay Locator*.

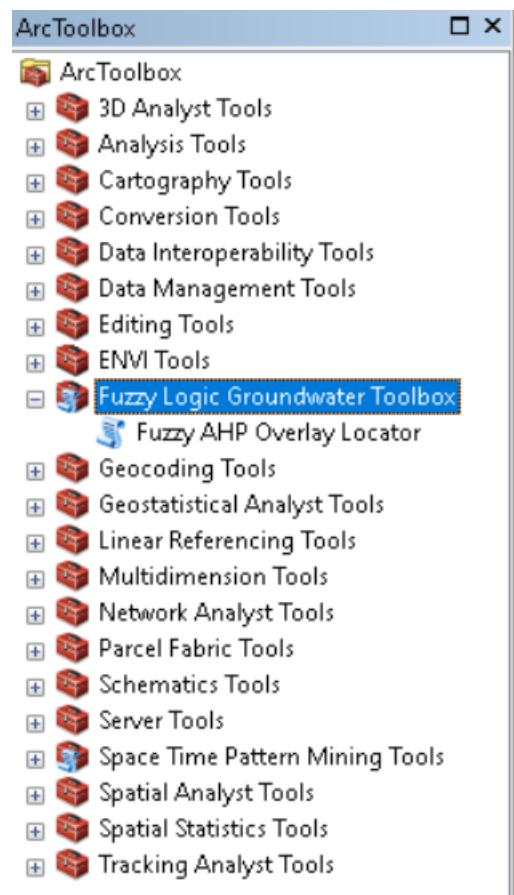


Figure IV.14 : Intégration de l'outil développé *Fuzzy AHP Overlay Locator* dans ArcToolbox.

B. Chargement vertical des critères et injection de la matrice floue : À l'ouverture de l'interface, les 10 critères hydrogéologiques reclassés sont importés verticalement dans la table des matières de l'outil. Dans le champ *Fuzzy Matrix*

$(l, m, u ; l, m, u)$, nous introduisons directement la chaîne de texte brute représentant les jugements flous triangulaires des experts (par exemple : 1.0,1.0,1.0 ; 0.7,0.85,1.0 ; ...). Le séparateur « ; » distingue les lignes matricielles.

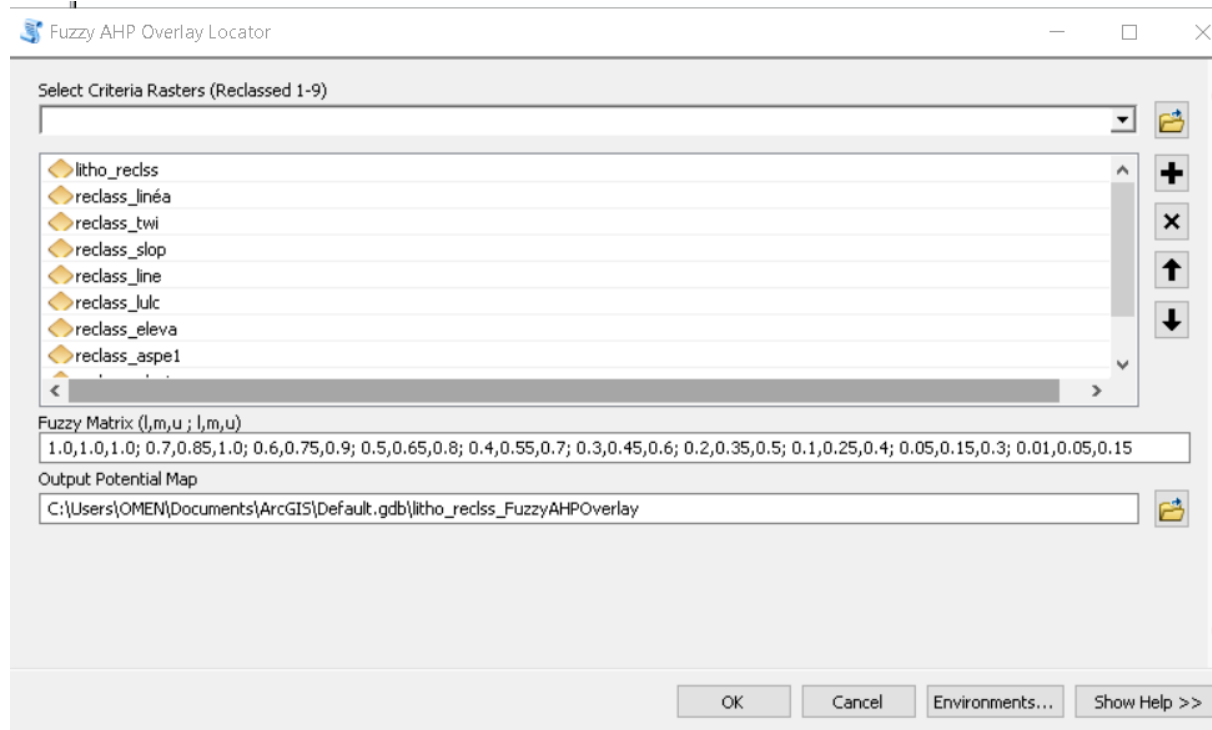


Figure IV.15 : Interface de saisie unifiée associant les rasters et la matrice floue triangulaire (l, m, u).

C. Exécution de l'algorithme d'intégration (Back-end By Python) : En cliquant sur le bouton OK, le script s'exécute en temps réel. La console de suivi affiche la progression de l'étape du calcul automatique des poids défloutés (Defuzzification et Normalization), affichant par exemple Couche 8 → Poids calculé : 0.0495, puis enchaîne instantanément sur l'étape suivante qui est la standardisation floue (0 à 1) et la superposition pondérée des rasters.

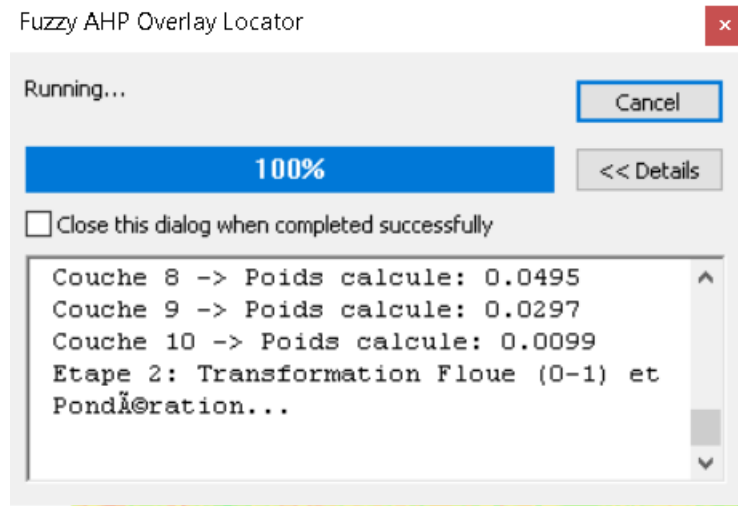


Figure IV.16 : Console de suivi du script Python illustrant la défloutation des poids et la superposition cellulaire.

D. Finalisation et génération du modèle spatial : Après un temps d'exécution optimal de seulement **22.25 secondes**, l'outil affiche le message de succès « Analyse terminée avec succès ! La carte a été générée ».

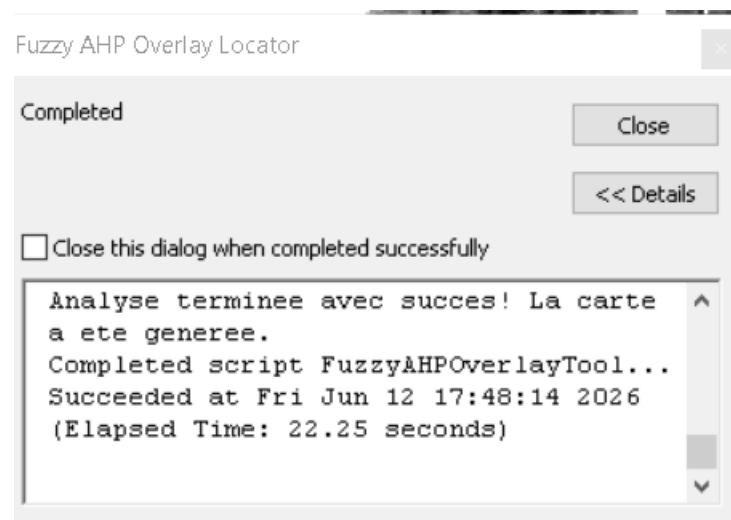


Figure IV.17 : Rapport de finalisation de l'outil avec succès et modélisation cartographique.

Le produit final est exporté vers la base de données spatiale sous forme d'une cartographie dynamique et continue.

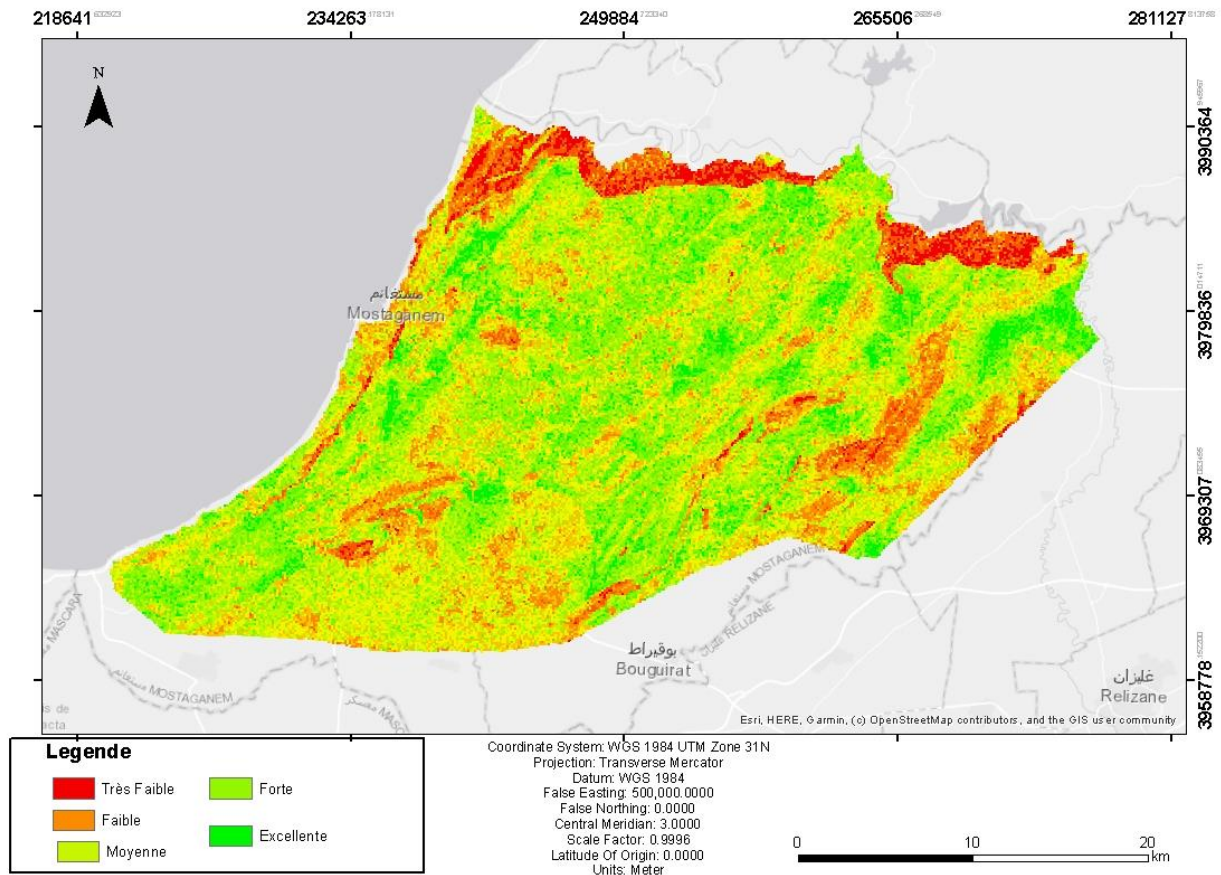


Figure IV.18 : Carte d'implantation et de favorabilité hydrogéologique continue générée par l'outil développé *Fuzzy AHP Overlay Locator*.

La carte finale générée par notre outil développé Fuzzy AHP transcende les limites des classifications rigides en introduisant un continuum de favorabilité hydrogéologique, dont les valeurs de la légende s'étendent de 0.13 (potentiel minimal) à 0.78 (potentiel maximal).

Les faibles valeurs de l'indice flou (inférieures à 0.35) sont reléguées aux zones périphériques et accidentées du plateau de Mostaganem, là où la lithologie marneuse imperméable et les fortes pentes agissent en synergie pour inhiber toute dynamique d'infiltration. Les valeurs intermédiaires (situées entre 0.35 et 0.60) traduisent les nuances

spatiales du territoire, reflétant une interaction modérée entre les facteurs environnementaux et anthropiques.

L'apport majeur de la logique floue se manifeste de manière spectaculaire dans la délimitation des pixels à haute valeur décisionnelle (valeurs supérieures à 0.65). Contrairement aux méthodes conventionnelles (Somme Pondérée et AHP classique), le modèle Fuzzy AHP n'affiche pas de frontières nettes ou géométriques, mais plutôt des gradients de transition hautement réalistes. Les zones d'excellence absolue — les *Sweet Spots* proches du seuil de 0.78 — se concentrent de façon chirurgicale le long des réseaux de fractures majeurs et des zones à topographie plane. Ces secteurs offrent une perméabilité et une capacité de recharge maximales, constituant ainsi la base de données stratégique indispensable pour garantir le succès et la rentabilité économique des futurs forages de la startup *Eye Tech Water*.

IV.4 Extraction des sites de forage optimaux respectant la contrainte de distancement Inter-Puits

L'étape ultime de notre démarche consiste à traduire les zones de forte potentialité floue en points d'implantation physiques et exploitables sur le terrain. À l'aide d'un algorithme de filtrage spatial sous ArcGIS, nous avons extrait les coordonnées des meilleurs sites (les *Sweet Spots*) pour les trois approches.

Afin de garantir une exploitation durable de l'aquifère du plateau de Mostaganem et d'éviter le phénomène d'interférence des cônes de rabattement (qui provoque l'assèchement prématuré des nappes), nous avons introduit une contrainte environnementale et technique stricte : un espacement radial minimal de 500 mètres entre chaque forage.

Pour mettre en relief la supériorité de notre approche, nous avons regroupé l'ensemble des points d'implantation extraits sur une unique carte comparative composite (Figure IV.22). Chaque méthode est représentée par une symbologie de couleur distincte, entourée d'une zone tampon (*Buffer*) de 500 mètres de rayon.

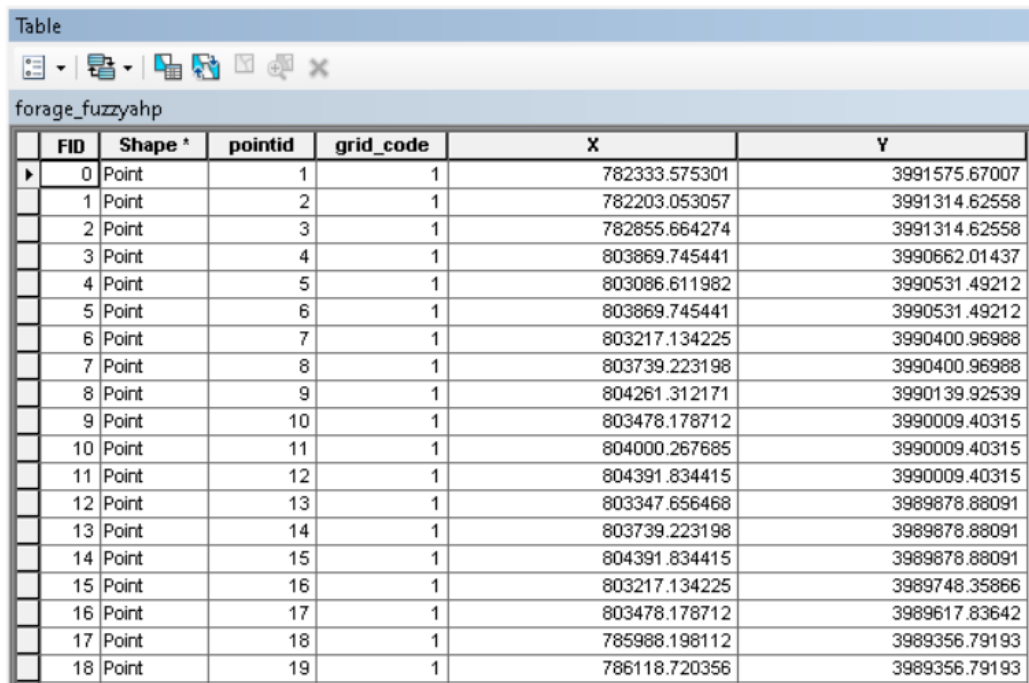
La superposition spatiale met en évidence que notre outil développé *FuzzyAHP* élimine drastiquement les *faux positifs* générés par les méthodes conventionnelles (Somme

Pondérée et AHP classique), qui tendaient à proposer des forages dans des secteurs hydrogéologiquement instables ou trop rapprochés. Notre solution offre ainsi un réseau d'implantation de forages optimisé, sécurisé et hautement rentable pour notre startup *Eye Tech Water*.

IV.4.1 Protocole d'extraction géospatiale des sites d'excellence (Sweet Spots)

Pour matérialiser le continuum de favorabilité floue généré par notre modèle *FuzzyAHP* en points d'implantation physiques, un protocole de traitement spatial a été exécuté comme suit :

- a. **Segmentation conditionnelle du raster (Filtrage des pixels) :** À l'aide de l'outil *Raster Calculator*, nous avons isolé uniquement les cellules spatiales atteignant les scores d'excellence hydrogéologique les plus élevés (valeurs de 0.70).



	FID	Shape *	pointid	grid_code	X	Y
▶	0	Point	1	1	782333.575301	3991575.67007
	1	Point	2	1	782203.053057	3991314.62558
	2	Point	3	1	782855.664274	3991314.62558
	3	Point	4	1	803869.745441	3990662.01437
	4	Point	5	1	803086.611982	3990531.49212
	5	Point	6	1	803869.745441	3990531.49212
	6	Point	7	1	803217.134225	3990400.96988
	7	Point	8	1	803739.223198	3990400.96988
	8	Point	9	1	804261.312171	3990139.92539
	9	Point	10	1	803478.178712	3990009.40315
	10	Point	11	1	804000.267685	3990009.40315
	11	Point	12	1	804391.834415	3990009.40315
	12	Point	13	1	803347.656468	3989878.88091
	13	Point	14	1	803739.223198	3989878.88091
	14	Point	15	1	804391.834415	3989878.88091
	15	Point	16	1	803217.134225	3989748.35866
	16	Point	17	1	803478.178712	3989617.83642
	17	Point	18	1	785988.198112	3989356.79193
	18	Point	19	1	786118.720356	3989356.79193

Figure IV.19 : Requêtage spatial conditionnel pour l'isolement des pixels optimaux via l'outil *Raster Calculator*.

- b. **Conversion vectorielle et Extraction des valeurs absolues :** Après avoir converti les structures matricielles en entités vectorielles ponctuelles, l'outil *Extract Values to Points* a été déployé pour intersecter la couche de points avec le raster flou original, générant automatiquement l'attribut *RASTERVALU*.

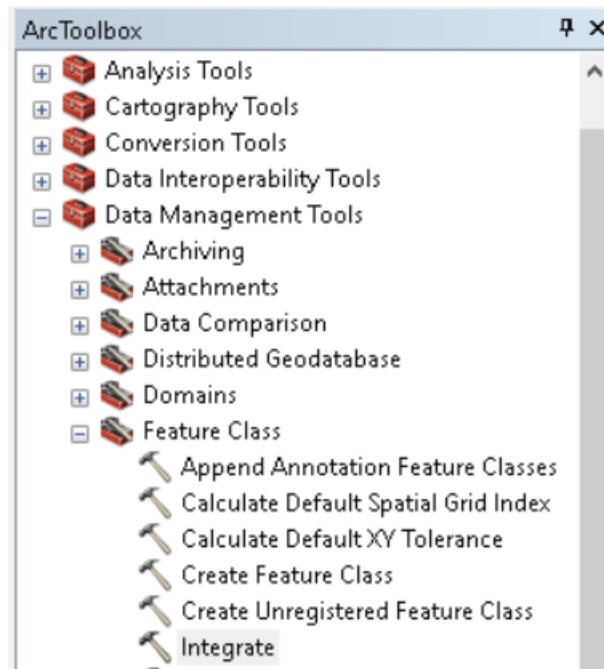


Figure IV.20 : Extraction et intégration des indices de favorabilité flous dans la table attributaire via l'outil *integrate*.

c. Automatisation du filtrage de sécurité et distancement hydrodynamique (500 mètres) : Afin de prémunir le réservoir aquifère contre le phénomène d'interférence des cônes de rabattement, une contrainte d'espacement radial minimal de 500 mètres a été imposée via la chaîne d'outils *Integrate* et *Delete Identical* :

c.1 Intégration et convergence spatiale (Outil Integrate) :

L'outil *Integrate* a été exécuté avec une tolérance spatiale (XY Tolerance) fixée strictement à 500 Mètres pour forcer la convergence de tous les points redondants situés dans un rayon inférieur à cette limite.

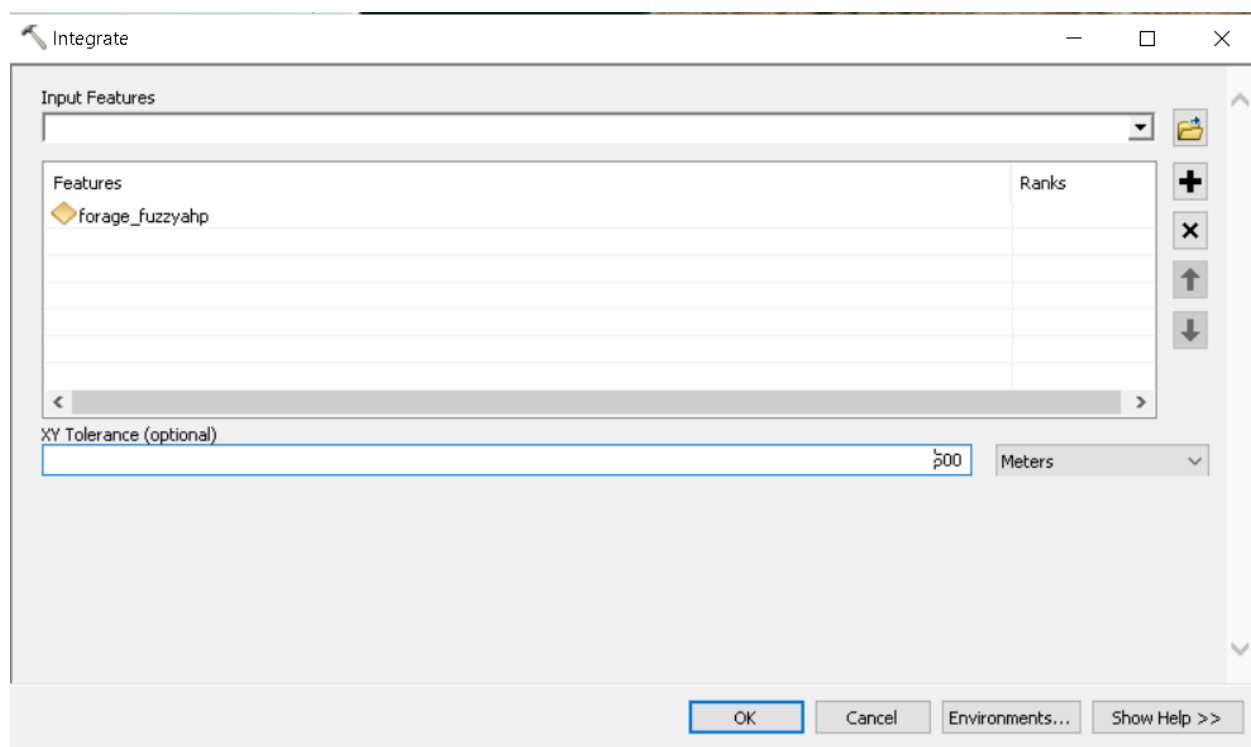


Figure IV.21 : Paramétrage de la tolérance d'intégration spatiale à 500m sous l'environnement ArcGIS.

c.2 Épuration des doublons topologiques (Outil Delete Identical) : L'étape finale consiste à purger les grappes de points superposés via l'outil *Delete Identical* en se basant sur le champ géométrique *Shape* pour ne conserver qu'un seul forage validé par secteur.

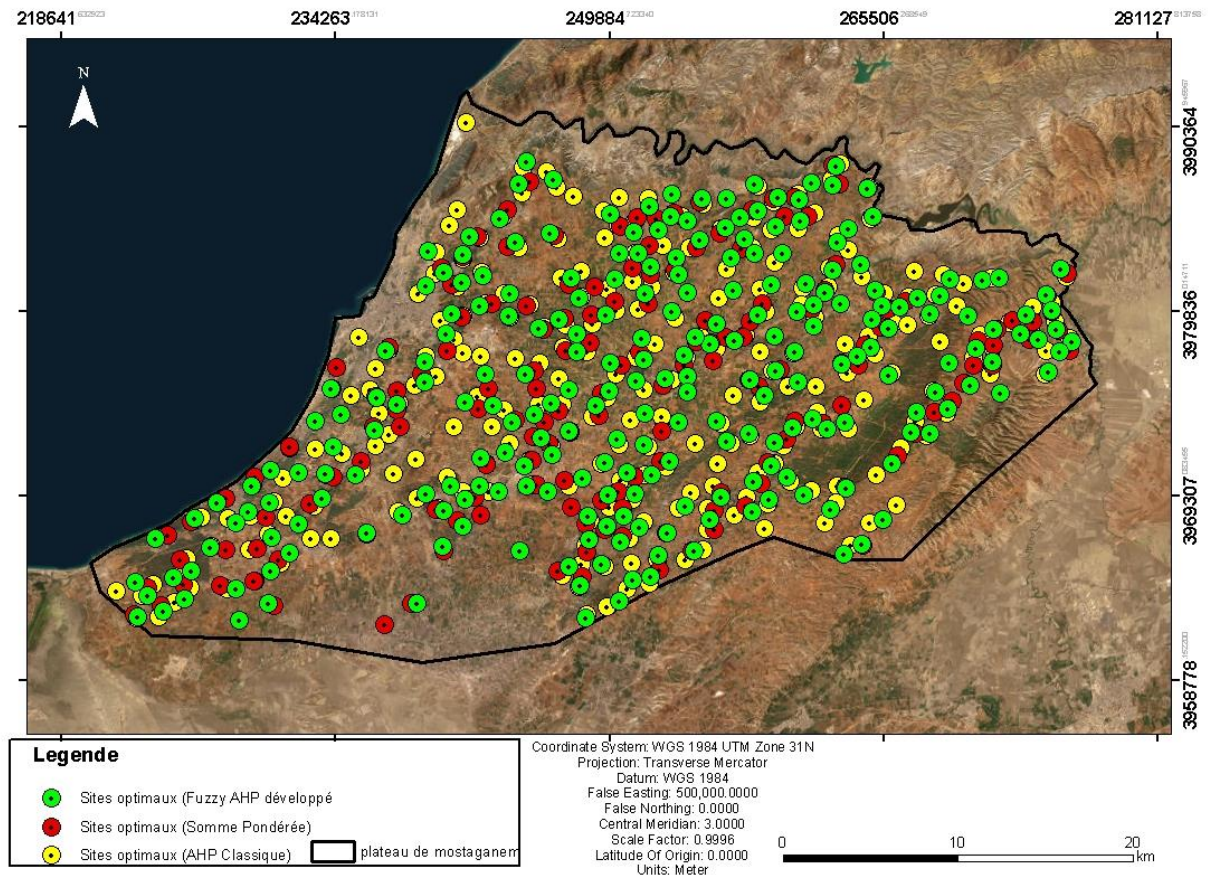


Figure IV.22 : Carte comparative composite d'implantation des forages optimaux et des zones tampons de sécurité (500 m) pour les trois méthodes.

La carte comparative composite finale constitue le jalon décisionnel majeur de notre étude, permettant de confronter spatialement les trois approches de ciblage hydrogéologique en se basant sur la symbologie stricte de la légende.

L'analyse de la répartition des points d'implantation révèle des comportements algorithmiques radicalement différents :

- Les sites issus de la méthode *Somme Pondérée* (Points Rouges) : Ils se caractérisent par une forte dispersion géométrique sur l'ensemble du plateau de Mostaganem. Cette méthode conventionnelle, n'intégrant aucune contrainte de voisinage ni de finesse matricielle, génère un nombre élevé de points, dont beaucoup se situent dans des zones à favorabilité théorique instable, créant ainsi des risques majeurs de *faux positifs* pour l'investisseur.

- Les sites issus de l'AHP classique (Points Bleus) : Bien qu'ils soient mieux localisés et plus concentrés que les précédents grâce à la hiérarchisation par paire des critères, ils tendent à regrouper des forages de manière trop dense et rapprochée dans certains couloirs spécifiques, ce qui s'avère hydro dynamiquement dangereux en cas d'exploitation simultanée.
- Les sites issus du modèle *FuzzyAHP* développé (Points Verts) : Ils représentent la sélection d'excellence de notre algorithme. Géographiquement, ces points se positionnent avec précision au cœur des zones combinant une perméabilité maximale, une faible pente et une densité de fracturation optimale. Ils éliminent les redondances des autres méthodes pour ne conserver que les véritables *Sweet Spots*.

Enfin, l'apport de la contrainte technique introduite est matérialisé dans la légende par la zone tampon de sécurité hydrogéologique de rayon de 500m. L'absence totale d'intersection ou de chevauchement entre ces cercles de protection démontre le succès de notre géo-programmation (via les outils *Integrate* et *Delete Identical*). Ce distancement radial strict de 500 mètres garantit qu'aucun cône de rabattement n'interférera avec un autre, assurant ainsi à la startup *Eye Tech Water* un réseau d'exploitation pérenne, durable et hautement sécurisé contre l'assèchement prématuré des nappes.

IV.5 Conclusion

En somme, les simulations et les traitements géospatiaux menés tout au long de ce chapitre ont permis de concrétiser les ambitions techniques et entrepreneuriales de notre projet. La confrontation spatiale des trois méthodologies met en évidence la supériorité incontestable de l'approche *FuzzyAHP* développée. En éliminant la rigidité des frontières binaires propres aux modèles classiques (*Somme Pondérée* et AHP), notre algorithme a su purifier la cartographie décisionnelle en écartant les *faux positifs* pour n'isoler que les sommets de favorabilité réelle.

De plus, l'automatisation de la contrainte d'espacement de 500 mètres, validée par l'absence totale de chevauchement des zones tampons de sécurité, apporte une réponse concrète au problème critique de l'interférence des cônes de rabattement dans l'aquifère du plateau de Mostaganem. À travers cette démonstration, la plateforme *Eye Tech Water* s'impose non pas comme un simple exercice académique, mais comme une solution d'ingénierie clé en main, hautement rentable et prête à être déployée sur le marché pour accompagner les investisseurs vers un forage intelligent, de précision.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Arrivé au terme de ce travail de recherche, nous pouvons affirmer que les objectifs scientifiques, techniques et entrepreneuriaux fixés au départ ont été pleinement atteints. Cette étude a permis de démontrer l'efficacité de la géomatique décisionnelle floue appliquée à la gestion et à la préservation des ressources en eau souterraine dans une région stratégique telle que le plateau de Mostaganem.

Sur le plan méthodologique, le développement de notre outil personnalisé Fuzzy AHP Overlay Locator a prouvé sa nette supériorité face aux approches de superposition linéaires rigides (Somme Pondérée et AHP traditionnel). En brisant les barrières artificielles des frontières binaires, la logique floue a restitué la continuité naturelle des propriétés hydrogéologiques du milieu. L'intégration réussie et automatisée de la contrainte technique des 500 mètres apporte une solution concrète et innovante pour stopper le phénomène d'interférence des puits, assurant la pérennité piézométrique de l'aquifère.

Sur le plan applicatif et industriel, ce projet transcende le cadre académique classique grâce au modèle de la startup *Eye Tech Water*. La conception de notre plateforme web interactive prouve qu'il est possible de démocratiser l'accès à l'information géospatiale complexe. Un agriculteur ou un investisseur peut désormais transformer une simple délimitation parcellaire sur écran en une étude hydrogéologique de haute précision, réduisant drastiquement le risque financier lié à l'échec des forages.

Bien que notre modèle soit robuste, il reste perfectible. En guise de perspectives, nous envisageons d'enrichir l'algorithme par l'intégration de données dynamiques en temps réel (telles que le suivi par satellite de la recharge des nappes et les variations saisonnières dues au changement climatique). De plus, l'intégration de modules d'intelligence artificielle (Machine Learning) permettrait de prédire à l'avance le débit exact du futur forage. L'aventure d'*Eye Tech Water* ne fait que commencer, se positionnant comme un acteur clé de l'agriculture de précision et de la durabilité hydrique en Algérie.

Références documentaires.

I. Références Bibliographiques.

- [04] STERRETT, R. J. *Groundwater and Wells*. Johnson Screens, Livre, 2007, pp. 244-245.
- [05] DRISCOLL, F. G. *Groundwater and Wells*. Johnson Division, Livre, 1986.
- [06] MARGAT, J. et VAN DER GUN, Jac. *Groundwater around the World: A Geographic Synopsis*, Livre, Édition Technique, 2013.
- [08] S. BELLAL, ABDELKADER, Baiche et OUASSINI, Dari. *Sècheresse Et Fluctuations Des Ressources En Eau Souterraines : Le Cas Du Plateau De Mostaganem (Ouest Algérien)*, Revue Scientifique, 2021, pp. 82-100.
- [09] HAFIDA, M. D. *Modélisation d'un processus d'aide à la décision*. Mémoire d'Étude, 2023, pp. 15-26.
- [12] F. BAYA. *L'apport de la géomatique dans la gestion des déchets ménagers dans le POS Ammar Zioual-BELGAID*. Mémoire de PFE, Master Géomatique, 2023-2024.
- [13] AUTEUR INCONNU. *Intelligence artificielle & Décision*. Rapport d'Étude, 2023, pp. 27-30.
- [14] M.A. BENKHEIRA. *Système d'Information Géographique 1*. Support de cours de Master 1 en Géomatique, 2024-2025.
- [16] AUTEUR INCONNU. *Méthode AHP : Analytic Hierarchy Process*. Document pédagogique, 2023, p. 9.
- [17] BENBRAHIM, D. M. *Cours Logique Floue*, Chapitre 3, Polycopié de cours, 2022, p. 2.
- [18] A. BEHNI, Chercheur au CTS, Communication personnelle, Interview et Entretien, avril 2026.
- [22] VAHIDNIA, M. *Fuzzy Analytical Hierarchy Process in GIS Application*. Article Scientifique, pp. 593-596.

II. Webographie.

- [01] AQUAPORTAIL. Définition de l'eau souterraine. Disponible sur : <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/7162/eau-souterraine> [Consulté le 05 mars 2026].
- [02] THE GROUNDWATER PROJECT. L'importance de l'eau souterraine. Disponible sur : <https://gw-project.org/fr/limportance-de-la-eau-souterraine/> [Consulté le 05 mars 2026].
- [03] SINODRILLS. What is borehole drilling? Disponible sur : <https://www.sinodrills.com/fr/what-is-borehole-drilling/> [Consulté le 02 mars 2026].

[07] RURAL WATER SUPPLY NETWORK. Rural water supply resources. Disponible sur : <https://www.rural-water-supply.net/en/resources/details/661> [Consulté le 15 mars 2026].

[10] ESRI. Qu'est-ce qu'un SIG ? Technologie de cartographie de système d'information géographique. Disponible sur : <https://www.esri.com> [Consulté le 05 mars 2026].

[11] CARMATEC. Les 5 principaux composants du SIG et leur importance. Disponible sur : https://www.carmatec.com/fr_fr/blog/les-5-principaux-composants-du-sig-et-leur-importance/ [Consulté le 05 mars 2026].

[15] STUDYSMARTER. Analyse multicritère : Génie chimique. Disponible sur : <https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/genie-chimique/analyse-multicritere/> [Consulté le 05 mars 2026].

[19] ESRI. ArcGIS Land Conservation Explorer. Disponible sur : <https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/> [Consulté le 03 mai 2026].

[20] ESRI. How Weighted Sum works - ArcGIS Pro Tool Reference. Disponible sur : <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-weighted-sum-works.html> [Consulté le 26 mai 2026].

[21] ArcGIS Home Item Overview. Disponible sur : <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=bb3521d775c94b28b69a10cd184b7c1f> [Consulté le 20 mai 2026]

