

N° d'ordre : 03/DSTU/2024



MEMOIRE

Présenté

à

L'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCES DE LA
TERRE ET DE L'UNIVERS
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Pour obtenir

LE DIPLÔME DE MASTER PROFESSIONNEL

Spécialité

Géo-Ressources

par

Nihel DJAFOUR

**Technologie géospatiale et analyse-décisionnelle multicritère pour la
cartographie des potentialités des eaux souterraines : cas des plaines de
Maghnia et Zeriga (NW-Algérie)**

Soutenu le 21 septembre 2024 devant les membres du jury :

Salamet MAHBOUBI MC (A), Univ. Tlemcen
Lamia YEBDRI, MC (B), Univ. Tlemcen
Nadjla BENTKHICI MR (B) , CTS, Oran
Fatiha HADJI, MC (B), Univ. Tlemcen

Président
Encadreur
Co-Encadreur
Examineur

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents, ma mère et mon père et à mes sœurs

Pour leurs patiences, leur amour, leur soutien et leurs encouragements

A ma grand-mère à qui je souhaite une bonne santé

A ma famille, en particulier mes cousines que j'aime

A mes chères amies Samah et sa maman Kawtar et Ikram pour leur aide, elles
étaient un support dans les moments difficiles

Enfin, à toute la promotion du Master Géo-ressources Professionnel

Nihel DJAFOUR

Table des Matières

Avant- propos	4
Résumé	5
Abstract	6

Introduction

I. PROBLEMATIQUE	7
II. OBJECTIFS	7
III. STRUCTURE DU MEMOIRE	7

Chapitre 1 : Cadre théorique

I. NOTION SUR LA TECHNOLOGIE GEOSPATIALE	9
A. Généralités sur la télédétection	9
1. Base physique de la télédétection	9
2. Images satellitaires	9
1.2. Landsat 8-ETM	9
2.2. Rayonnement et spectre électromagnétique	9
a. <i>Rayonnement électromagnétique</i>	10
b. <i>Spectre électromagnétique</i>	10
2.3. Signature spectrale	11
3. Processus de la télédétection	11
4. Traitement des données de télédétection	12
4.1. Composition colorée	12
4.2. Correction géométrique	12
5. Modèle numérique de terrain	13
B. Système d'information géographique	14
1. Définition et concepts de base des SIG	14
2. Composition des SIG	14
3. Mode de présentation des données géographique	14
3.1. Mode Raster	14
3.2. Mode vecteur	14
II. METHODES D'ANALYSE MULTICRITERE	15
A. Principe	15
1. Identification	15
2. modélisation	16
3. Evaluation et analyse	16
4. Recommandation	16
B. Définition des critères, pondération et agrégation des facteurs	17

1. Paramètres	17
1.1. Indicateur de disponibilité	17
1.2. Indicateur d'accessibilité	17
1.3. Indicateurs d'exploitabilité	17
2. Calcul de la pondération	18
2.1. Méthode de l'AHP pour l'analyse multicritère	18
2.1.1. Critère de décision	18
2.1.2. Classification et codification (note) des critères de décision	18
3. agrégation des facteurs	19

Chapitre 2 : Cadre pratique

I. PRESENTATION DE LA REGION DE MAGHNIA	21
A. géographie et climat	21
B. Hydrologie	21
C. géologie et hydrogéologie	21
1. Sur le plan géologique	23
2. sur le plan hydrogéologie	24
D. Population et activités économiques	24
III. DISPONIBILITE DES DONNEES	24
A. Données satellitaires	24
B. Données géo-scientifiques	25
1. Données cartographiques	25
2. Base de données des forages de la zone d'étude	28
3. Données issues des travaux de terrain	28
III. MATERIEL ET METHODES	29
A. Présentation de l'outil	29
1. Présentation de l'outil ENVI (<i>Version 4.5</i>)	29
2. Présentation de l'outil ARCGIS (<i>Version 10.8.1</i>)	29
B. Traitement d'imagerie Landsat et modèles numériques de terrain	30
1. Cartographie de l'occupation du sol	30
1.1. Acquisition des images satellitaires	30
1.2. Le prétraitement	30
1.3. Correction géométrique et radiométrique	30
1.4. Evaluation et validation de la classification	30
2. Extraction des paramètres morphométriques	31
3. Méthodes d'interpolation spatiale	31

Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

I. METHODE D'ANALYSE MULTICRITERE	32
A. Préparation des paramètres	32
1. occupation du sol	32
2. Pente	33
3. Densité hydrographique	35
4. Perméabilité	36
5. Densité de fracturation	38
6. Infiltration	39
7. Profondeur de l'eau souterraine	41
7.1. Niveau statique	41
7.2. Niveau dynamique	41

8. Débit d'exploitation	43
B. Application de la méthode AHP	43
C. Carte des potentialités des eaux souterraines de la région de Maghnia	44
II. VALIDATION DE LA METHODE MULTICRITERE PAR EVALUATION DE LA QUALITE CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES	46
<i>Conclusions</i>	49
<i>Références bibliographiques</i>	51
<i>Liste des figures</i>	55
<i>Liste des tableaux</i>	56

Avant- propos

Avant- propos

Tout d'abord je remercie **ALLAH** Miséricordieux, qui de par sa présence et sa grâce m'a donné la santé et la volonté d'entamer et d'achever ce mémoire.

Je tiens à remercier mon encadrante Madame **Lamia YEBDRI-MAHI**, Maître de conférences (B) au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers (Université de Tlemcen) pour sa patience et pour ses conseils et ses critiques

Je remercie ma Co-encadrante Madame **Nadjla BENTKHICI**, Maître de recherche (A), au Centre des Techniques Spatiales – Arzew, pour son suivi méticuleux et son assistance durant notre période de stage au CTS, je suis très reconnaissante envers elle pour ses précieux conseils tout au long de la réalisation ce projet.

Mes remerciements s'adresse également à Mme. **Salamat MAHBOUBI**, Maître des conférences (A) au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, à l'Université Abou BekrBelkaïd-Tlemcen d'avoir accepté de présider ce jury.

Je tiens à remercier Mme **Fatiha HADJI**, Maître des Conférences (B) au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, de l'Université Abou BekrBelkaïd-Tlemcen d'avoir bien voulu examiner ce manuscrit.

Je ne tarderai de remercier **M. Abbas MAROK**, Professeur et **M. Kamar-Eddine BENSEFIA**, Maître des Conférences (B) au département des Sciences de la Terre et de l'Univers, à l'Université Abou BekrBelkaïd, pour leurs présences et assistances auprès des étudiants de master GRP.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers tout le corps enseignant du département de STU (géologie) pour la diversité et la qualité de l'enseignement qu'ils dispensent avec de grands efforts afin de garantir une formation de qualité.

Un grand merci s'adresse au personnel du Centre des Techniques Spatiales (CTS), Arzew- Oran à commencer par son directeur M. **MAHI**, qui grâce à lui, le stage a eu lieu avec succès et confort. A Monsieur **Lahsen Wahib KEBIR**, Ingénieur principal et sous-chef du département de Télédétection, pour son accueil chaleureux, en me mettant dans les meilleures conditions, tout en m'orientant afin de faciliter la bonne réussite de ce travail. A M. **Abdelatif DEHNI**, avec qui j'ai acquis le principe du fonctionnement des logiciels et leurs différentes utilisations. Mes remerciements s'adressent également aux différentes équipes pour avoir mis à ma disposition tous les locaux nécessaires durant toute la période du stage.

Enfin, mes profonds remerciements vont à mon oncle **Ghouti KAZI TANI** pour son aide et pour sa patience durant les sorties de terrain, à mes tous amis (es) de ma promotion du Master GRP.

Résumé

Résumé

Le présent travail a utilisé la technologie géospatiale et l'approche décisionnelle-multicritère par méthode AHP, pour cartographier les potentialités des aquifères plio-quaternaires de la région de Maghnia (NW de l'Algérie).

Neuf paramètres ont été intégrés à savoir : l'occupation du sol (OS), la pente (P), la densité du réseau hydrographique (DH), la lithologie ou perméabilité du sol (P), l'infiltration (I), la densité de fracturation (DF), le niveau statique (NS), le niveau dynamique (ND) et le débit d'exploitation ($Q_{exp.}$).

La réalisation de la carte des potentialités en eau souterraine a démontré que près de 72% de la superficie globale de la zone d'étude dispose d'une bonne réserve d'eau souterraine, répartie entre 37.71% à potentiel moyen et 34% englobant les potentiels fort et très fort. Ces zones à pente relativement faible qui permettent la recharge des nappes, sont convenables à l'implantation d'ouvrage hydraulique à débit intéressant pour l'exploitation.

La validation de la carte des potentialités par évaluation de la qualité des eaux souterraines de la région considérée a été réalisée moyennant les concentrations des chlorures et des nitrates mesurées pour les eaux échantillonnées dans les quatorze forages durant la campagne d'échantillonnage au mois de Mars 2024. Elle a montré que la contamination des eaux souterraines, et par conséquent, des cultures irriguées, par les nitrates reste faible même pour des futures implantations. Cependant le choix des cultures dans la zone d'étude doit être adéquat par rapport aux taux en chlorure considérablement élevés dans certaines zones de la région, présentant une toxicité modérée à sévère surtout dans la partie nord et nord-est de la région.

Mots clés : AHP, Potentialités, Maghnia, Eaux souterraines, Qualité, Approche décisionnelle-multicritère.

Abstract

Abstract

This study used geospatial technology and the AHP multi-criteria decision approach to map the potential of plio-quadernary aquifers in the Maghnia region (NW Algeria).

Nine parameters were integrated: land use (OS), slope (P), density of the hydrographic network (DH), soil lithology or permeability (P), infiltration (I), fracturing density (DF), static level (NS), dynamic level (ND) and exploitation rate (Q_{exp}).

The groundwater potential map showed that almost 72% of the overall surface area of the study area has a good groundwater reserve, divided between 37.71% with medium potential and 34% with high and very high potential. These areas have a relatively gentle slope, allowing the groundwater to be recharged, and are suitable for the installation of hydraulic structures with a flow rate that is attractive for exploitation.

The validation of the potentiality map by assessing the quality of the groundwater in the region under consideration was carried out using the chloride and nitrate concentrations measured in the water sampled in fourteen boreholes during the sampling campaign in March 2024. This showed that nitrate contamination of the groundwater, and consequently of irrigated crops, remains low even for future planting. However, the choice of crops in the study area must be appropriate in view of the considerably high chloride levels in certain areas of the region, presenting moderate to severe toxicity, especially in the northern and north-eastern parts of the region.

Key words: AHP, Potentiality, Maghnia, Groundwater, Quality, Multi-criteria decision-making approach.

Introduction

I. PROBLEMATIQUE

Les eaux souterraines constituent une réserve principale pour satisfaire les besoins d'eau des hommes et de leur environnement. Elles sont considérées comme ressources importantes comme dans les domaines d'irrigation, précisément dans les régions à climat semi-aride et aride où les précipitations sont rares. A cet égard, l'exploration et l'exploitation rationnelle de la ressource hydrique souterraine devient une des préoccupations majeures des communautés scientifiques, économiques et même politiques.

En plus des méthodes classiques appliquées pour la prospection des ressources hydriques souterraines, de nouvelles méthodes ont pu voir le jour, à l'exemple de l'emploi des technologies géo-spatiales en combinaison avec les méthodes d'analyse multicritère qui offrent des opportunités prometteuses pour de meilleure prise de décision dans le choix implantation des sites de forage à grande productivité.

II. OBJECTIFS

La région frontalière de Maghnia au nord-ouest algérien, est devenue un pôle agricole et d'industrie agroalimentaire au vu des importants investissements consentis dans ces deux secteurs (<https://www.agroligne.com/actu>); mais ce développement socio-économique, ainsi que la conjoncture climatique atypique de la région, impliquent des implantations anarchiques des forages hydraulique qui à leurs tours ont engendré un déficit des ressources en eaux.

Ce travail de fin d'étude vise la réalisation d'une cartographie des potentialités des eaux souterraines dans la région de Maghnia incluant la plaine de Maghnia et celle de Zriga. Ceci a été tenté par une approche méthodologique qui s'appuie sur l'intégration des systèmes information géographique couplés aux techniques de la télédétection et d'analyse décisionnelle multicritère par AHP (*Analyse hiérarchique des processus*).

III. STRUCTURE DE MEMOIRE

Le présent mémoire s'articulera autour de trois (3) chapitres avec une introduction où sont exposés la problématique et les objectifs du sujet. Ces chapitres sont étoffés par une conclusion.

- Le premier chapitre présente les notions théoriques sur la technologie géo-spatiale et les analyse multicritères utilisées pour la cartographie des potentialités des eaux souterraines
- Le seconde chapitre s'intéresse à la fois à la présentation détaillée de la région de Maghnia à savoir : les contextes géographique, géologique et hydrogéologique, aussi aux données utilisées, et aussi au méthodes déployées pour les différentes interprétations.

- Le troisième et dernier chapitre consiste à préparer des cartes thématiques des critères employés pour obtenir une cartographie finale des potentialités des eaux souterraines du secteur d'étude. Enfin une évaluation de la vulnérabilité chimique par la carte des potentialités a été tentée.

*Chapitre 1 : Cadre
théorique*

I. NOTION SUR LA TECHNOLOGIE GEOSPATIALE

A. Généralités sur la télédétection

1. Base physique de Télédétection

La télédétection est une méthode qui permet d'obtenir des données sur des objets ou des phénomènes à la surface de la Terre sans avoir à les toucher directement (Girard et Girard, 2010). Cette méthode repose sur la reconnaissance et l'enregistrement de l'énergie émise ou réfléchiée par la surface terrestre dans diverses régions du spectre électromagnétique à l'aide des avions et de satellites (<https://eos.com/fr/blog/teledetection/>).

2. Images satellitaires

Une image de satellite est une photographie de la surface de la Terre ou de l'atmosphère, obtenue grâce à des capteurs installés sur des satellites en orbite environnante (Chuvioco, 2016). Ces images sont créées en utilisant des données numériques recueillies en mesurant les rayonnements électromagnétiques réfléchis ou émis par les objets à la surface de la Terre (Jensen, 2015).

2.1. Landsat 8-ETM

Landsat 8 (anciennement la mission Landsat Data Continuity, ou LDCM) a été lancé sur une fusée Atlas-V depuis la base aérienne de Vandenberg, en Californie, le 11 février 2013. Le satellite transporte les instruments Operational Land Imager (OLI) et Thermal Infrared Sensor (TIRS) (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>).

L'OLI mesure dans les parties visible, proche infrarouge et infrarouge à ondes courtes (VNIR, NIR et SWIR) du spectre. Le TIRS mesure la température de surface terrestre dans deux bandes thermiques avec une nouvelle technologie qui applique la physique quantique pour détecter la chaleur. Les images de Landsat 8 ont des résolutions spatiales panchromatiques de 15 mètres et multispectrales de 30 mètres le long d'une bande de 185 km (115 mi) (Tableau 1) (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>).

Tableau 1 : Caractéristiques des bandes Landsat 8 (Al-sulaiman et al., 2017)

Bande	Résolution (m)	Longueur (µm)
Bande 1 : Aérosol côtier	30	0.43-0.45
Bande 2 : Blue	30	0.45-0.51
Bandes 3 : Vert	30	0.53-0.59
Bande 4 : Rouge	30	0.64-0.67
Bande 5 : Proche infrarouge	30	0.85-0.88
Bande 6 : SWIR 1	30	1.57-1.65
Bande 10 : Infrarouge thermique 1	100*(30)	10.60-11.19
Bande 11 : Infrarouge thermique 2	100*(30)	11.50-12.51
Bande 7 : SWIR 2	30	22.11-2.29
Bande 8 : Panchromatique	15	0.50-0.68
Bande 9 : Cirrus	30	1.36-1.38

2.2. Rayonnement et spectre électromagnétiques

a. *Rayonnement électromagnétique* : L'énergie qui éclaire la cible, se présente sous forme d'un rayonnement électromagnétique, qui désigne donc l'ensemble des radiations de natures similaires mais dont les longueurs d'ondes sont différentes. Les rayonnements électromagnétiques sont le plus souvent appelés lumière, que celle-ci soit visible par l'homme (lumière blanche) ou non (ultraviolet, infrarouge, rayon...etc.). Il est composé d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (B). Le champ électrique varie en grandeur et est orienté de façon perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement (Fig. 1). Le champ magnétique (B) est orienté de façon perpendiculaire au champ électrique (E). Les deux vecteurs champs E (vertical) et B (horizontal) vibrent d'une manière perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière C (Bersi, 2018).

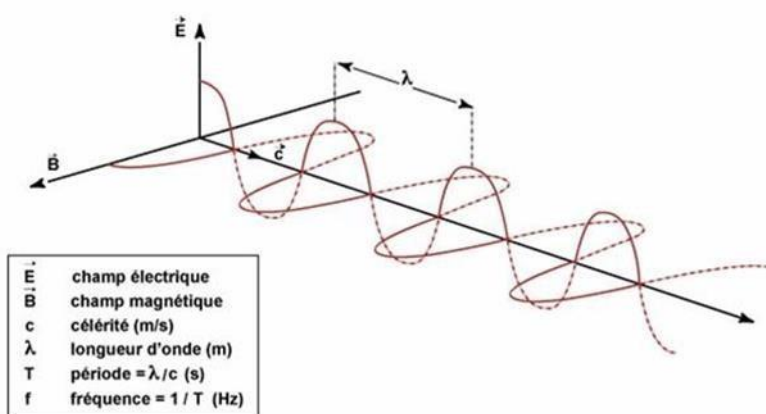
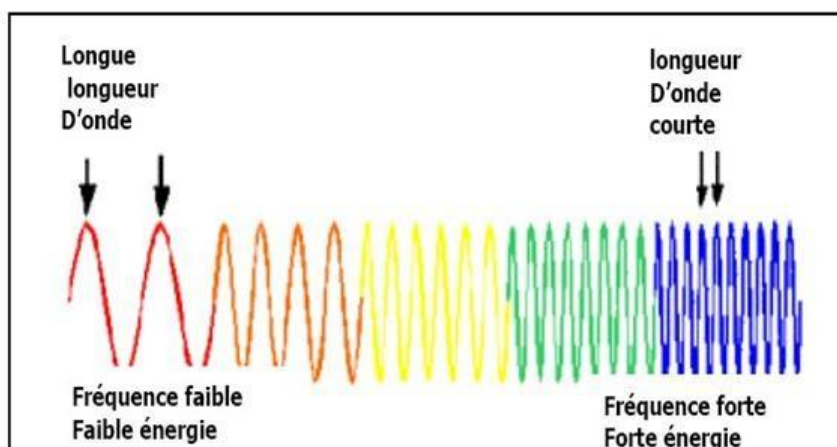


Figure 1. Nature et propagation d'une onde électromagnétique (Bonn et Rochon, 1992).

b. *Spectre électromagnétique* : représente l'ensemble des rayonnements de différentes énergies qui se propagent sous forme d'ondes à la fois électriques et magnétiques (Fig 2). Plusieurs régions du spectre électromagnétique sont utilisées en télédétection. Le spectre électromagnétique s'étend des courtes longueurs d'onde (les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio). Certains matériaux de la surface terrestre, surtout des roches et minéraux, entrent en fluorescence ou émettent de la lumière visible quand ils sont illuminés par un rayonnement ultraviolet. (<https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-publications>).



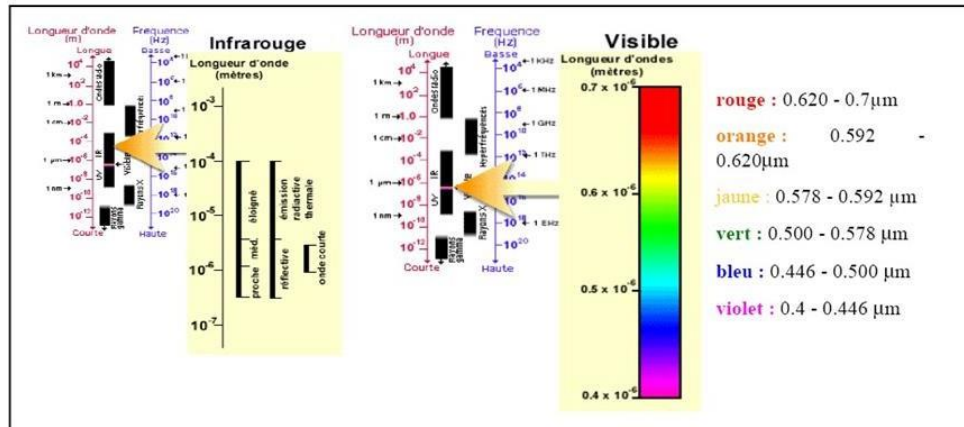


Figure 2. Rayonnements et spectre électromagnétiques. (<https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-publications>).

2.3. Signature spectrale

La caractéristique essentielle de la télédétection est la signature spectrale, qui désigne la manière unique dont un objet ou une surface réfléchit ou émet le rayonnement électromagnétique à diverses longueurs d'onde (Jensen, 2015). Selon (Richards, 2013), cette caractéristique permet de différencier et de repérer diverses catégories de surfaces, comme la végétation, l'eau, le sol nu ou les structures urbaines, en utilisant des données de télédétection. Il est crucial de maîtriser les signatures spectrales afin d'interpréter les images satellitaires et d'utiliser ces connaissances dans les applications de classification d'occupation du sol (Campbell et Wynne, 2011).

3. Processus de la télédétection

Le processus de la télédétection nécessite sept étapes (Fig. 3) énumérées comme suit (<https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-publications>).

- **Source d'énergie ou d'illumination (A)**: est nécessaire pour la télédétection, car elle doit être capable d'illuminer ou de fournir de l'énergie électromagnétique à la cible d'intérêt.
- **Rayonnement et atmosphère (B)**: lors de son déplacement de sa source vers sa destination, l'énergie entre en contact et interagit avec l'atmosphère qu'elle traverse. Une seconde fois, cette interaction peut se produire lorsque l'énergie se déplace de la cible vers le capteur.
- **Interaction avec la cible (C)**: une fois que l'énergie parvient à la cible à travers l'atmosphère, elle interagit avec la cible en fonction des propriétés de la cible et du rayonnement
- **Enregistrement de l'énergie par le capteur (D)** : il est essentiel d'avoir un capteur (à distance, non en contact avec la cible) afin de recueillir et de stocker le rayonnement électromagnétique après que l'énergie a été diffusée ou émise par la cible.
- **Transmission, réception et traitement (E)**: le capteur doit envoyer l'énergie enregistrée, généralement sous forme électronique, à une station de réception où les données sont converties en images (photographiques et/ou numériques) par un logiciel informatique.
- **Interprétation et analyse (F)**: l'image traitée est interprétée, visuellement et / ou numériquement ou électroniquement, pour extraire des informations désirées obtenus sur la cible
- **Application (G)**: la phase finale du processus de télédétection consiste à utiliser les informations extraites (Les données) de l'imagerie sur la cible, ce qui permet de dévoiler de

nouvelles informations ou de résoudre un problème particulier (<https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-publications>).

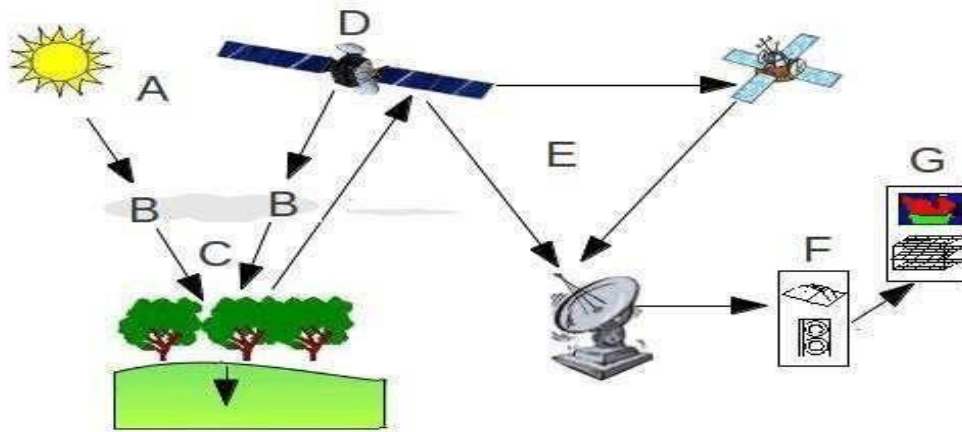


Figure 3. Les processus de télédétection (CNES, 2008)

4. Traitement des données de télédétection

Le traitement des données de la télédétection est une étape essentielle pour convertir les données brute collectées par les capteurs en informations exploitables et interprétable (Richards, 2013). L'objectif de ces traitements est de rectifier les distorsions géométriques et radiométriques, d'améliorer la qualité visuelle des données et d'extraire les informations thématiques pertinentes pour différentes applications, (Jensen, 2015)

4.1. Composition colorée

En télédétection, la composition colorée joue un rôle essentiel dans l'interprétation visuelle des images satellitaires (Bonn et Rochon, 1992).

La composition colorée permet d'assembler trois bandes spectrales et permet d'identifier des propriétés particulières du terrain qui pourraient ne pas être visibles sur une seule plage spectrale. Il y a essentiellement deux catégories de compositions colorées :

- L'utilisation des bandes du spectre visible (rouge, vert, bleu) permet de créer une image similaire à celle que l'œil humain perçoit naturellement.
- La représentation en fausses couleurs combine des bandes visibles et infrarouges, ce qui permet de mettre en valeur certains éléments spécifiques du paysage.

4.2. Correction géométrique

Il est essentiel de procéder à la correction géométrique lors du traitement des images satellitaires. Selon Toutin (2004), l'objectif est de supprimer les distorsions géométriques provoquées par différents éléments tels que la courbure de la Terre, les fluctuations d'altitude du capteur et les effets de rotation.

En lieu et place des points de contrôle au sol, on peut également utiliser une image déjà corrigée géométriquement (image de référence) en choisissant des points remarquables et facilement identifiables (croisements de routes, de rivières, etc.) afin de les faire correspondre avec des points de l'image à corriger. Cette approche consiste en une correction "image par image" (<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>).

Il est possible d'appliquer ces corrections sans avoir une connaissance particulière du terrain. La distance de localisation dans ces images SPOT est donc d'environ 500 mètres.

Afin de rendre les corrections plus précises, il est nécessaire d'avoir des points de repères (identifiés sur une carte topographique ou sur le terrain, avec un GPS). Les images SPOT corrigées ainsi ont une précision d'environ 50m, et ces données peuvent être utilisées dans une projection cartographique spécifique (c'est-à-dire que les images peuvent être superposées à une carte) (<https://eo.belspo.be/fr/corrections-geometriques-et-radiometriques>).

Les parallaxes du relief sont une source majeure de déformations dans les zones à fort relief, en particulier lorsque les images ont été enregistrées en vue oblique.

Sur le graphique (Fig4), le point A est le point de référence du sommet de la montagne. L'image du sommet de la montagne vue par le satellite est le point B. La distance entre A et B correspond à la parallaxe créée par le relief. Il est nécessaire d'avoir un modèle numérique de terrain, un fichier informatique qui affiche l'altitude du terrain pour chaque pixel de l'image, afin de rectifier ces déformations. Il est généralement admis que dans des conditions optimales, il est envisageable de corriger des images satellitaires de manière à ce que les déformations ne dépassent pas la hauteur. (<https://eo.belspo.be/fr/corrections-geometriques-et-radiometriques>).

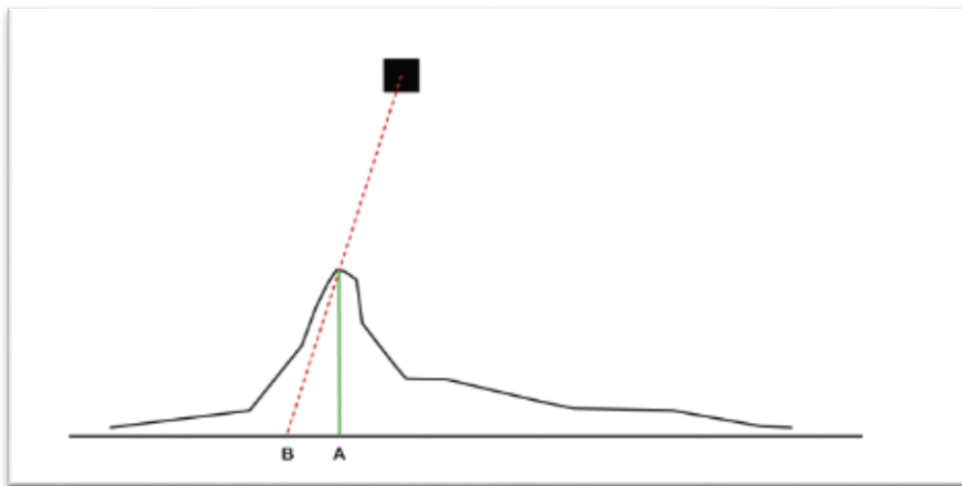


Figure 4. Parallaxe et correction géométrique en imagerie satellitaire (<https://eo.belspo.be/fr/corrections-geometriques-et-radiometriques>)

5. Modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain (MNT), également appelé modèle numérique d'élévation (MNE), est représenté mathématiquement la topographie de la surface terrestre. Cet ensemble de données représente la répartition spatiale de l'altitude du sol nu, sans tenir compte de la végétation, des bâtiments ou d'autres objets en surface (El Hage et al., 2012).

En télédétection, les MNT jouent un rôle crucial dans diverses applications, notamment :

- Corrections géométriques des images : Les MNT permettent de corriger les déformations liées au relief et à l'angle de visée du capteur.
- Analyses topographiques : Ils fournissent des informations essentielles sur la pente, l'orientation des versants, la délimitation des bassins versants, etc.
- Modélisations environnementales : Les MNT sont utilisés dans les modèles d'écoulement des eaux, d'érosion des sols, de propagation des ondes radar, etc.
- Visualisations 3D : Ils permettent de créer des représentations tridimensionnelles réalistes du terrain pour une interprétation améliorée.

B. Système d'information géographique

1. Définition et concepts de base des SIG

Un SIG est une collection d'outils et de logiciels informatiques qui permettent de structurer et de présenter des données alphanumériques spatialement référencées. dont l'objectif est de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et afficher de manière efficace toutes les informations géographiquement référencées (Benaïssa et al., 2014; Haddouche et al., 2011).

2. Composante des SIG

Un système intégré est constitué d'un ensemble de composantes de base pour les systèmes d'information géographique. Cet ensemble est un groupe bien organisé : ordinateurs, programmes, données, informations et ressources humaines qualifiées (Fig. 5).



Figure 5. Composantes du SIG (Bouadoud et al., 2013).

3. Mode de présentation des données géographique

La présentation des objets géographiques dans un SIG peut se faire selon deux modes : le mode raster et le mode vecteur. Les critères de choix de la structure à utiliser sont directement reliés à la quantité d'informations à gérer, à la résolution désirée ainsi qu'aux analyses à effectuer (El-hadi, 2006).

3.1. Mode Raster

Le mode raster ou mosaïque correspond au découpage spatial usuel sous forme de cellules (pixels) ou de carrés (Fig.6). Son avantage est d'intégrer des images de télédétection structuré par des matrices de pixels (Ghibeche, 2011)

3.2. Mode Vecteur

Un système basé sur le mode vectoriel affiche les données graphiques comme étant des points, des lignes, des courbes ou des surfaces avec un attribut. Ceci voudrait dire qu'il est plus facile de présenter les points complexe ou linéaire dans le format vectoriel .la plus part des cartes produites à partir des SIG le sont dans le format vectoriels .les données de télédétection doivent être convertis avant utilisation dans un SIG en format vectoriel (www.coastlearn.org).

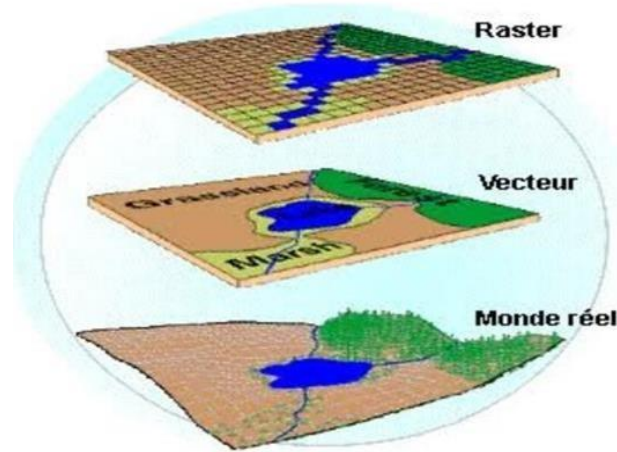


Figure 6. Types des formats d'images d'un SIG (Ghibeche, 2011).

II. METHODE D'ANALYSE MULTICRITERE

A. Principe

Les critères utilisés dans l'analyse multicritère de décision sont les paramètres morphométriques (pentes, drainage,...), géologiques (infiltration, structure, lithologie,...), hydrogéologiques (niveau statique, profondeur, altération, débit,...) (Doumouya, 2012; Hyann et al., 2015; Akkari, 2022). Ils sont utilisés pour :

- Identifier et faire une délimitation aux zones potentielles des eaux sous terraines (Madrucci et al 2008 ; Prasad et al 2008) ;
- Planifier et gerer la ressource en eau (Hajkowicz et Collins 2007) ;
- Répondre aux défis auxquels les décideurs font face lorsqu'ils traitent de grandes quantités d'informations complexes.

Le processus d'aide à la décision multicritère se déroule généralement en quatre étapes principales (Bouzarour-Amokrane Y., 2023) :

1. Identification

La phase d'identification vise à définir le problème et à identifier les différents acteurs impliqués dans la résolution du problème (jusqu'à l'implantation de la ou des solutions). Une fois ces acteurs identifiés, il s'agit de préciser les objectifs, les alternatives et les enjeux du problème. Cette phase correspond à la collecte des données nécessaires à la résolution du problème. La définition de la famille de critères est essentielle dans cette phase et doit respecter trois principes : l'exhaustivité, la cohésion et la non répétition (Henriet, 2000).

2. Modélisation

Il est nécessaire de modéliser la structure du problème en fonction de la nature des résultats souhaités. Comme le montre la figure 7, il peut s'agir d'un problème de sélection, de classification (typologie), de rangement ou de tri.

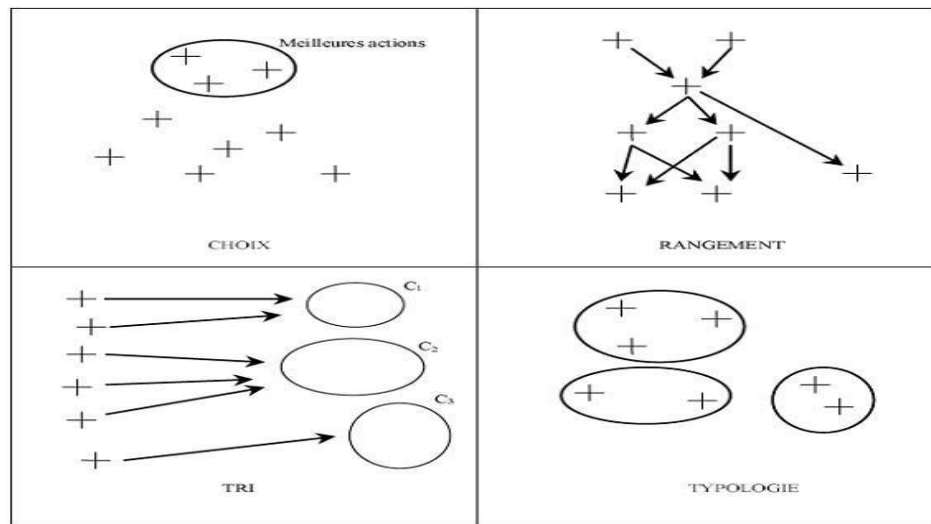


Figure 7. Différentes problématiques en analyse multicritère (Henriet, 2000).

Un problème de tri considère ces options de manière absolue, tandis que les problèmes de rangement et de choix évaluent les options les unes par rapport aux autres en fonction de leur attribut.

3. Evaluation et analyse

La phase d'évaluation et d'analyse consiste à évaluer chaque option en fonction de la structure sélectionnée lors de la phase précédente. L'objectif est de mesurer le niveau d'accomplissement des objectifs de chaque option en fonction de tous les attributs définis. On peut évaluer cette capacité à atteindre l'objectif à l'aide d'une échelle ordinaire ou mesurable.

L'évaluation individuelle de chaque acteur permet de mesurer l'importance des critères par rapport aux objectifs en pondérant les attributs. Il est crucial que le modèle fasse une utilisation adéquate des informations et que les résultats soient partagés par toutes les parties impliquées (Belacel et Rahmmoni, 2023).

4. Recommandation

Cette étape finale inclut une évaluation de sensibilité et de solidité pour renforcer la validité des résultats. Le contexte organisationnel, culturel et ethnique doit être pris en considération dans les recommandations rédigées pour persuader les personnes concernées et faciliter la mise en pratique des recommandations émises.

Différentes méthodes sont utilisées pour cartographier les nappes d'eaux souterraines. Il y avait souvent des techniques de forage et de piézométries, des techniques de géophysique et des données hydrologiques dans ces méthodes. Toutefois, afin d'améliorer ces méthodes et d'obtenir des résultats efficaces, tous les facteurs qui influencent les niveaux d'eau des nappes souterraines sont pris en compte. Différents chercheurs ont utilisé différentes méthodes qui ne demandaient pas de travail sur le terrain. C'est dans cette situation que ces approches reposent sur les méthodes statistiques multivariées à l'exemple de (Caillet, 2003) :

- **Analyse multicritère (AMC)** : Cette méthode implique l'utilisation de plusieurs critères pour évaluer la potentialité en eau souterraine, tels que la géologie locale, la topographie, la couverture végétale, la recharge des eaux souterraines, l'occupation des sols, etc.
- **Analyse des composantes principales (ACP)** : Cette méthode implique la réduction de plusieurs variables en quelques facteurs principaux qui peuvent être utilisés pour évaluer la potentialité en eau souterraine.
- **Analyse multicritère à objets multiples (AMCOM)** : Cette méthode peut être utilisée pour définir des zones prioritaires de protection et de gestion des eaux souterraines. Elle implique l'utilisation de plusieurs critères pour évaluer les objets multiples.
- **Analyse hiérarchique des processus (AHP)** : Cette méthode est basée sur la décomposition d'un objectif en plusieurs critères hiérarchisés, qui sont à leur tour pondérés en fonction.

Ces méthodes permettent d'intégrer de multiples facteurs influençant les niveaux d'eau des nappes souterraines, sans nécessiter de travail de terrain extensif.

B. Définition des critères, pondération et agrégation des facteurs

1. Paramètres

Les paramètres relatifs à la potentialité en eau souterraine est composé de trois indicateurs quantitatifs qui sont : la disponibilité, l'accessibilité et l'exploitabilité.

1.1. Indicateur de disponibilité

L'indicateur disponibilité traduit la notion de l'existence d'un aquifère et constitue la première condition à savoir, avant tout autre activité Il résulte de l'association de paramètres tels que la pente (déterminée à partir de la carte topographique du bassin), la densité de drainage (obtenue grâce au réseau hydrographique), la densité de fracturation et la carte d'occupation des sols (obtenue à partir du traitement des images ETM+ de Landsat 8), l'épaisseur d'altérité et l'infiltration (Paramètres calculés antérieurement dans des travaux scientifiques).

1.2. Indicateur d'accessibilité

Les eaux souterraines ne peuvent être exploitées de manière effective que si certains critères sont remplis pour permettre leur accès. Le plus important paramètre pris en compte dans ce cas est la profondeur totale (Pt) des ouvrages sont les éléments les plus importants (Prasad et al. 2008).

1.3. Indicateur d'exploitabilité

Il est possible d'exploiter la ressource en eau uniquement si le débit d'exploitation est important (au moins $1\text{m}^3/\text{h}$) (le premier paramètre). Le débit d'exploitation en lui-même est

conditionné par la quantité d'eau dans la réserve souterraine et la rapidité de renouvellement de cette réserve en cas de forte sollicitation (deuxième paramètre) (Youan Ta et al. 2011).

2. Calcul de la pondération

La pondération des critères est essentielle dans l'analyse multicritère pour décider de leur importance relative. La méthode de Saaty (1980) appelée Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP : Analytic Hierarchy Process) basée sur des comparaisons par paires, est très répandue. Elle utilise une échelle de 1 à 9 pour comparer l'importance des critères entre eux, formant une matrice dont on extrait les poids. La cohérence des jugements est vérifiée par un ratio devant être inférieur à 0,1 (Saaty, 2008).

2.1. Méthode de l'AHP pour l'analyse multicritère :

La méthodologie se décompose en cinq phases principales (Belacel et Rahmmoni, 2023) :

- Détermination les critères de décision
- Catégorisation et encodage de ces facteurs pour développer des critères adaptés aux ressources en eaux souterraines
- Attribution de poids aux différents critères
- Synthèse globale des critères de décision
- Réalisation d'une cartographie du potentiel hydrogéologique et vérification de la carte thématique résultante.

2.1.1. Critère de décision

L'identification des zones prometteuses en eaux souterraines repose sur trois catégories de critères :

- Les propriétés de l'aquifère ;
- Les caractéristiques des forages ;
- Les données physiographiques.

Dans cette étude, neuf (9) critères de décision ont été retenue : Occupation du sol, Pente (%), Densité de réseau hydrographique (km/km²), Lithologie (Perméabilité du sols), l'infiltration (mm/an), densité de fracturation (Km/km²), Niveau statique (m), Niveau dynamique (m) et le débit d'exploitation (l/s).

2.1.2. Classification et codification (note) des critères de décision

La classification des paramètres s'inspire de la classification adoptée au cours des travaux antérieurs (Saley 2003, Jourda et al. 2006, Youan Ta et al. 2011). Ces paramètres ont ensuite été standardisés puisqu'ils sont mesurés selon des échelles différentes avec des unités différentes.

La fonction sigmoïde est employée en raison de la variation du pas du temps et de son expression dans des unités différentes. En définissant le degré d'appartenance de chaque critère à un intervalle commun de 1 à 10, elle permet d'uniformiser les paramètres. La classe fortement défavorable a toujours la note la plus basse pendant la standardisation, tandis que la classe fortement favorable à la note la plus haute. On utilise un intervalle commun de 1 à 10.

Le tableau 2 enregistre les résultats de la classification et de la standardisation des critères identifiés, dont la combinaison peut favoriser ou non la bonne accumulation des eaux souterraines (Affoué et al. 2014).

Tableau 2 : Classification et standardisation des paramètres (Hyann et al., 2015 ; Yao et al., 2016 ; Akkari, 2022).

Indicateurs	Classes	Note	
1. Indicateur de disponibilité	Pente (%)	0 – 4	10
		4 – 10	8
		10 – 18	6
		18 – 30	3
		>30	1
	Densité de drainage (Km/Km ²)	0 – 0.5	10
		0.5 – 1	8
1 – 1.5		6	
1.5 – 2		3	
>2		1	
Densité de fracturation (Km/Km ²)	0 – 0.5	1	
	0.5 – 1	3	
	1 – 1.5	6	
	1.5 – 2	8	
	>2	10	
Infiltration efficace (mm/an)	0 -25	1	
	25 – 50	3	
	50 – 75	6	
	75 – 100	8	
	> 100	10	
Perméabilité des formations lithologiques	Très perméable	10	
	Perméable	8	
	Semi-perméable	6	
	Imperméable	1	
Occupation des sols	Bâti et sol nu	1	
	Jachère	6	
	Agricultures	8	
	Forêt et maquis	10	
2. Indicateur d'accessibilité	Profondeur de la nappe (m)	0 – 5	10
		5 – 10	8
		10 – 20	6
		20 – 40	3
		> 40	1
3. Indicateur d'exploitabilité	Débit (L/s)	0 – 10	1
		10 – 20	3
		20 – 30	6
		30 – 40	8
		> 40	10
	Niveau dynamique(m)	0-4	10
		4-10	8
		10-18	6
		18-30	3
		>30	1

3. Agrégation des facteurs

La méthode d'analyse multicritère pondérée est appliquée pour évaluer le potentiel en eau souterraine. Cette approche se déroule en plusieurs étapes :

- Calcul de l'indice d'aptitude : Chaque paramètre est multiplié par son coefficient de pondération, puis ces produits sont additionnés selon la formule :

$$S = \sum (w_i \times x_i)$$

Où **S** est le résultat final, **w_i** le poids du critère **i**, et **x_i** la valeur standardisée du critère **i**.

- Application aux indicateurs de décision : Cette méthode est utilisée séparément pour les trois indicateurs clés : accessibilité, exploitabilité et disponibilité.
- Cartographie thématique : Les valeurs obtenues sont spatialisées pour créer une carte de potentialité en eau souterraine.
- Classification des résultats : Les valeurs sont reclassées en quatre catégories : Mauvaise, Médiocre, Bonne et Excellente. Ce choix de quatre classes vise à optimiser la lisibilité et l'interprétation de la carte finale, conformément aux pratiques établies dans la littérature (Youan et al., 2011 ; Doumouya et al., 2012 ; Hyann et al., 2015).

Cette approche permet une évaluation systématique et une représentation visuelle claire du potentiel en eau souterraine dans la zone d'étude.

Chapitre 2: Cadre
Pratique

I. PRESENTATION DE LA REGION DE MAGHNIA

A. Géographie et climat

La daïra de Maghnia est située à l'Ouest de la wilaya de Tlemcen, localisée en extrême nord-ouest algérien. Son chef-lieu est la ville de Maghnia, et sa superficie est d'environ 402.5 km² (Fig.8). Marquée par un climat semi-aride, caractérisé par des hivers doux et humides, et des étés chauds et secs selon la classification de Köppen-Geiger. , et les précipitations sont généralement faible de 275mm., alors que les températures moyennes a maghnia est de 18.5°C avec des maximales observées en Août et des minimales enregistrées en mois de Janvier.(<https://planificateur.a-contresens.net/afrique/algerie/wilaya-de-tlemcen/maghnia/2490584.html>)

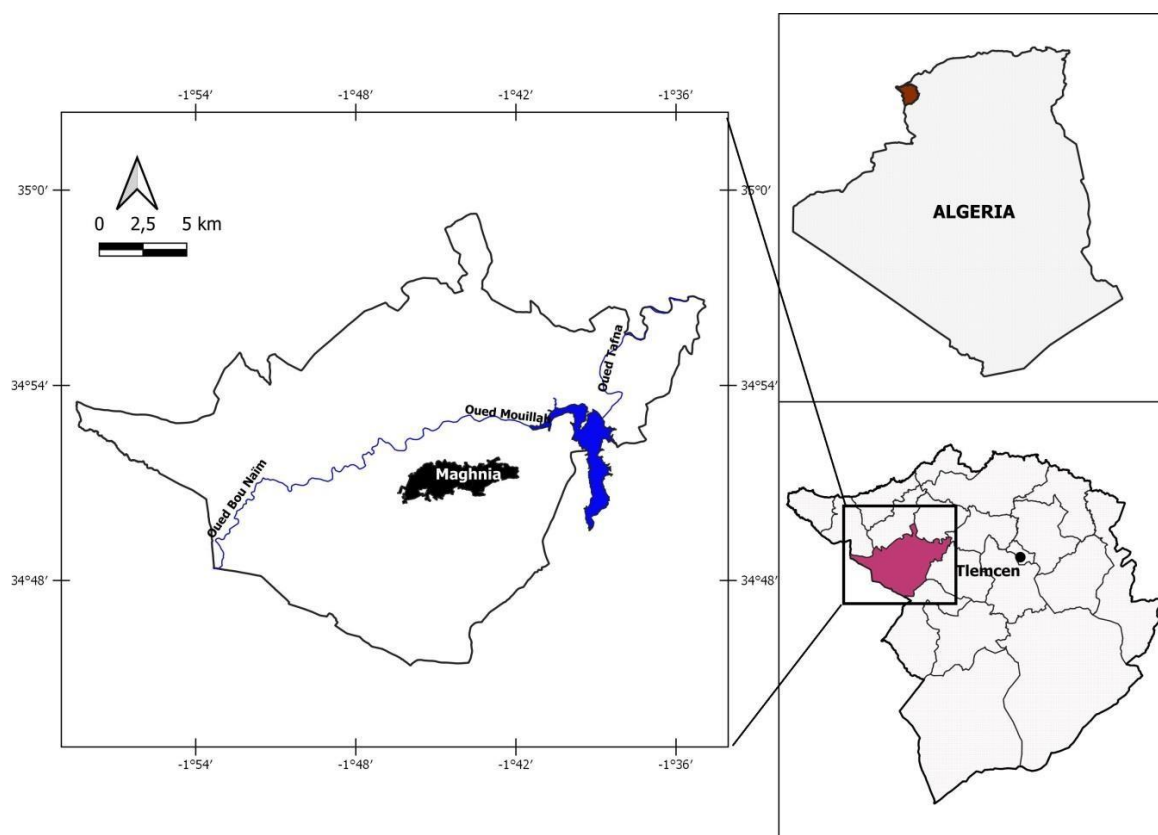


Figure 8. Situation géographique de la région de Maghnia.

B. Hydrologie

Le principal cours d'eau de la région de Maghnia est l'oued Tafna (Fig. 8), qui prend sa source dans les monts de Tlemcen et déverse dans la Méditerranée. Son principal effluent dans cette région d'étude est l'oued Mouillah ou son extrémité ouest appelée Oued Bou-Naim est situé à la plaine de Zriga. A leur confluence est situé le barrage de Boughrara (Fig. 8) destiné à l'approvisionnement en eau potable de la région de Maghnia, le transfert vers la ville d'Oran, ainsi qu'à l'irrigation de la plaine de Tafna (<https://trevi-algerie.com/>).

C. Géologie et hydrogéologique

1. Sur le plan géologique

La plaine de Maghnia est une cuvette tectonique orientée (EN.E./O.S.O) comblée par des dépôts successifs tertiaires et quaternaires provenant de l'érosion des montagnes voisines, Ghar Rouban et Djebel Fillaoussène (Lemoine, 1965).

Son territoire est constitué par des terrains paléozoïques fortement disloqué, qui se compose des formations sédimentaires et volcaniques, des intrusions de dacite et de granite ainsi que des formations métamorphiques; ainsi qu'une couverture mésozoïque en discordance et en transgression sur cet ensemble plissé où reposent des roches à dominance carbonatée et terrigène du lias et du Dogger, recouvertes de dépôts gréseux de Callovo-Oxfordien. (Mahboubi et Mimouni, 2014).

Des terrains néogènes et quaternaires forment la plaine de Maghnia, au Nord des Monts de Ghar-Roubane.

Les caractéristiques lithostratigraphiques de la zone d'étude, décrites dans des travaux de plusieurs chercheurs, à l'exemple de : Gentil (1903) ; Lucas (1942), Perrondon (1957) ; Benest (1981, 1982, 1985) ; Benest & Bensalah (1999), ..., sont résumés dans l'ordre ascendant comme suit (Fig. 9) :

- *Paléozoïque* : forme l'ossature de la région et correspond à une bande orientée SW-NE. Il est formé de roches métamorphiques de types schistes et quartzites. Cette bande est bordée au Nord et au Sud par des formations du Secondaire (**Silurien** : plissé et métamorphisé, représenté par des schistes ; **Dévonien** : formé de schistes et de quartzites, incluant des microbrèches, probablement carbonifère ; **Carbonifère** : représenté également par des schistes qui sont rubéfiés et **Permo-Trias** : formations détritiques à galets hétérogènes et hétérométriques cimentés par des argiles rougeâtres).

- *Mésozoïque* : Reposant en discordance et en transgression sur le paléozoïque, il est formé par des carbonates renfermant parfois des éléments détritiques provenant des reliefs paléozoïque préexistants, constitué principalement par une série de formation d'âge Jurassique d'une épaisseur supérieure à 1000m, on y distingue :

- Jurassique Inférieur et Moyen : Du **Lias** avec les différentes formations calcaires ; **Aaléno-Bajocien**: représenté par des calcaires à oolithes ferrugineuses. **Bathonien inférieur et moyen** : par des oolithes ferrugineuses de Deglen et aussi représenté par des calcaires gris qui passent aux calcaires micro-gréseux.
- Jurassique Supérieur : formé par le **Callovo-Oxfordien** constitué par des argiles grises ou noires. Il s'étend dans le secteur de Zouia, présenté par un ensemble argileux, à minces bancs de grès plus ou moins calcaires qui se terminent jusqu'au **Lusitanien** (formé des grès avec des intercalations argileuses, dolomitiques et calcaires à polypiers, brachiopodes, lamellibranches et échinodermes). Aussi le **Kimméridgien-Berriasien inférieur** composé par des formations calcaires sublithographiques et de dolomies massives finement grenues à intercalations de calcaires sublithographiques et de calcaires argileux.

- *Cénozoïque* : Représenté par le Miocène transgressif, il est formé par une bande plus ou moins large de grès d'âge Tortonien qui repose sur le Jurassique au Nord et au Sud de la plaine de Maghnia.

- *Plio-Quaternaire* : Une série complexe de dépôts discontinus formés d'éléments hétérogènes (Marnes rouges avec peu ou pas de galets, parfois très épaisses au niveau du sous bassin de l'Oued Abbès ; alluvions allant des marnes alluvionnaires verdâtres aux galets en passant par

les limons et les graviers ; Limons, sables et graviers récents qui s'étendent entre Oued Mehaguène et Chabet El Arneb au NE de la frontière Algéro-Marocaine ; quelques lambeaux de basaltes, témoins d'une activité volcanique, sont situés au NW de la plaine).

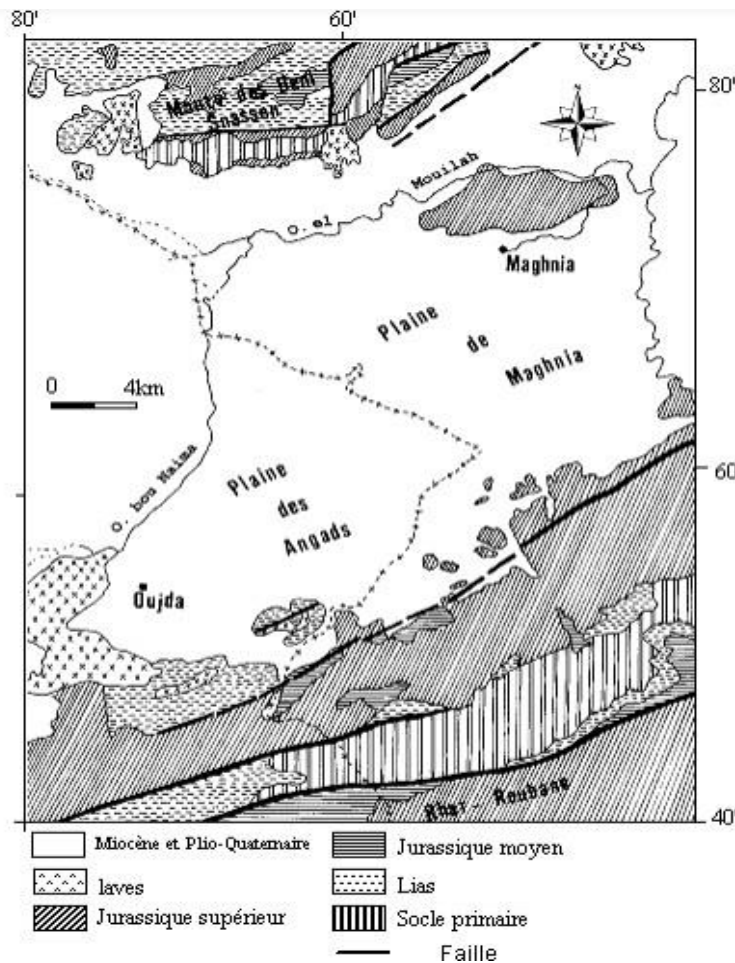


Figure 9. Carte géologique de la région de Maghnia (*in* Baba Hamed, 2007)

2. Sur le plan hydrogéologie

Faisant partie du bassin hydrographique de la Tafna, la plaine de Maghnia et celle de Zriga présentent des ressources en eau souterraines importantes dans la région considérée.

L'aquifère principal est celui la plaine de Maghnia, composé de formations alluviales quaternaires constituées principalement de graviers, sables et limons, ont une épaisseur variable pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres dans certaines zones, reposant sur un substratum marneux du Miocène (Baba-Hamed, 2007). Sa nappe à écoulement convergent vers le Nord Est. L'écoulement semble suivre le paléo-chenal en direction du seuil de Maghnia (D.R.E, 2003). Au Nord-Ouest, une partie des circulations échappe au drainage de l'Ouerdeffou et semble se diriger vers le bassin de l'oued Mouilleh. Dans la zone Sud, l'alimentation principale provient des affleurements jurassiques des Monts de Tlemcen.

La recharge de l'aquifère se fait essentiellement par l'infiltration des eaux de pluie et des oueds, notamment l'oued Mouillah et ses affluents (Bouanani et al., 2013).

Dans la plaine Zriga, la nature géologique de remplissage Plioquaternaire est variable, La granulométrie varie des fractions fines (argileuses à marneuses) aux fractions grossières

(galets, poudingues). L'épaisseur des alluvions est variable du Sud au Nord et tend à s'accroître du Sud-Ouest au Nord-Est, le long de l'Oued Mouilleh (Kebir et Rostan, 1992).

Sur la base de l'étude piézométrique réalisée par Kebir et Rostane 1992, La plaine de Zriga. L'écoulement de la nappe dans sa partie méridionale est convergent et au gradient hydraulique relativement faible, de l'ordre de 2.10^{-2} m/s.

Au Sud, l'alimentation provient des piedmonts du Ghar Roubane. A sa partie orientale, les écoulements se dirigent vers l'Est de la plaine de Maghnia. Au Nord, les écoulements proviennent des affleurements jurassiques des Monts des Traras. La nappe est radiale à écoulement divergent et au gradient hydraulique relativement important. Une partie des écoulements se dirige vers le Sud, en direction de la zone de confluence entre l'oued El-Aouedj et de la frontière marocaine. L'écoulement général de deux portions de nappe converge vers la zone de confluence des deux oueds : l'oued Mouilleh et oued l'Aoudj (Kebir et Rostane, 1992).

D. Population et activités économiques

La région de Maghnia se distingue par sa démographie dynamique et son économie diversifiée. Le dernier recensement officiel de 2008 dénombrait environ 104 000 habitants (Office National des Statistiques, 2011), un chiffre qui a probablement évolué depuis lors.

L'économie de la région repose sur plusieurs secteurs clés, tels que :

- l'agriculture (cultures d'olives, d'agrumes et de céréales) faisant d'elle une zone importante zone agricole dans la wilaya de Tlemcen (Ghenim et Megnounif, 2013) ;
- Industrie : abritant diverses unités industrielles, principalement dans l'agroalimentaire et la production de matériaux de construction (Ministère de l'Industrie et des Mines, 2014). Dotée de gisements de bentonite et de pierres ornementales, qui contribuent aussi à la diversité de son tissu économique (Ministère de l'Énergie et des Mines, 2007).

II. DISPONIBILITE DES DONNEES

Afin de répondre aux objectifs désirés de la thématique, plusieurs données de la région considérée ont été utilisées, il s'agit des données satellitaires, cartographiques, et descriptives des forages hydriques de la zone d'étude :

A. Données satellitaires

Il s'agit tout d'abord de l'image satellitaire du Nord-Ouest Algérien, obtenue à partir de la scène Landsat8 – ETM+ (Fig.10.A), disponible sur le site de la NASA (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Ainsi que, le modèle numérique de terrain (MNT) avec des résolutions de 30m (Fig.10.B) provenant de la base de données (Mission de radar des Shuttle-USGS-EROS), est disponible pour être téléchargé avec le logiciel Global Mapper 22.0.

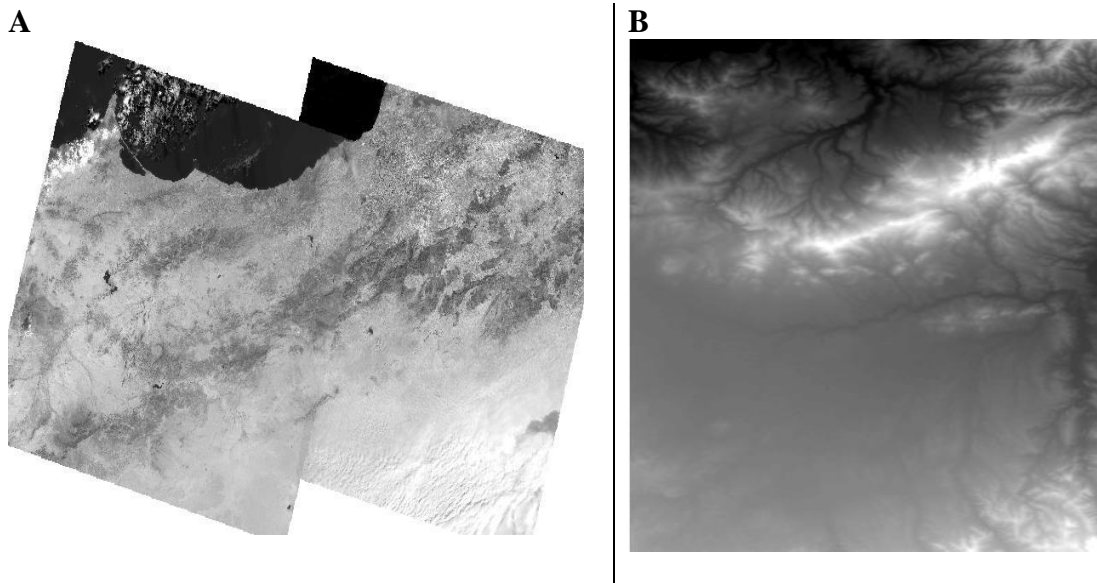


Figure 10. A. Image satellite Landsat 8 ; B. Modèle numérique de terrain, de la zone d'étude.

B. Données géo-scientifiques

Il s'agit des cartes géologiques sous format numérique, fournies par le personnel du centre des Techniques Spatiales (CTS) d'Arzew, au niveau de la wilaya d'Oran, des données hydrogéologiques spatio-temporelles fournis également par la dite-source et complétées par une série de données attribuée par les services d'hydraulique de la wilaya de Tlemcen, ainsi que, les données issues d'investigation sur terrain réalisée durant la période ce projet :

1. Données cartographiques

Deux cartes (carte géologique et carte hydrogéologique) ont été utilisées. Une carte géologique de Tlemcen NI-30-XVII à l'échelle 200 000ème (Fig. 11), et une autre hydrogéologie de Tlemcen NI-30-XVII avec une échelle de 1/200 000 (Fig. 12).

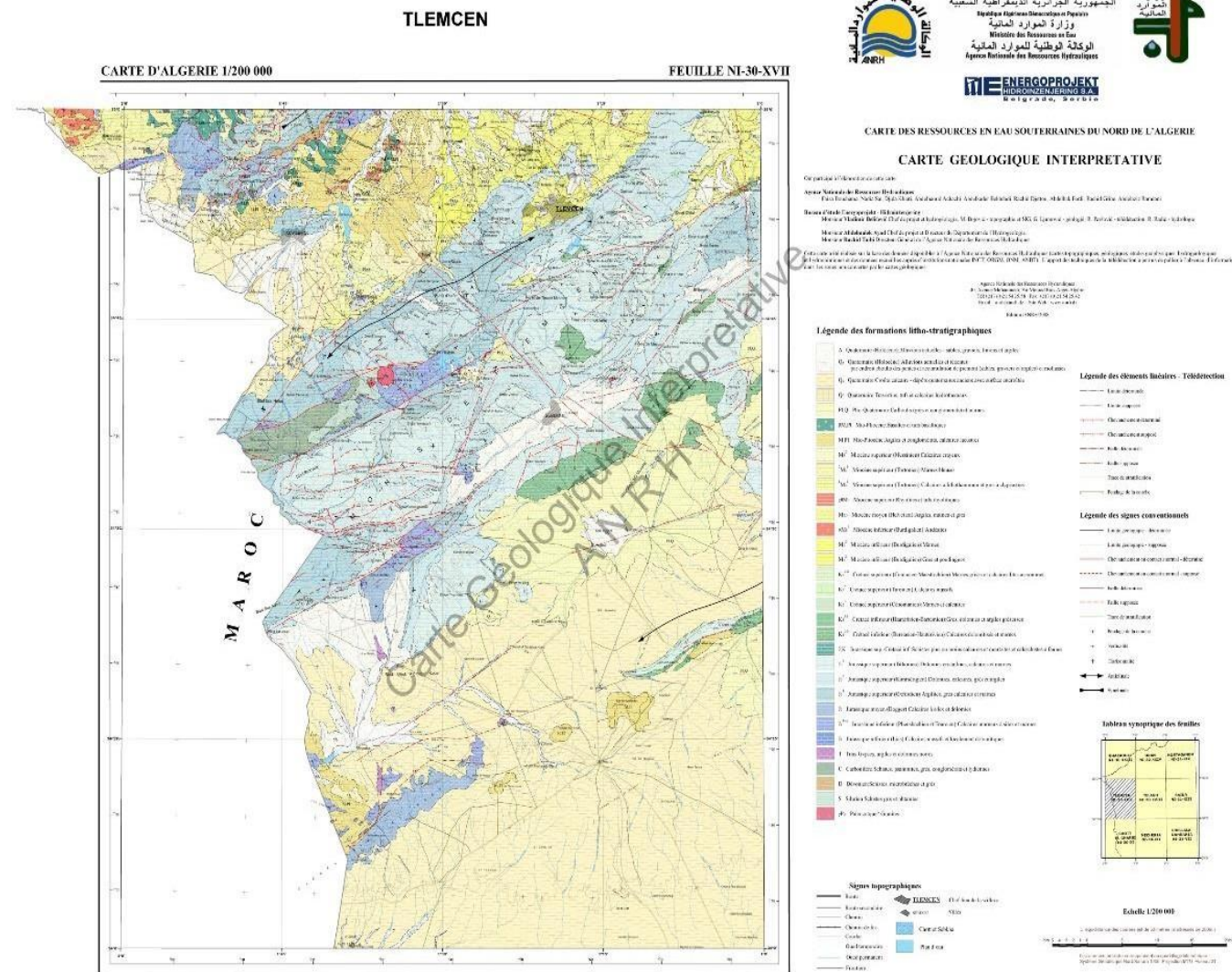
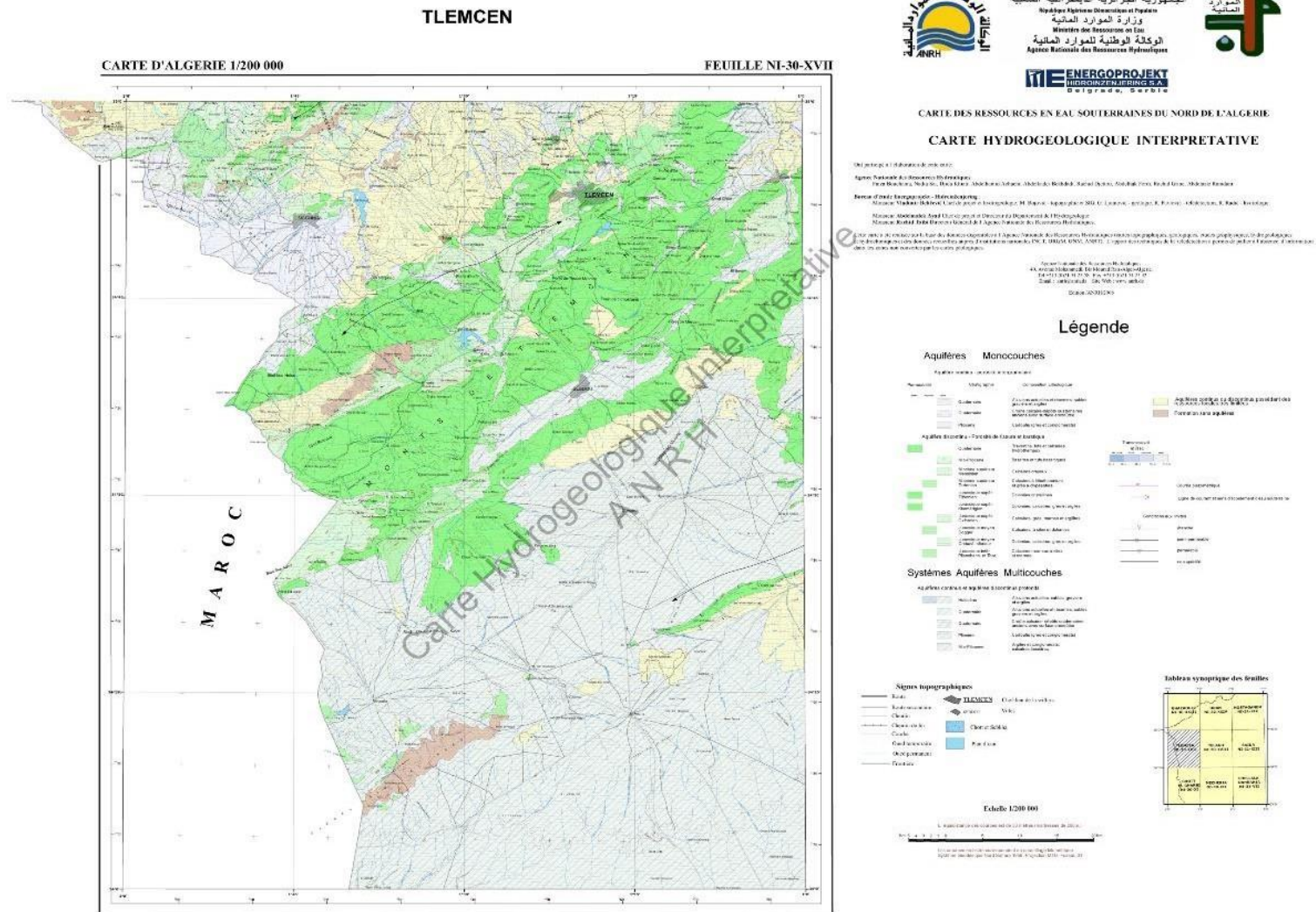


Figure 11. Carte géologique de la région de Tlemcen (ARNH, 2006).



2. Base de données des forages de la zone d'étude

35 forages ont été sélectionnés pour cette présente étude, ils sont compris entre les coordonnées géographiques (1°40', 1°55' Ouest) et (34°44', 34°55' Nord). Dotés de plusieurs descriptions tels que : Code, Localisation, Nom du propriétaire du forage, profondeur (m), niveau statique (m), niveau dynamique (m), débit d'exploitation (m) et l'usage de l'ouvrage.

Il est important de souligner que le nombre de forage a été fixé suite à la délimitation de la zone d'étude effectuée par l'utilisation des limites des formations aquifères Plio-quadernaires de la zone d'étude (Fig. 13)

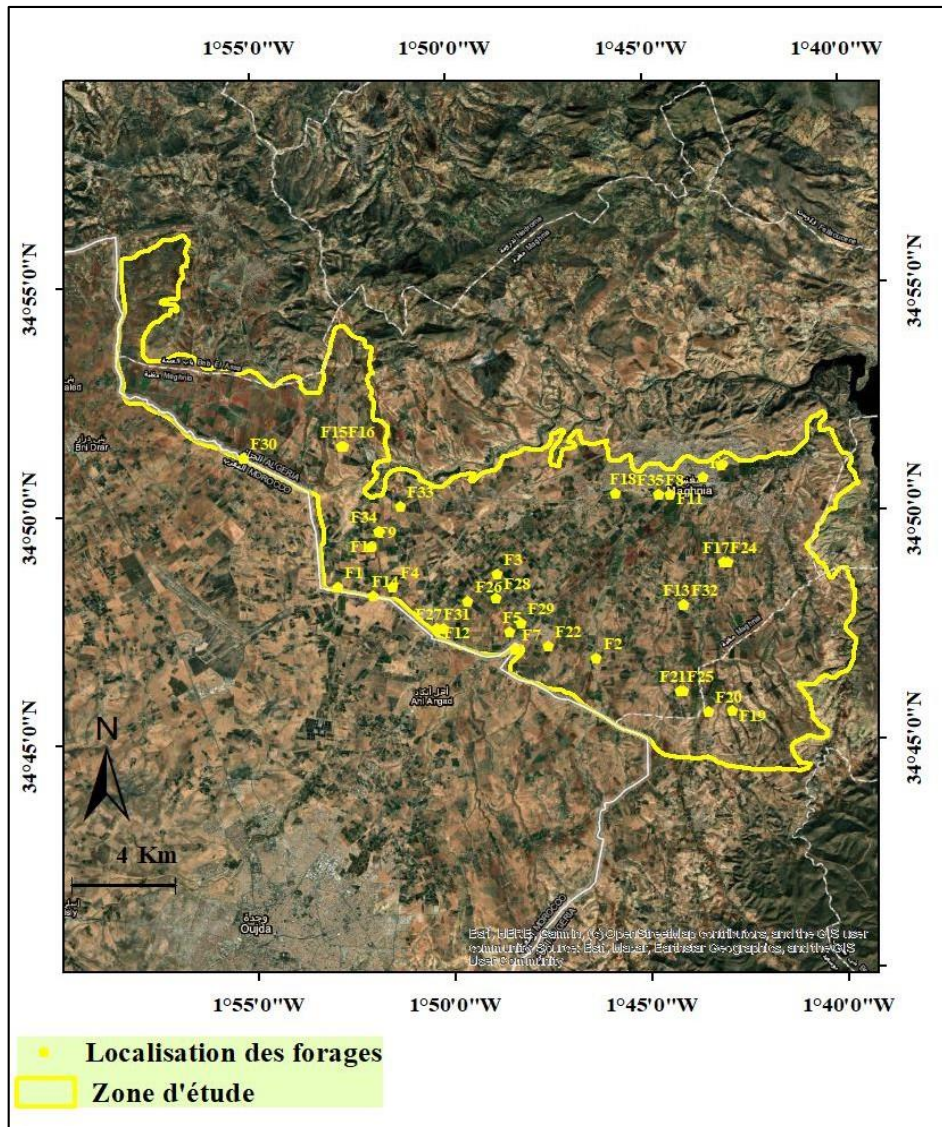


Figure 13. Localisation des forages dans la région de Maghnia

3. Données issues des travaux de terrain

Durant deux jours du mois de Mars (3 et 4) de l'année 2024, quatorze forages (14) répartis sur la plaine de Maghnia, ont été sélectionnés et analysés. Des mesures piézométriques ont été réalisées durant cette campagne d'échantillonnage (Fig. 14).

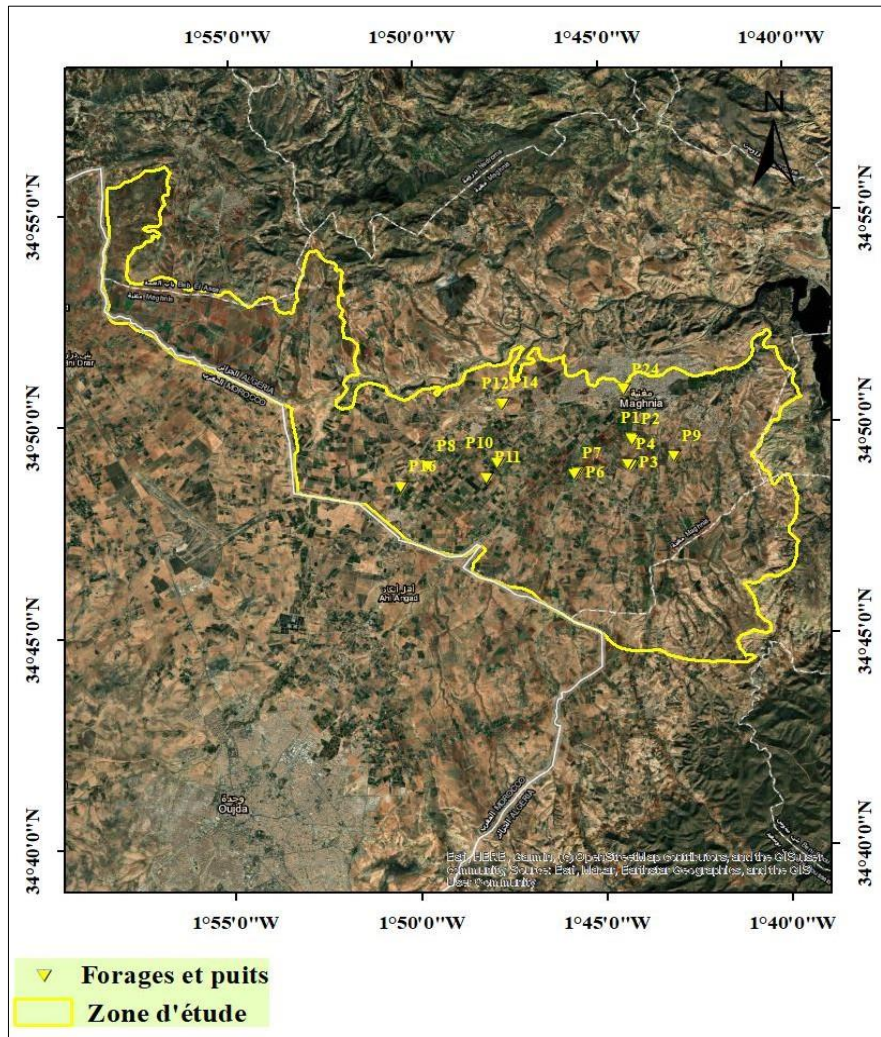


Figure 14. Localisation des forages dans la région de Maghnia (Campagne Mars 2024)

III. MATERIEL ET METHODES

A. Présentation de l'outil

1. Présentation de l'outil ENVI (Version 4.5)

C'est un logiciel commercial qui offre une suite complète d'outils pour la visualisation et l'analyse d'images de télédétection. Il sert à traiter et interpréter les images satellites optiques et radars et à extraire les informations significatives afin de prendre les meilleures décisions. L'ENVI est composé de 3 fenêtres :

- la barre des menus : contient divers fonctions et option pour ENVI ;
- le viewer : c'est le domaine de visualisation des activités réalisées sur les images satellitaires, cette zone est divisée en 3 fenêtres (Display, le Scroll et le Zoom) ;
- le panneau latéral : onglet des options avancées pour les images ouvertes

2. Présentation de l'outil ArcGIS (Version 10.8.1)

ArcGIS est un logiciel de système d'information géographique (SIG) développé par ESRI. Il est largement utilisé pour la création, l'analyse, la gestion et la visualisation de données géospatiales. ArcGIS offre une gamme d'outils pour cartographier des données,

effectuer des analyses spatiales, gérer des bases de données géographiques, créer des modèles et des scripts personnalisés, et publier des cartes et des applications cartographiques en ligne.

Il est utilisé dans de nombreux domaines, tels que la géologie, l'urbanisme, la gestion des ressources naturelles, la gestion des catastrophes, l'agriculture, etc. ArcGIS est composé de plusieurs applications, notamment ArcMap, ArcGIS Pro, ArcGIS Online et ArcGIS Earth, qui sont utilisées pour différentes tâches liées à l'analyse et à la visualisation des données géospatiales.

B. Traitement d'imagerie Landsat et modèles numériques de terrain

1. Cartographie de l'occupation du sol

L'occupation du sol est une information qui constitue une compréhension de base pour des applications allant du suivi des forêts et des parcours, la production des statistiques, la planification, la biodiversité, le changement climatique, jusqu'à la désertification et la lutte contre la dégradation des terres (Boussema et Khebour Allouche, 2020).

Deux principaux facteurs sont à l'origine de la variation des occupations du sol, à savoir, des facteurs climatiques et des facteurs d'origine anthropique.

Les différentes étapes de réalisation d'une carte d'occupation des sols sont :

1.1. Acquisition des images satellitaires

Cette étape consiste dans le téléchargement des images satellitaires LANDSAT déjà décrite en ce présent chapitre (II-A).

1.2. Le prétraitement

C'est une étape primitive de correction qui consiste à l'élimination de toute perturbation affectant la signature spectrale. Il s'agit d'un ensemble d'opération effectué sur les images satellitaires de façon à les corriger ou les améliorer géométriquement et radiométriquement (Boussema et Khebour Allouche, 2020).

1.3. Correction géométrique et radiométrique

La correction géométrique permet la correction des distorsions géométriques dues aux variations de la géométrie Terre-capteur et la transformation des données en vraies coordonnées géographiques. Elle permet la comparaison des scènes positionnées dans un même référentiel géographique ainsi que leur superposition à d'autres sources de données (Samaali, 2009).

La correction radiométrique permet de réduire les bruits dus au capteur et/ou à l'atmosphère. Les images satellites fournies comprennent des valeurs sous forme numériques DN (Digital Number), sont codées selon le type et l'âge de capteur entre 0 et 255 niveaux. Dans ce cas il est nécessaire de corriger ces images radiométriquement afin de réaffecter à chaque pixel une valeur radiométrique la plus proche possible de celle mesurée sur le terrain. Les variations enregistrées peuvent être dues au vieillissement des capteurs, à leur dérèglement ou aux défauts lors de la conception des instruments (Boussema et Khebour Allouche, 2020).

1.4. Evaluation et validation de la classification

La classification consiste à effectuer la correspondance entre les éléments d'une scène de l'image matérialisés généralement par leurs valeurs radiométriques, et des classes connues a priori (ou non) par un utilisateur. Son but est de déterminer, pour chaque pixel ou groupe de pixels de l'image, la classe de référence à laquelle il appartient, c'est-à-dire dans le cas des images de télédétection, la partition de l'image en ensembles de pixels représentant une même occupation du sol (Boussema et Khebour Allouche, 2020).

La validation de la classification se fera par une généralisation thématique par regroupement des classes en diminuant leur nombre ou fusion de certaines classes en des classes plus générales, dans l'objectif de faciliter la lecture de la carte tout en se basant sur la validation du Terrain (Boussema et Khebour Allouche, 2020).

2. Extraction des paramètres morphométriques

Dans la thématique actuelle de cette étude, plusieurs paramètres géo-morphométriques : mesure géométrique, carte d'élévation, pente, organisation du réseau de drainage, densité de drainage, ont été calculés et mesurés automatiquement par l'utilisation du modèle numérique de terrain traité sous SIG.

3. Méthodes d'interpolation spatiale

Les méthodes d'interpolation sont des modèles lisses et joints de la distribution spatiale, basés sur l'application de l'analyse mathématique autocorrélative spatiale entre les données et plusieurs opérateurs de l'outil fonctionnellement interconnectées, sous le Système d'Information Géographique (SIG) (Nusret et Dug, 2012).

Deux méthodes d'interpolation ont été utilisées dans notre travail :

- le **krigeage** : méthode d'interpolation géostatistique qui utilise un variogramme (analyse de la variabilité des données en fonction de la distance qui les sépare). Le variogramme dépend de la répartition spatiale des données plutôt que sur les valeurs réelles.) ;

- la méthode **IDW** (Inverse Distance Weighting) : C'est une technique d'interpolation déterministe locale qui calcule la valeur d'un point en effectuant la moyenne des valeurs des points situés dans le voisinage pondérées par l'inverse de la distance au point calculé: plus les points sont proches, plus la pondération affectée est forte. Elle estime que les points plus proches de l'emplacement à calculer auront plus d'influence.

*Chapitre 3 : Résultat
et interprétation*

I. METHODE D'ANALYSE MULTICRITERE

Les neuf (9) paramètres de la méthode Multicritère, à savoir : l'occupation du sol (OS), la pente (P), la densité du réseau hydrographique (DH), la lithologie ou perméabilité du sol (P), l'infiltration (I), la densité de fracturation (DF), le niveau statique (NS), le niveau dynamique (ND) et le débit d'exploitation ($Q_{exp.}$) déjà présentés au chapitre 1, sont classés pour représenter les trois (3) critères de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité des eaux souterraines de la zone d'étude. Chaque classe a des valeurs de notation sur une échelle de 1 à 10 (Voir Tableau 2), et comme l'importance de ces paramètres dans l'évaluation des potentialités est inégale, les coefficients de pondération sont calculés par méthode des matrices de comparaison par paire (AHP). Ces poids sont attribués et pris en compte pour chacun des paramètres de la méthode.

L'indice de potentialité des eaux est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$S = \sum (w_i \times x_i)$$

Où : **S** est le résultat final, **w_i** le poids du critère i, et **x_i** la valeur standardisée du critère i.

A. Préparation des paramètres

1. Occupation des sols

La carte d'occupation du sol a été élaborée par l'utilisation de la méthode de segmentation de l'image satellite, effectuée par le personnel qualifié du centre des Techniques Spatiales (CTS) d'Arzew (Oran).

Plusieurs zones ont été distinguées sur la carte d'occupation des sols représentée en figure 15

- Les bâtis et sols nus, répartis sur la surface cartographiée et considérés comme zones moins favorables à l'infiltration (Note 1);
- les zones jachères et agricoles marquées par leur prédominance dans la région d'étude, favorables à l'infiltration surtout pour les pratiques adaptées (Note successive de 6 et 8);
- Les forêts et maquis abondantes en extrémité ouest de la région, très favorables à l'infiltration (Note 10).

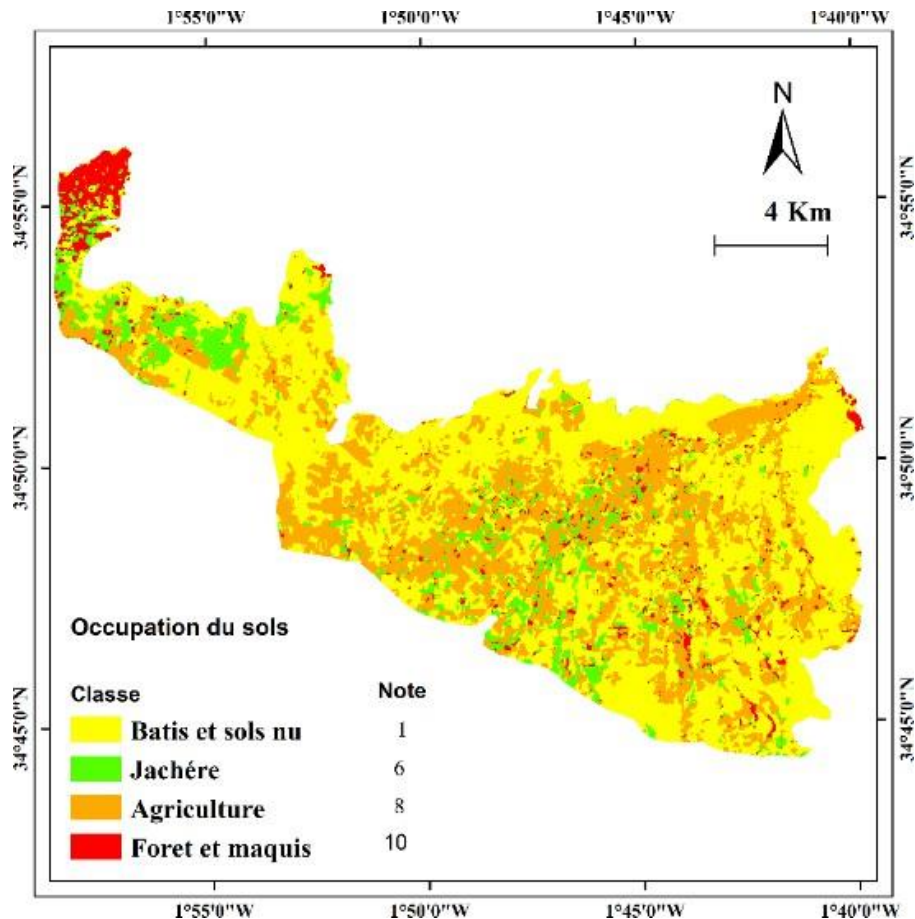


Figure 15 : Carte d'occupation des sols dans la région de Maghnia

2. Pente

Comme pour l'occupation du sol, la répartition du relief et la variation de sa pente fournissent des informations sur l'infiltration et le ruissellement, qui sont contrôlées par la nature des matériaux de surface et leurs inclinaisons par rapport à la surface (Akkari, 2020).

Les terrains dont la pente est supérieure à 18% sont caractérisés par une prédominance des ruissellements. Tandis que les secteurs de pente comprise entre 0 % et 18% favorisent l'infiltration d'eaux (Bentekhici et al. 2023).

La zone d'étude a été classée en cinq classes topographiques, comme la montre la Figure16, avec une variation altimétrique allant de 316m à 595m, la prédominance des altitudes est autour de 400 à 450m sur la surface drainée.

L'angle de pente a un impact significatif, car la pente détermine la quantité d'eau de surface qui s'infiltré dans les eaux souterraines (Das, 2019). Plus la pente est raide, plus le taux d'infiltration sera faible en raison du potentiel de ruissellement plus important (Etikala et al, 2029). La carte des pentes a été reclassée en cinq classes (Fig.17), affichant une variation comprise entre 0 à 30%, où un poids élevé a été accordé aux pentes plates et douces, et un poids faible aux pentes raides (Fig. 17).

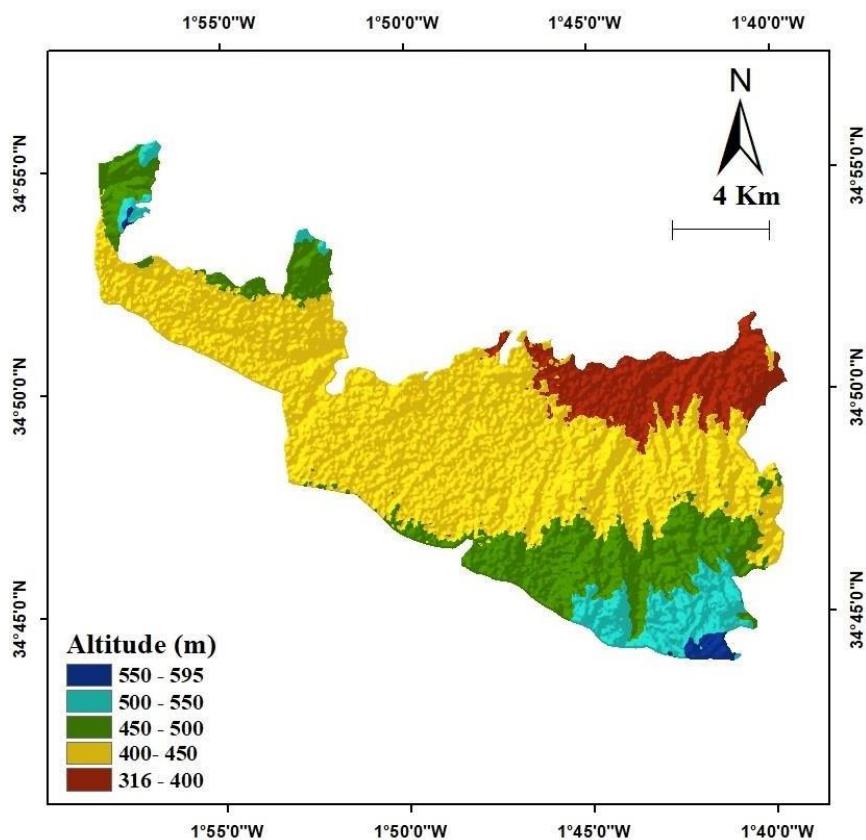


Figure 16. Carte des altitudes dans la région de Maghnia

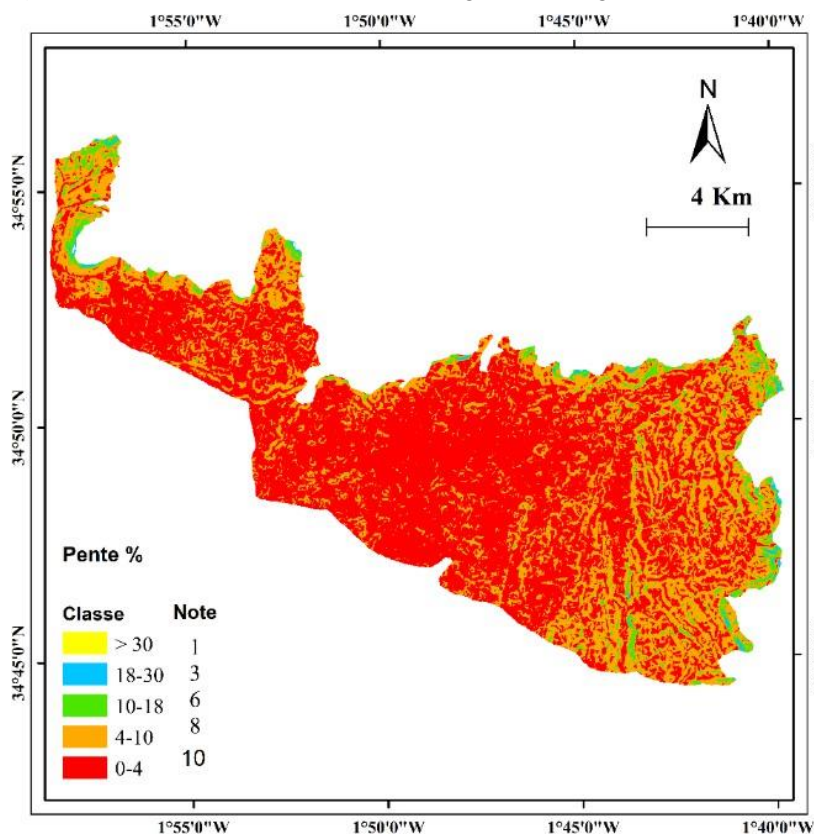


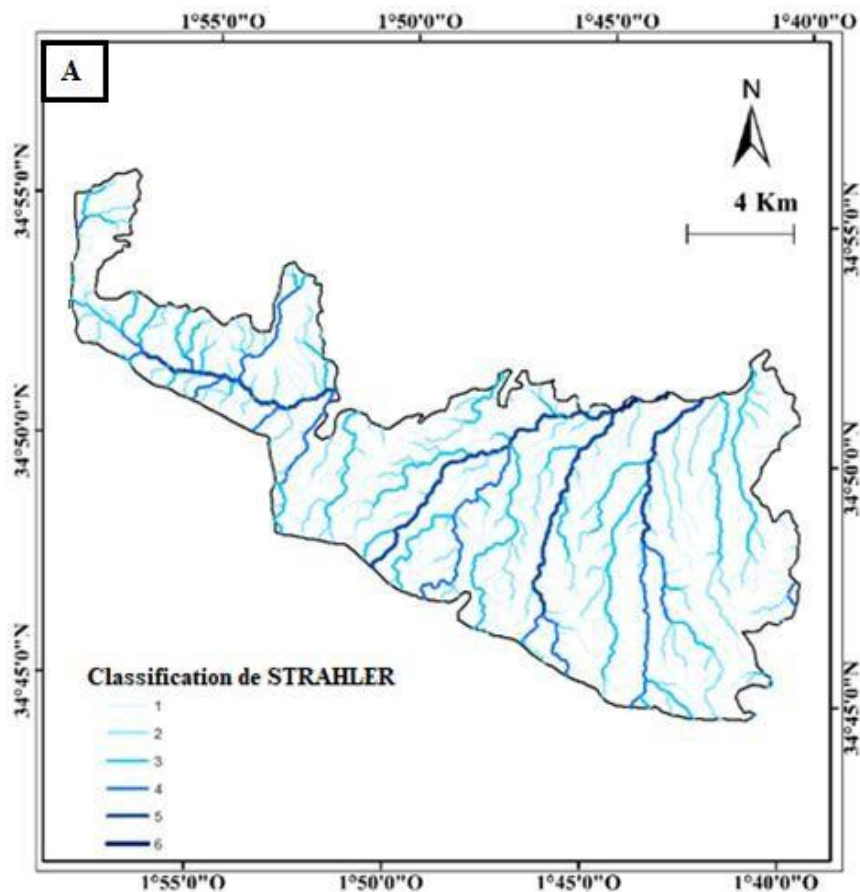
Figure 17. Carte des pentes de la région de Maghnia

3. Densité hydrographique

La densité de drainage est liée au taux d'infiltration, une densité de drainage élevée représente une infiltration plus faible (Masoud et al. 2022). Selon Horton (1945), la densité de drainage est obtenue mathématiquement en divisant la longueur totale de tous les cours d'eau d'un bassin versant par la superficie totale du bassin versant.

L'extraction du réseau de drainage à partir d'un MNT raster, s'appuie sur la détermination des directions d'écoulement de l'eau en chacun des pixels à partir des valeurs altimétriques du MNT, par simulation de l'écoulement de l'eau en surface. Ceci est effectué sous l'utilisation d'outil du logiciel ArcGIS (Fig. 18 A et B).

La forme générale du réseau de drainage est dendritique (Fig. 18 A), avec un ordre de 6 selon la classification de Strahler (Fig. 18 A). Les valeurs de densité de drainage de la zone d'étude varient entre 0.07 et 15.31 km/km²(Fig. 18 B). Cependant, pour le potentiel des eaux souterraines, une note élevée a été attribuée à une faible densité de drainage et une note faible a été attribuée à une densité de drainage élevée (Fig. 18 B).



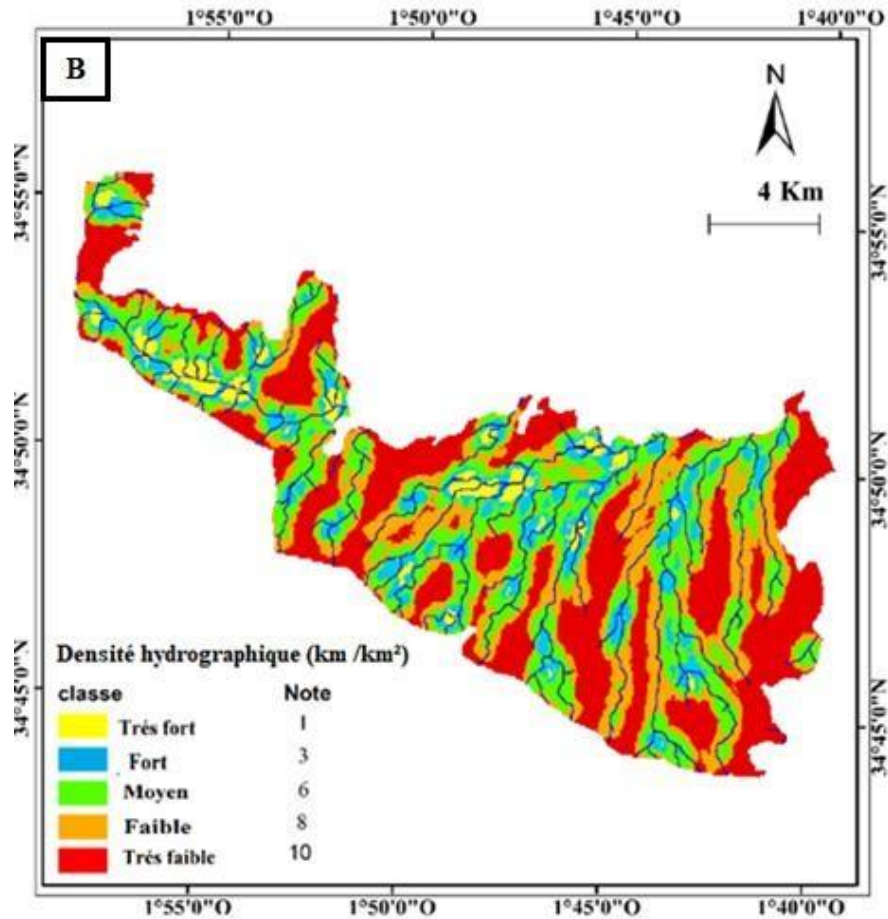


Figure 18. Cartes hydrographiques de la région de Maghnia. A. Classification des talwegs ; B. Densité hydrographique.

4. Perméabilité

La lithologie de surface est un facteur essentiel pour le potentiel des eaux souterraines, car elle contrôle l'eau souterrain

Les couches lithologiques ont été numérisées à partir de la carte géologique de Tlemcen (Fig. 11), géo-référencée sous ArcGIS.

L'établissement de la carte des faciès (Fig. 19), dévoile que les affleurements de la zone considérée sont d'âge quaternaire constitués de dépôts alluviaux anciens et récents (Fig.11).

La lithologie de la zone d'étude a été classée en une seule catégorie en fonction de son influence sur la potentialité des eaux souterraines (Fig. 19). Les alluvions constituées essentiellement de croûte calcaire, sables, graviers et limons sont considérées comme une unité très perméable, qui leur a accordé une attribution d'une note de 10 (Fig. 20).

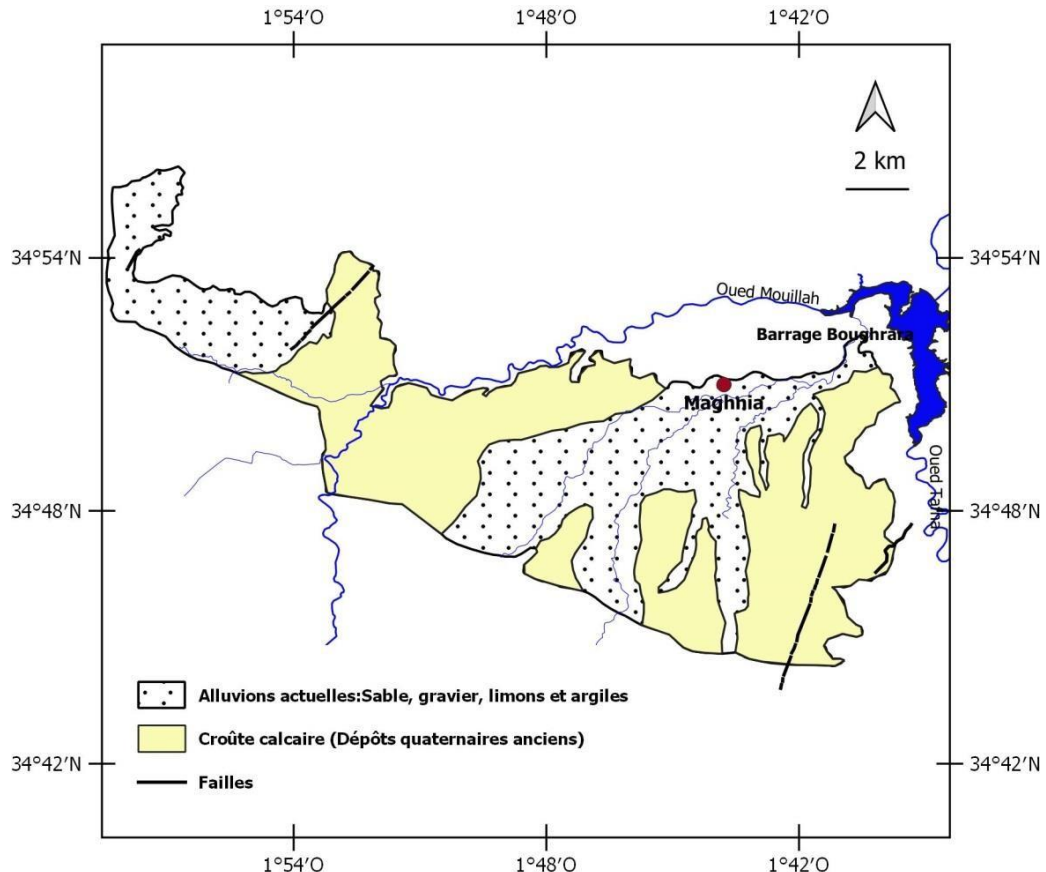


Figure 19. Carte des faciès géologiques de la région de Maghnia.

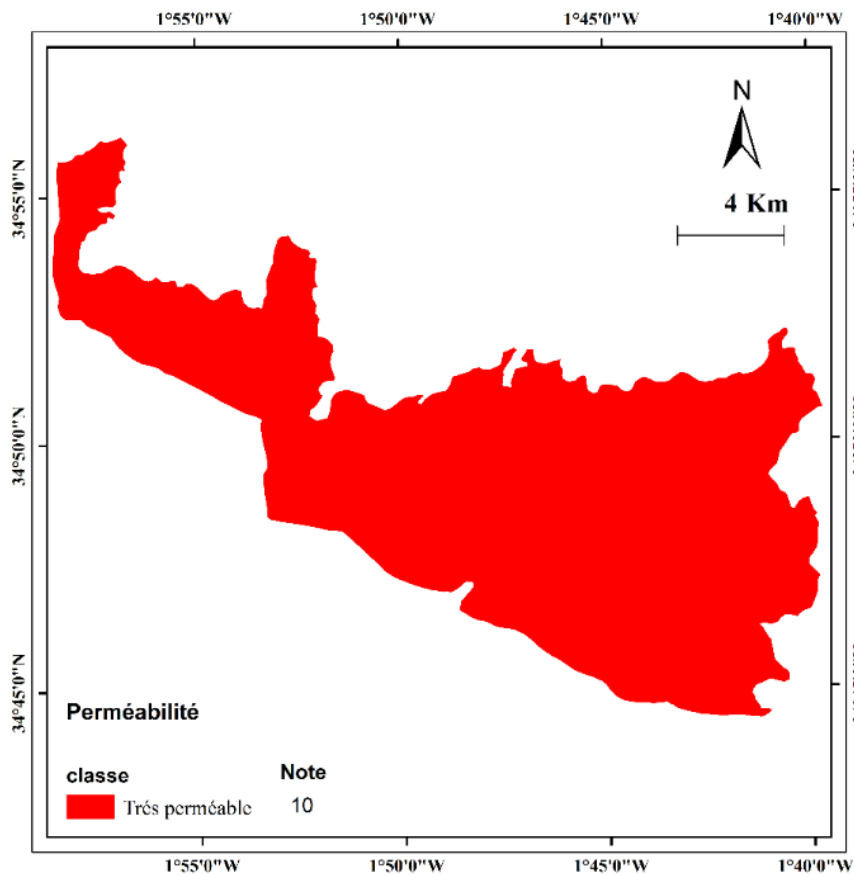


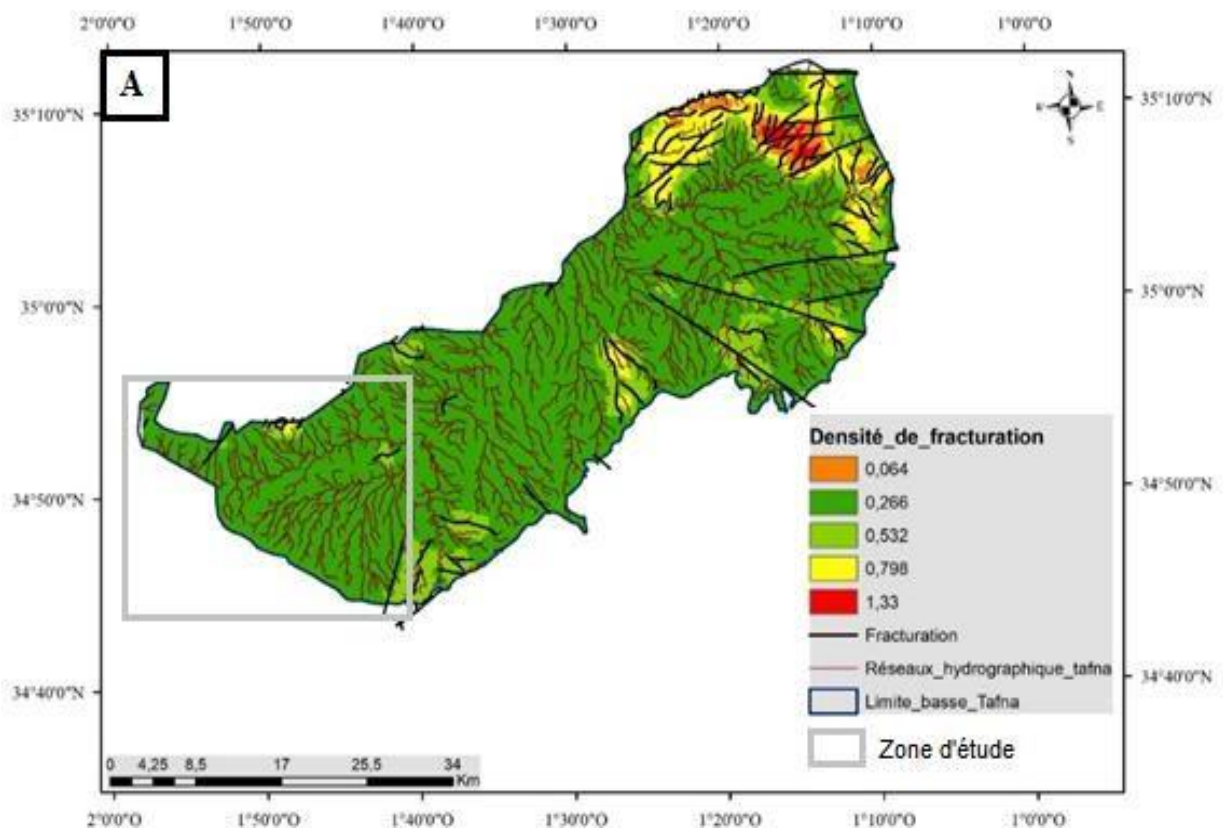
Figure 20. Carte de la perméabilité de la région de Maghnia.

5. Densité de fracturation

La densité des linéaments reflète les structures de la roche, telles que les fractures, les failles ou les joints, ce qui indique une zone perméable où l'eau peut s'infiltrer ((Masoud et al. 2022). Par conséquent, les zones à fort potentiel d'eau souterraine sont caractérisées par une forte densité de linéaments.

Maiga et Mosola (2023), dans leur projet de fin d'étude, avaient numérisés les linéaments de la basse Tafna dont la région de Maghnia fait partie, manuellement à partir de la carte géologique de Tlemcen et puis extrait automatiquement de l'image Landsat 8 à l'aide du logiciel Geomatica. Les structures linéaires avaient été importées et traitées sous ArcGIS pour créer une carte thématique des linéaments, utilisée ensuite pour créer la carte de densité des linéaments dans ArcGIS (Fig. 21 A).

La densité des linéaments de la zone d'étude était comprise entre 0.64 et 0,266 km/km², et la zone a été classée en un seul rang de faible fracturation, noté 1 (Fig. 21 B).



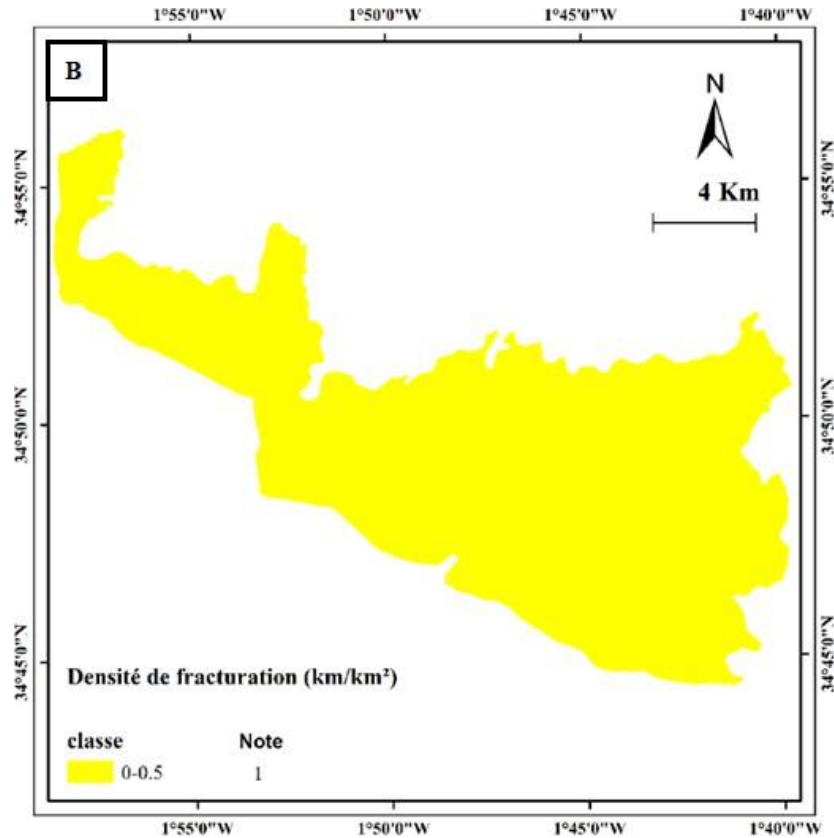


Figure 21. Cartes de densité de fracturation. A. Carte globale de la région de la basse Tafna (Maiga et Mosola, 2023) ; B. Zone d'étude.

6. Infiltration

Le paramètre d'infiltration efficace important dans les études des potentialités des eaux souterraines. Son calcul est effectué grâce à la formule du bilan hydrique globale (Thorntwaite, 1948) dont l'expression est : $I = P - ETR - R$ (Ou : I : l'infiltration, P : précipitations (mm), R : lame d'eau ruisselée (mm), ETR : évapotranspiration réelle (mm)).

Les données climatiques utilisées sont celles de la station de Maghnia, gérée par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Il s'agit des données précipitations et de Températures moyennes mensuelles d'une chronique de 47 ans (1976/77 à 2022/23) énumérées sur le tableau 3.

L'estimation de l'évapotranspiration potentielle (*ETP*) est effectuée par méthode du bilan hydrique avec l'équation:

$$ETP = 16 \left(\frac{I \wedge 10}{I} \right), \text{ Avec } I = \sum i \text{ où } i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \text{ et } \alpha = 0.016I + 0.5$$

Avec, **ETP**: Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm); **T**: Température moyenne mensuelle (°C); **i**: Indice thermique mensuel; **I**: Somme des indices mensuels de l'année; **α**: Indice liée à la température.

ETP mensuelle corrigée est obtenue par : $ETP_{\text{Corrigée}} = ETP \times F$, en tenant que, **F** est un facteur correctif en fonction du mois (m) et de la latitude.

Pour ETR, Ladite méthode permet de calculer ponctuellement, en une station, les valeurs de l'évapotranspiration réelle mensuelle et annuelle à partir de la comparaison des valeurs de l'évapotranspiration mensuelle (ETP) et des hauteurs des précipitations mensuelles (P).

Les résultats de l'ETP et ETR de la station sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Valeurs pluviométriques et thermométriques moyennes mensuelles de la station de Maghnia (1976/77- 2022/23).

	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Ann.
P (mm)	15.0	25.0	38.6	32.3	33.9	32.0	34.1	31.4	25.3	5.4	1.7	2.8	277.5
T (°C)	23.9	19.9	15.1	12.2	10.9	12.0	13.9	16.1	19.2	23.3	26.8	27.3	18.38
ETP (mm)	110.1	72.8	38.4	25.14	20.7	24.1	38.7	54.4	84.1	122,1	162.6	160.2	913.2
ETR mm)	15	25	38.4	25.14	20.7	24.1	34.1	31.4	25.3	5.4	1.7	2.8	249.0

Réserve utile estimée à 90mm.

Enfin, la lame d'eau ruisselée est calculée à l'aide de la formule de Tixeront-Berkaloff applicable en zone aride : $R = \frac{P^3}{3 \times ETP^2}$; Avec, **R** : Ruissellement moyen annuel (mm); **P** :

Précipitations annuelles (mm) et **ETP**: Evapotranspirations potentielles annuelles (mm).

Comme les valeurs de P, de ETR et de R sont connues, l'infiltration moyenne mensuelle a été aisément calculée (Tableau 4)

Tableau 4 : Valeurs des paramètre ruissellement et infiltration dans la région considérée

	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Station de Maghnia	277.5	913.2	249.04	9.49	28.96

Avec une estimation de 29 mm, l'infiltration est considérée comme faible (comprise entre 25 et 30mm), sa notation est de 3 (Fig.22).

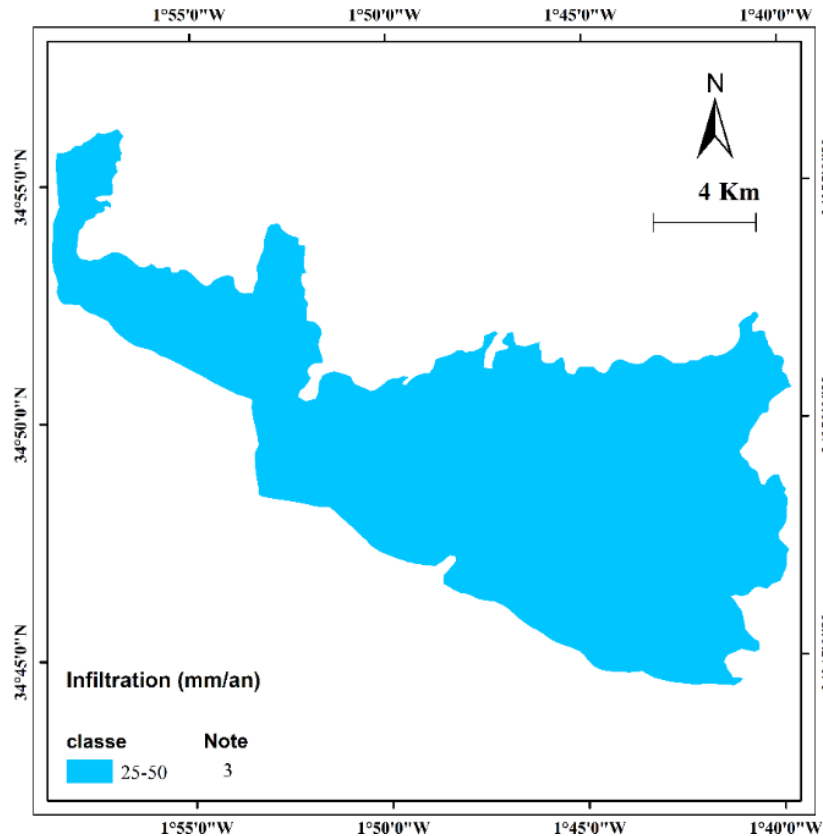


Figure 22. Carte d'infiltration de la région de Maghnia.

7. Profondeur de l'eau souterraine

La profondeur des eaux souterraines est définie comme la distance verticale entre la surface du sol et le niveau statique de l'eau. Elle mesure la distance potentielle que l'eau peut parcourir jusqu'à l'aquifère et contrôle le coût de la consommation et du captage de l'eau (Masoud, 2022). En général, plus, l'eau est profonde, plus le potentiel de l'eau souterraine est faible (Masoud, 2022).

La profondeur de la nappe a été déduite en fonction des données de forages délivrées par les services d'hydraulique, en appliquant la méthode d'interpolation géostatistique Kriging. Ces mêmes données ont été utilisées pour la réalisation de la spatialisation du paramètre débit.

7.1. Niveau statique(NS)

Les NS de la zone d'étude sont compris entre 15 et 110m, avec une prédominance des niveaux supérieurs à 40 m, faiblement notées (note égale à 1) (Fig. 23).

7.2. Niveau dynamique

Le niveau dynamique est la profondeur de l'eau dans un forage ou un puits lors d'un pompage à un débit donné. Le niveau minimale frôle les 30m, et le maximal du niveau dynamique est de 184m (F2), localisé au sud de la région d'étude (Fig. 24).

De ce fait, pour le potentiel des eaux souterraines, une note élevée (10) a été attribuée aux niveaux dynamiques faibles, répartis aux extrémités de la région (30-50m) et une note faible (1) a été attribuée aux niveaux dynamiques élevés (>120m) (Fig. 24).

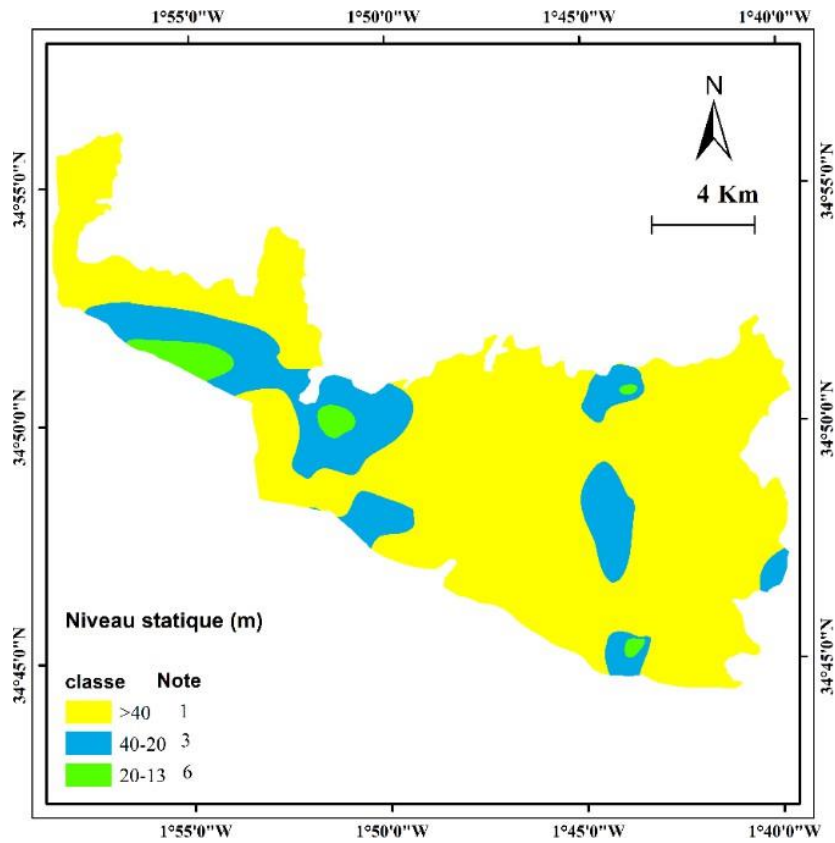


Figure 23. Spatialisation des niveaux statiques de la région de Maghnia.

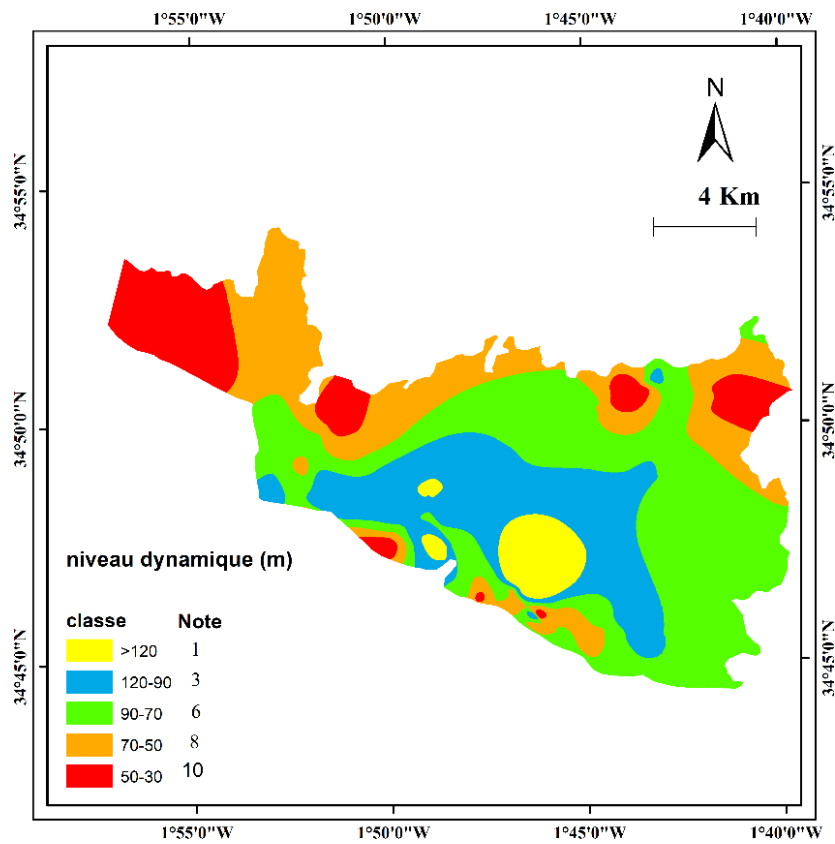


Figure 24. Spatialisation des niveaux dynamiques de la région de Maghnia.

8. Débit d'exploitation

La ressource en eau n'est exploitable que si le débit d'exploitation est significatif (au moins 1 m³/h). Le débit d'exploitation en lui-même est conditionné par la quantité d'eau dans la réserve souterraine et la rapidité de renouvellement de cette réserve en cas de forte sollicitation (Youan Ta et al. 2011).

Les débits d'exploitation dans la région d'étude varient entre 2 à 20 l/s (F30) localisé dans la partie centrale de la carte. La carte du débit a été classée en trois catégories, notées de 1, 3 et 6, représentant des classes de potentialité respectivement faible à élevée (Fig. 25).

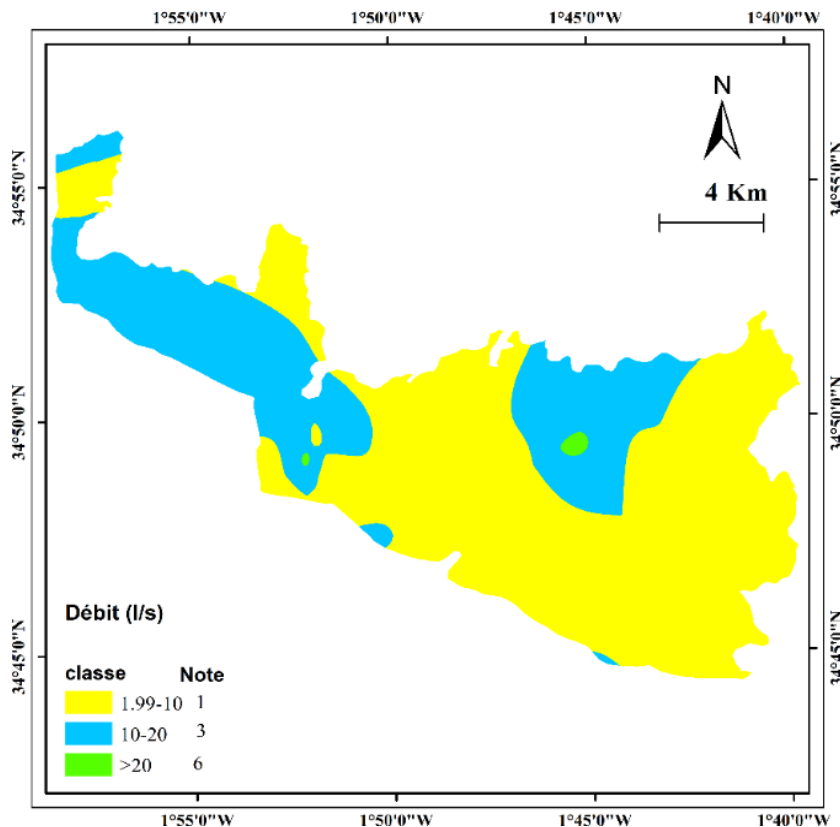


Figure 25. Spatialisation des débits d'exploitation de la région de Maghnia.

B. Application de la méthode AHP

Les paramètres (Critères) de décision sont pondérés grâce à la méthode de combinaison linéaire basée sur la technique de comparaison par paire dite Processus d'analyse Hiérarchique (AHP), qui permet de produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 1 (Saaty, 1987). La méthode est appliquée automatiquement par l'extension : **AHP** sur **ArcGIS**, module complémentaire du logiciel ArcGIS, développé par ESRI.

Les matrices de comparaison par paire et les coefficients de pondération des critères sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Etant donné que le rapport de cohérence est inférieure à 0.1 (Tab. 5), la matrice de comparaison est cohérente (Saaty, 1987).

Tableau 5. Matrice de comparaison et pondération des paramètres classées par la méthode AHP.

	OS	P	DH	Pr	I	NS	ND	Q _{exp.}	DF	Poids relatif
OS	1	3	5	0.5	2	2	3	1	2	0.15
P	0.33	1	3	0.25	0.5	0.5	1	0.33	1	0.09
DH	0.2	0.33	1	0.14	0.25	0.25	0.33	0.2	0.33	0.05
Pr	2	5	7	1	4	4	5	2	3	0.27
I	0.5	2	4	0.25	1	1	2	0.5	1	0.09
NS	0.5	2	4	0.25	1	1	2	0.5	1	0.09
ND	0.33	1	3	0.2	0.5	0.5	1	0.33	1	0.06
Q _{exp.}	1	3	5	0.5	2	2	3	1	2	0.13
DF	0.5	1	3	0.33	1	1	1	0.5	1	0.07
Rapport de cohérence (Rc) = 0.082 (Rc < 0,1)										Σ = 1

Les zonalités à potentiel hydrique dans la région de Maghnia, dans l'extension AHP-arcGIS ont été classées sur la base de la valeur de l'indice calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$IP = (OS * 0.15) + (P * 0.09) + (DH * 0.05) + (Pr * 0.27) + (I * 0.09) + (NS * 0.09) + (ND * 0.06) + (Q_{exp.} * 0.13) + (DF * 0.07).$$

Avec IP : l'indice de la zone potentielle en eaux souterraines

C. Carte des potentialités des eaux souterraines de la région de Maghnia

La carte du potentiel des eaux souterraines de la région de Maghnia obtenue par le modèle AHP est présentée à la figure 26. Elle a été classée selon la méthode de classification des ruptures naturelles dans ArcGIS en Cinq (5) catégories :

Potentiel très fort, fort, moyen, faible et non attribué. Sur cette carte, la majeure partie de la zone d'étude a été classée comme ayant un potentiel moyen (37,71 %), suivie de 30,46 % de la zone totale classée comme ayant un potentiel fort, 28,39 % comme ayant un potentiel faible, et seul 3,44 % comme ayant un potentiel d'eau souterraine très fort.

Dans les zones à potentialité très forte et forte localisée principalement dans au nord, les ouvrages ont des profondeurs d'eau comprises entre 20 et 40m, à débit important (10-20 l/s). Elles sont caractérisées par de faible pente et occupée par des cultures intensives. Ces parcelles sont très favorables à l'implantation des forages à haut débits pour l'irrigation.

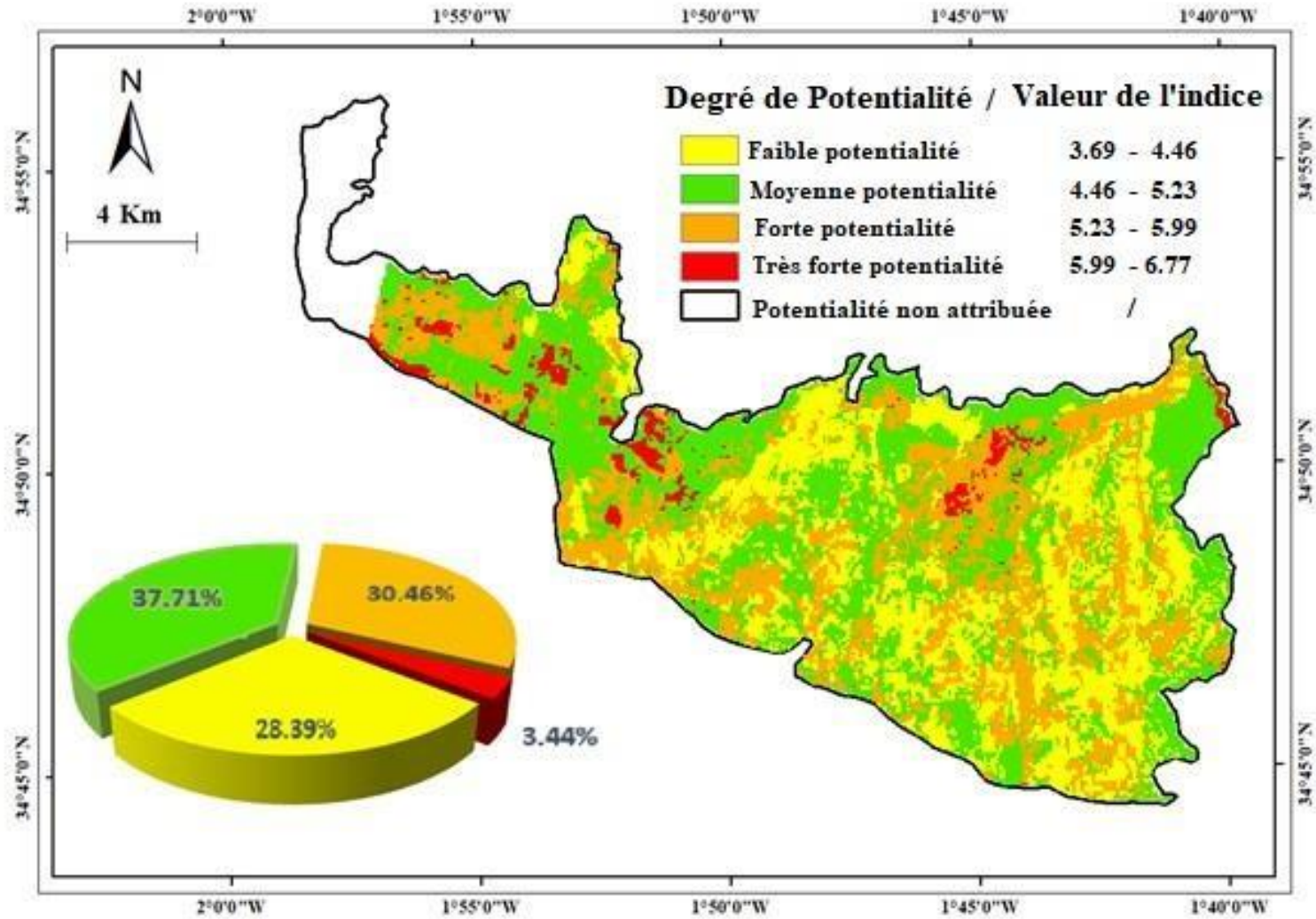


Figure 26: Carte des potentialités des eaux souterraines dans la région de Maghnia.

II. VALIDATION DE LA METHODE MULTICRITERE PAR EVALUATION DE LA QUALITE CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

L'évaluation des potentialités des eaux des deux aquifères quaternaires (Maghnia et de Zriga) dans la région d'étude reste incomplète sans la validation du modèle avec des données de terrain. A cet effet, les résultats affichés par le modèle AHP doivent être comparés avec les observations du terrain.

Dans la présente étude, une évaluation de la qualité des eaux souterraines de la région considérée a été réalisée moyennant les concentrations des chlorures et des nitrates mesurées pour les eaux échantillonnées dans les quatorze forages durant la campagne d'échantillonnage au mois de Mars 2024. Ces deux paramètres chimiques ont été analysés par méthode de chromatographie ionique au laboratoire de recherche n°66 de la Chimie analytique et d'hydrolyse.

Les résultats des analyses sont affichés au tableau suivant :

Tableau 6 : Concentrations des chlorures et nitrates dans les eaux souterraines de la région de Maghnia.

Forages	Longitude	Latitude	Altitude	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
P1	-1.73725	34.8282	399	330.66	0.10
P2	-1.73678056	34.8275611	399	414.10	11.96
P3	-1.73780556	34.8174972	413	413.76	0.40
P4	-1.73906111	34.8178583	410	290.39	0.40
P6	-1.76187222	34.8149833	421	593.76	0.10
P7	-1.76336944	34.8141806	413	537.5	0.69
P8	-1.82912222	34.8179806	430	134.72	0.10
P9	-1.71845278	34.8207972	408	601	0.01
P10	-1.79769722	34.8188667	418	217.35	52.86
P11	-1.80297778	34.8129778	424	149.36	2.70
P12	-1.79546944	34.8421222	409	203.22	9.89
P14	-1.79519444	34.8423417	409	432.56	42.74
P16	-1.84143611	34.8100083	438	432.56	1.60
P24	-1.7407	34.847225	395	881.86	114.77

La carte de la localisation des points d'eau échantillonnés a été superposée à la carte finale des potentialités en eaux souterraines établie par le modèle AHP (Fig. 27A).

Globalement, Les points d'eau échantillonnés présentent des concentrations en nitrate relativement faibles, comparées à la valeur seuil (<50mg/l) pour la consommation humaine, fixée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), à l'exception des deux forages P10 (52.86 mg/l) et P24 (114.77 mg/l) localisés à proximité des zones urbanisées (voir Figure 15). Ces deux points d'eau contaminés, situés en zones à moyenne potentialité peuvent impactés la qualité des eaux destinées à la fois à la potabilité et l'irrigation des cultures de cette zone (Fig.27 B).

Cependant, ces points d'eau ont des concentrations en chlorures comprises entre 134.72 et 881.86 mg/l. Les forages nommés P2, P3, P6, P7, P9, P14, P16, P24 situés dans les zones à moyenne, forte et très forte potentialité en eau (Fig.27 C), destinés à l'irrigation des cultures, présentent des concentrations de Chlorures supérieures à 350 mg/l, seuil de la toxicité en

chlorure fixée dans les directives pour l'interprétation de la qualité des eaux d'irrigation (Ayers et Westcot, 1985). A ce seuil, leurs effets toxiques sont immédiatement perçus comme des brûlures de feuilles ou la mort de tissus foliaires. Normalement, les dommages causés à la plante surviennent en premier à l'extrémité des feuilles et progressent vers l'arrière le long des bords. Dans les cas de teneurs excessives, une défoliation précoce s'ensuit (Ayers et Westcot, 1985).

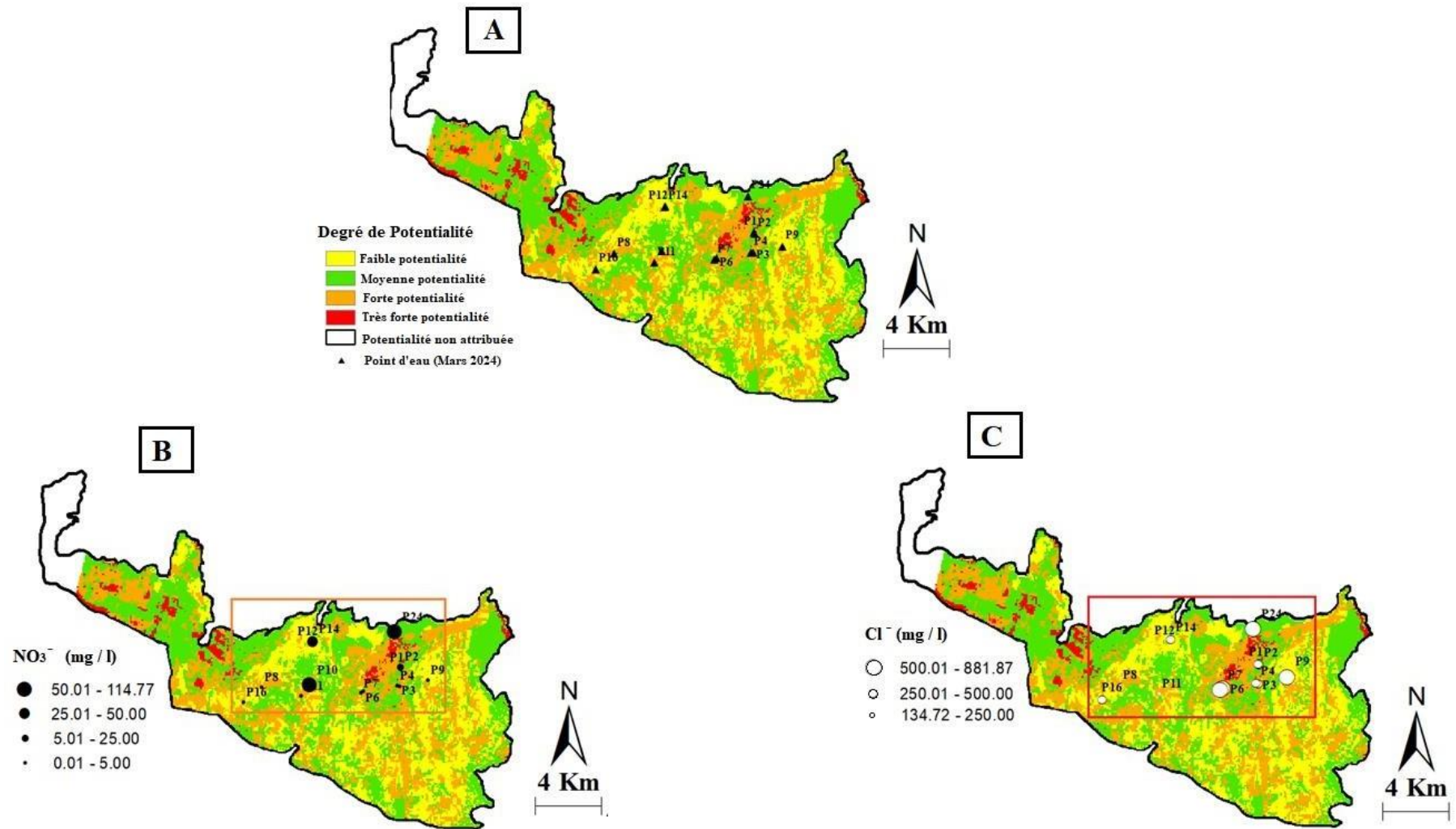


Figure 27: Répartition des concentrations chimiques. A. Confrontation des forages échantillonnés sur carte des potentialités des eaux ; B. Spatialisations des teneurs en Nitrates ; C. Spatialisation des teneurs en Chlorures.

Conclusion

Les principaux résultats obtenus dans cette étude consacrée à la cartographie des potentialités en eau souterraine des aquifères plio-quaternaires des plaines de Maghnia et Zeriga, seront ici brièvement résumés:

La région de Maghnia est située à l'ouest de la wilaya de Tlemcen, localisée en extrême nord-ouest algérien, marquée par un climat semi-aride.

- Sur le plan géologique et hydrogéologique

La région de Maghnia est une cuvette tectonique orientée (EN.E./O.S.O) comblée par des dépôts successifs tertiaires et quaternaires provenant de l'érosion des montagnes voisines (Ghar Rouban et Djebel Fillaoussène) reposant sur un substratum jurassique.

Deux aquifères potentiels sont présents dans la région, le principal est celui de la plaine de Maghnia composé de formations alluviales quaternaires constituées principalement de graviers, sables et limons, reposant sur un substratum marneux du Miocène (Baba-Hamed, 2007). L'aquifère de la plaine de Zriga, formé par un remplissage plio-quaternaire variable allant de fractions fines (argileuses à marneuses) aux fractions grossières (galets, poudingues). (Kebir et Rostan, 1992).

- Sur plan morphométrique

Le relief de la zone d'étude a une variation altimétrique allant de 316m à 595m, avec une prédominance des altitudes de 400 à 450m sur la surface drainée, avec des pentes relativement faibles comprises entre 0 et 30%. Son réseau de drainage est dendritique, classé en ordre 6 selon Strahler.

De par la caractérisation morphométrique et climatique du secteur d'étude, l'infiltration des eaux est estimée à 29mm.

- Sur le plan occupation des sols

La région de Maghnia est occupée par quatre zones : les zones bâtis et les sols nus, les zones jachères, les zones à cultures, et les forêts.

- Sur le plan exploitabilité des eaux

La diversité des activités agricoles (cultures d'olives, d'agrumes et de céréales) dans la région de Maghnia nécessite une ressource en eau importante pour l'irrigation. Les implantations de forage déjà réalisées dans le secteur d'étude, ont des débits d'exploitation variant de 2 l/s à 20 l/s.

- Sur le plan potentialité en eau souterraine

La réalisation de la carte des potentialités en eau souterraine grâce au modèle AHP utilisé dans l'approche décisionnelle-multicritère, a permis d'obtenir un important outil pour la prospection hydrogéologique de la région de Maghnia. Près de 72% de la superficie globale de zone d'étude dispose d'une bonne réserve d'eau souterraine, répartie entre 37.71% à potentiel moyen et 34% englobant les potentiels fort et très fort. Ces zones à pente relativement faible qui permet la recharge des nappes, sont convenables à l'implantation d'ouvrage hydraulique à débit intéressant pour l'exploitation.

La validation de la carte thématique des potentialités en eau des aquifères quaternaires (Maghnia et de Zriga) dans la région d'étude réalisée par confrontation des zones aux concentrations en éléments chimiques (Chlorures et Nitrates) d'une campagne récente (Mars 2024) a montré que :

Malgré l'intensité des pratiques agricoles, la contamination des eaux souterraines, et par conséquent, des cultures irriguées, par les nitrates reste faible même pour des futures implantations. Cependant le choix des cultures dans la zone d'étude doit être adéquat par rapport aux taux des concentrations en chlorure considérablement élevées dans certaines zones de la région, présentant une toxicité modérée à sévère surtout dans la partie nord et nord-est de la région.

*Références
bibliographiques*

- Affoué B Y., Bi T A G ., Alioune K ., Oi M J M & Kouamé A K. (2014).** Cartographie du potentiel en eau souterraine du bassin versant de la Lobo (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère, pp 857-867.
- Al-sulaiman F., Fahdawi s., Salhi S. (2017).** Detection of structural control on formation water quality, in Hemrin oilfield, northern Iraq, using lineament analysis and hydrochemical data. *Tikrit Journal of Pure Science*, pp 146-158.
- Ayers R S., Westcot D W. (1985).** Water quality for agriculture, FAO irrigation and Drainage. 29 Paper, Rev I. Food and Agriculture Organisation, Rome.174 p.
- Baba hamed K.(2007).** Hydrodynamique et modélisation d'une nappe alluviale, validation par l'approche géostatistique. Application à la nappe de la plaine de Maghnia (NW Algérie). Thèse de doctorat, Université Abou-Bekr-Belkaïd, Tlemcen, Algérie.158p
- Baba-hamed, K. & Bouanani,A. (2016).** Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : Cas du bassin versant de la Tafna. (Nord-ouest algérien). *Geo-Eco-Trop.*, 40(4), pp 277-286
- Belacel B., Rahmmoni KH.(2023).**Cartographie des potentialité en eaux sous terraines par la méthode multicritere AHP-sig et télédétection-cas de la nappe ghriss-Mascara. Mémoire d'ingénieur d'Etat en Sciences Géodésiques et Travaux Topographiques. Centre technique spatiale Arzew- Oran, 93p
- Bentekhici N., Benkesmi Y., Ghabi M., & Saad, A. (2023).** Apport des données géospatiales et des analyses multicritères pour la cartographie des potentialités en eaux souterraines destinées à l'irrigation : Cas de la nappe phréatique du plateau de Mostaganem. 1^{ère} Conférence Nationale sur les Technologies Geospatiales pour une agriculture moderne et durable – CNTGA'2023, 29-30, ASAL, CTS, Arzew, Oran, Algérie.
- Bersi M. (2018).** Cours de Télédétection, Principes et Application en Géosciences / Première Partie. ResearchGate 17p
- Bonn F., Rochon G.(1992).** Précis de télédétection volume 1: Principes et méthodes. Sainte-Foy: Presse de l'université du Québec/AUPELF, 485 p.
- Bouadoud A., Bensaber L., Assaber N.(2013).** Utilisation du SIG pour la cartographie urbaine (cas de la ville de Fès). Projet tutoré .Universitaire de Technologie Génie Minéral et Environnement (DUT GME) Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc.41p
- Bouanani, A., Baba-Hamed, K. & Fandi, W. (2013).** Production et transport des sédiments en suspension dans l'oued Sikkak (Tafna – nord-ouest Algérie). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 26(2),pp 119–132. <https://doi.org/10.7202/1016063ar>
- Boussema S., Khebour F. (2020).** Méthodologie de la cartographie de l'occupation du sol à la typologie des paysages appliquée à la région de Enfidha, Tunisie [Methodology of land use mapping to landscape typology applied to the Enfidha region, Tunisia], *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol. 52 No. , pp1–12

Bouzarour-Amokrane, Y. (2013). Structuration des processus d'aide à la décision par analyse bipolaire. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, France. 176 p.

Caillet R. (2003). Analyse multicritère : Étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie. Série scientifique, *Centre Interuniversitaire de Recherche en Analyse des Organisations (CIRANO)*, Montréal, Canada, 51p.

Campbell J.B. et Wynne R.H. (2011). Introduction to Remote Sensing, 5th Edition. Guilford Press. 676 p

Chuvieco E.(2016). Fundamentals of Satellite Remote Sensing an Environmental Approach Second Edition, CRC Press, 486p.

Das S. (2019). Comparison among influencing factor. frequency ratio. and analytical hierarchy process techniques for groundwater potential zonation in Vaitarna basin. Maharashtra. India. *Groundw. Sustain. Dev.* 8. pp617–629.

Doumouya I. et al. (2012). Modelling of favourable zone for the establishment of water points by geographical information system (GIS) multicriteria analysis (MCA) in the Aboisso area (South-east of Côte d'Ivoire). *Environmental Earth Sciences*. Doi:10.1007/s12665-011- 16622-2, pp1764-1780

Drešković N& Đug S.(2012). Applying the inverse distance weighting and kriging methods of the soatial interpolation on the mapping the annual precipitation in bosnia and Herzegovina. *International Congress on Environmental Modelling and Software*. 229p

D.R.E.W. TLEMCEN. (2003). -Etude de dépollution du barrage de Hammam Boughrara wilaya de Tlemcen. Rapport scientifique établi par E.N.H.P.O,

El-hadi k. (2006). Représentation de données spatiale a différents niveau d'abstraction : application a l'archéoastronomie. Thèse de doctorat science de l'enivrement, Université de Corse-Pasquale Paoli science et technique, France, 152p.

El Hage, C. (2012). Etude de la qualité géomorphologique de modèles numériques de terrain issus de l'imagerie spatiale. (Thèse de doctorat). Conservatoire National des Arts et Métiers, École Doctorale 415, Laboratoire de Géodésie et Géomatique. 146p

Etikala B., Golla V., Li P., Renati S. (2019). Deciphering groundwater potential zones using MIF technique and GIS: A study from Tirupati area. Chittoor District. Andhra Pradesh. India. *HydroResearch*. 1.pp 1–7.

Ghibehe I. (2011)- Contribution à la régionalisation stochastique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans le cadre d'un SIG : Application à la région de Djelfa. *Dipl. Magister*, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie (ENSA), Alger, 101 p.

Ghenim, A. N., & Megnounif, A. (2013). Influence des fluctuations hydro-pluviométriques sur la production des sédiments : cas du bassin de la Haute Tafna, *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 26(1), 53-62. <https://doi.org/10.7202/1014919ar>

Girard M C & Girard C M. (2010). Traitement des données de télédétection - 2ème édition : Environnement et ressources naturelles. Dunod, Paris, 553 p

Henriet L, (2000). Systèmes d'évaluation et de classification multicritères pour l'aide à la décision : Construction de modèles et procédures d'affectation » phd-thesis, thèse de doctorat Université Paris Dauphine - Paris IX, 153p

Jensen J.R, (2015). Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, 4th Edition. Pearson, Upper Saddle River, 544p

Kebir H., Rostan R. (1992). Etude Hydrogéologique de la plaine de Zriga (NordOuest de la plaine de Maghnia). Memoire d'ingénieur Université d'Oran, Algérie

Lemoine, O. (1965). Les sols de la plaine de Marnia : leurs aptitudes à l'irrigation. Paris : ORSTOM, 129p

Mimouni D.J.,& Mahboubi H. (2014). Etude géologique de l'indice de minéralisation : « Djbel Deglen » (Partie sud des Monts de Ghar Roubane, Tlemcen, Algérie) .Mémoire de Master Académique, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen.65p

Madrucci V, Taioli F, De Araujo CC (2008). Groundwater favourability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, Sao Paulo State, Brazil, J Hydrol. doi:10.1016/j.jhydrol. 2008.03.026

Maiga A K., Mosola T J. (2023). Cartographie des potentialités en eau souterraine de la Basse Tafna (Algérie Nord Occidentale) : Approche par analyse multicritère. Mémoire de Master Professionnel, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen. p 50

Malczewski J. (2000). On the use of weighted linear combination method in GIS: common and best practice approaches. Transactions in GIS, 4(1), 5-22.

Masoud A M., Pham Q B., Alezabawy A K., El-Magd S A A. (2022) Efficiency of Geospatial Technology and Multi-Criteria Decision Analysis for Groundwater Potential Mapping in a Semi-Arid Region. Water. 14. 882. <https://doi.org/10.3390/w14060882>.

Prasad R K., Mondal N C., Banerjee P., Nandakumar M V., & Singh V S. (2008). Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. Environmental Geology, 55(3), 467-475p. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0992-3>

Richards J.A. (2013). Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction, 5th Edition. Springer, Berlin,494p

Thornthwaite C W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38(1), pp55-94

Saaty T L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International journal of services sciences, 1(1), pp83-98.

Saaty R.W., (1987). The analytic hierarchy process what it is and how it is used, *Mathematical Modelling* 9, 3–5, 161–176p [http://dx.doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](http://dx.doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York. What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), pp161-176

Saley, M.B., (2003). Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo-image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody.159p

Samaali H.(2011). Etude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Mejerda par télédétection et SIG, Thèse de doctorat de géographie, Université de Tunis, 351p

Toutin T. (2004). Processing of remote sensing images: Models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing* 25(10) pp. 1893-1924. DOI [10.1080/0143116031000101611](https://doi.org/10.1080/0143116031000101611)

Youan Ta, M., Lasm, T., Jourda, J.P.J., Bachir Saley, M., Adja Miessan, G., Kouamé, K., Biémi, J., (2011). Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas de Bondoukou (Côte-d'Ivoire). *Revue internationale de géomatique* 21, pp.43–71. <https://doi.org/10.3166/riig.21.43-71>

WEBGRAPHIE

- <https://www.sig-geomatique.fr/sig-sig.html>

- <https://planificateur.a-contresens.net/afrique/algerie/wilaya-de-lemcen/maghnia/2490584.html>

- <https://eos.com/fr/blog/teledetection/>

- <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>

- <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>

-<https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-publications/imagerie-satellitaire-photos-aer/tutoriels-sur-la-teledetection/introduction/le-spectre-electromagnetique/14624>

- <https://eo.belspo.be/fr/corrections-geometriques-et-radiometriques>

- <https://trevi-algerie.com/>

- https://www.ons.dz/IMG/pdf/demographie_algerienne2012.pdf

- https://www.industrie.gov.dz/wp-content/uploads/documents/bulletin_officiel/BO-2022-T3-FR.pdf

- <https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-des-realizations-du-secteur>

Liste des figures

Figure		Page
Figure 1	Nature et propagation d'une onde électromagnétique (Bonn et Rochon, 1992).....	10
Figure 2	Rayonnements et spectre électromagnétique. (https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-publications).....	11
Figure 3	Les processus de télédétection (CNES, 2008).....	12
Figure 4	Parallaxe et correction géométrique en imagerie satellitaire (https://eo.belspo.be/fr/corrections-geometriques-et-radiometriques).....	13
Figure 5	Composantes du SIG (Bouadoud et al., 2013).....	14
Figure 6	Types des formats d'images d'un SIG (Ghibeche, 2011).....	15
Figure 7	Différentes problématiques en analyse multicritère (Henriet, 2000).....	16
Figure 8	Situation géographique de la région de Maghnia.....	21
Figure 9	Carte géologique de la région de Maghnia (<i>in</i> baba-hamed,2007).....	23
Figure 10	A. Image satellite Landsat 8, B. Modèle numérique de terrain, de la zone d'étude.....	25
Figure 11	Carte géologique de la région de Tlemcen (ARNH, 2006).....	26
Figure 12	Carte hydrogéologique de la région de Tlemcen (ARNH, 2006).....	27
Figure 13	Localisation des forages dans la région de Maghnia.....	28
Figure 14	Localisation des forages dans la région de Maghnia (Campagne Mars 2024).....	29
Figure 15	Carte d'occupation des sols dans la région de Maghnia.....	33
Figure 16	Carte des altitudes dans la région de Maghnia.....	34
Figure 17	Carte des pentes de la région de Maghnia.....	34
Figure 18	Cartes hydrographiques de la région de Maghnia A. Classification des talwegs ; B. Densité hydrographique	36
Figure 19	Carte des faciès géologiques de la région de Maghnia.....	37
Figure 20	Carte de la perméabilité de la région de Maghnia.....	37
Figure 21	Cartes de densité de fracturation. A. Carte globale de la région de la basse Tafna (Maiga et Mosola, 2023) ; B. Zone d'étude	39
Figure 22	Carte d'infiltration de la région de Maghnia	41
Figure 23	Spatialisation des niveaux statiques de la région de Maghnia	42
Figure 24	Spatialisation des niveaux dynamiques de la région de Maghnia.....	42
Figure 25	Spatialisation des débits d'exploitation de la région de Maghnia	43
Figure 26	Carte des potentialités des eaux souterraines dans la région de Maghnia.....	45
Figure 27	Répartition des concentrations chimiques. A. Confrontation des forages échantillonnés sur carte des potentialités des eaux ; B. Spatialisations des teneurs en Nitrates ; C. Spatialisation des teneurs en Chlorures.....	48

Liste des tableaux

	Page
Tableau 1 Caractéristiques des bandes Landsat 8 (Al-sulaiman et al., 2017)	9
Tableau 2 Classification et standardisation des paramètres (Hyann et al., 2015 ; Yao et al., 2016 ; Akkari, 2022).	20
Tableau 3 Valeurs pluviométriques et thermométriques moyennes mensuelles de la station de Maghnia (1976/77- 2022/23).	42
Tableau 4 Valeurs des paramètre ruissellement et infiltration dans la région considérée	42
Tableau 5 Matrice de comparaison et pondération des paramètres classées par la méthode AHP.	46
Tableau 6 Concentrations des chlorures et nitrates dans les eaux souterraines de la région de Maghnia.	48