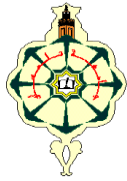


N° d'ordre : 10 /DSTU/2023



MEMOIRE

Présenté

à



L'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN
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

Houssam DINE

CARTOGRAPHIE DES POTENTIALITES EN EAU SOUTERRAINE DES MONTS DE TLEMEN (ALGERIE NORD OCCIDENTALE) : APPROCHE PAR ANALYSE MULTICRITERE.

Soutenu le juin 2023 devant les membres du jury :

Abbas MAROK, Professeur, Univ. Tlemcen
Lamia YEBDRI, MA (A), Univ. Tlemcen
Lahsen KEBIR, Ingénieur (P), CTS, Oran
Fatiha HADJI, MC (B), Univ. Tlemcen

Président
Encadreur
Co-encadreur
Examinateur

DEDICACES

Malgré toutes les conditions difficiles, les démoralisations et les obstacles rencontrés, ce travail a été accompli.

Je décide ce travail à :

Mes chers parents, pour leurs soutien et encouragements pendant toutes mes années d'études.

Ma mère, qui n'a cessé de m'encourager et de veiller à ce que je termine mes études, tu resteras à tous jamais dans mon cœur, et j'espère que tu seras recompensée le paradis éternel, inchaa Allah...

Mon frère et ma sœur ...

Mes amis ...

Ma grande famille ...

DINE Houssam

TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS	I
RESUME	III
ABSTRACT	IV

INTRODUCTION

I. PROBLEMATIQUE	1
II. OBJECTIFS	1
III. STRUCTURE DU MEMOIRE	1

Premier chapitre : Synthèse bibliographique

I. ETAT DE CONNAISSANCES DES AQUIFERES KARSTIQUES	3
A. Les milieux karstiques	3
1. Le karst	3
2. La karstification	3
B. Les aquifères karstiques	3
1. Description	4
2. Structure et fonctionnement	4
3. Modalités d'infiltration	5
4. Géomorphologie des aquifères karstiques	6
II. TELEDETECTION ET SIG	7
A. Généralités sur la télédétection	7
1. Principes de base de la télédétection	7
1.1. Rayonnement et spectre électromagnétique	7
1.2. Signature spectrale	7
2. Processus de la télédétection	8
3. Caractéristiques du capteur Landsat 8 ETM+	9
4. Application de la télédétection en hydrogéologie	9
B. Systèmes d'Information Géographique (SIG)	10
1. Composantes des SIG	10
2. Mode de présentation des données géographique	10
2.1. Mode Raster	10
2.2. Mode Vecteur	10

Deuxième chapitre : Cadre physique et méthodologie

I. CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	12
A. Contexte géographique	12

B. Contexte climatique et hydrologique	12
C. Contexte géologique et hydrogéologique	13
1. Aperçu géologique	13
2. Aperçu hydrogéologique	17
D. Occupation des sols en monts de Tlemcen	17
II. METHODOLOGIE DE L'ETUDE	18
A. Données disponibles	18
1. Données satellitaires	18
2. Données géo-scientifiques	18
2.1. Données cartographiques	18
2.2. Base de données des forages dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen	21
3. Données climatiques	21
B. Méthodes d'investigation	21
1. Traitement des données spatiales	22
1.1. Traitement d'imagerie Landsat	22
1.1.1. Présentation de l'outil ENVI (<i>Version 4.5</i>)	22
1.1.2. Méthodes standards	23
<i>a. Composition colorée</i>	23
<i>b. Analyse en composante principale classique</i>	23
1.1.3. Méthodes spécifiques	24
<i>a. Analyse en composante principale sélective</i>	24
<i>b. Transformation RVB-ITS</i>	25
<i>c. Rapports des bandes (Bands ratios)</i>	25
<i>d. Filtres</i>	25
1.2. Système d'information géographique (SIG)	25
1.2.1. Présentation de l'outil ARCGIS (<i>Version 10.8.1</i>)	25
1.2.2. Traitement des modèles numériques du terrain (MNT)	26
1.2.3. Méthodes d'interpolation spatiale	26
2. Méthode d'analyse multicritère	26
2.1. Principe	26
2.2. Définition des critères, pondération et agrégation des facteurs	27
2.2.1. Critère de disponibilité	27
2.2.2. Critère d'accessibilité	28
2.2.3. Critère d'exploitabilité	29
2.3. Validation des cartes thématiques : Analyse de l'incertitude	30

<p>Troisième chapitre : Cartographie des facies, des fractures & Analyses morphologiques et interprétations des écoulements souterrains</p>
--

I. CARTOGRAPHIE DES FACIES ET DES FRACTURES	32
A. Cartographie des facies	32
B. Cartographie des fractures	35
1. Issue de la carte géologique	35
2. Issue de la télédétection	36
3. Analyse globale des linéaments	37
II. ANALYSE MORPHOMETRIQUE	38

A. Relief	38
1. Carte altimétrique	38
2. Carte des pentes	38
B. Réseau hydrographique	39
1. Carte de drainage	39
2. Classification des talwegs	39
III. ECOULEMENTS SOUTERRAINS DANS LES AQUIFERES KARSTIQUES DES MONTS DE TLEMCEN	40
A. Cartes des écoulements souterrains	41
B. Carte des débits	43

Quatrième chapitre : Cartographie des potentialités des aquifères fissurés dans les monts de TLEMCEN

I. PREPARATION DES CARTES THEMATIQUES	44
A. Critère de disponibilité en eau	44
B. Critère d'accessibilité en eau	44
C. Critère d'exploitabilité en eau	45
II. RESULTAT ET VALIDATION	45
III. DISCUSION	47

CONCLUSIONS

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	51
------------------------------------	----

LISTE DES FIGURES & TABLEAUX

LISTE D'ANNEXE

AVANT- PROPOS

AVANT-PROPOS

Tout d'abord, je voudrais remercier **ALLAH** le Tout Puissant de m'avoir donné la volonté et le courage pour réaliser.

Je tiens à remercier Madame **Lamia MAHI-YEBDRI**, Maître Assistant (A) au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers (Université de Tlemcen), pour ses conseils, son aide et ses critiques.

Je veux remercier Monsieur **Lahsen Wahib KEBIR**, Ingénieur principal et sous-chef du département de Télédétection, au Centre des Techniques Spatiales – Arzew, pour avoir accepté d'assurer la direction de ce travail et pour ses conseils et toutes les prises en charge au sein du centre CTS.

Je remercie également, Monsieur **Abbas MAROK**, Professeur des Universités au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers (Université de Tlemcen), d'abord pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury, mais surtout pour tous ses conseils et sa disponibilité permanente pour la formation du Master Professionnel-GRP.

Un merci particulier à Madame **Fatiha HADJI**, Maîtres des conférences (B), Département des Sciences de la Terre et de l'Univers (Université de Tlemcen), de bien vouloir juger mon travail et apporter son avis. Aussi je la remercie pour ses nombreux encouragements et conseils.

Mes remerciements vont à l'égard du personnel qualifié du Centre des Techniques Spatiales – Arzew, à commencer par Monsieur le Directeur du centre : Monsieur **MAHI**, Monsieur **Abdelatif DEHNI**, Maître de recherche (A) et Madame **Nadjet BRAHMIA**, Maître de recherche (B) du département de géométrie, aussi Monsieur **Ahmed BENNIA**, Maître de recherche (B), Monsieur **Oussama BENABBOU**, Maître de recherche (B) du département de télédétection ainsi que Monsieur **Ali RAMI** du département de la géodésie.

Un grand merci à Monsieur **Kamar-Eddine BENSEFIA**, Maître des Conférences (B) au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers (Université de Tlemcen), pour son

apport supplémentaire dans notre travail. Je suis très reconnaissant aussi envers lui, pour son dévouement, sa disponibilité, et son soutien à tous les étudiants du Master Geo-Ressources Professionnel (GRP).

J'adresse mes remerciements à mes enseignants du département des sciences de la Terre et de l'univers : Messieurs Hakim **HEBIB**, **Abderlkader BOUCIF** , **Mustapha BENSALAH**, **Ali KACIMI**, **Mohamed ADACI**, et **Madame Salamet MAHBOUBI** pour m'avoir aidé chaque fois que j'en ai eu besoin.

Mes profonds remerciements aussi à mes amis (es) de ma promotion du Master GRP 2021-2022.

Une pensée affectueuse pour mon deuxième père **Bachir EDDINE nommé 23**, pour son engagement physique et moral qu'il m'apport au quotidien.

A mes amis **Mohamed EDDINE**, **Yehya CHELLOUFI**, **Mohamed Sid Ahmed MILOUD ABID** et **Bachir ANGADI**.

Enfin à la famille **KAMNI**, à commencer par leur fille **Samah**, merci de m'avoir toujours soutenu.



RESUME

Résumé

Le présent travail a été mené sur les aquifères karstiques des monts de Tlemcen (Nord-Ouest Algérien). Il s'agit d'une évaluation des potentialités hydriques souterraines par approche intégrée portant sur l'association des techniques de télédétection, des systèmes informatiques géographiques (SIG) et l'analyse décisionnelle multicritères appelée MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis).

Neuf paramètres ont été intégrés à savoir : la pente (%), l'infiltration efficace (mm), la densité de drainage (Km/km²), la densité de fracturation (km/km²), l'épaisseur d'altération (m), la profondeur total (m), l'indice de succès (%), le niveau statique (m), et le débit d'exploitation (m³ /h). ils sont classés en 3 critères : la disponibilité, l'accessibilité et l'exploitabilité en eau.

La zone d'étude a une disponibilité représentée par une valeur unique. Cette disponibilité pourrait être expliquée par des faibles pentes et des densités de fracturation élevées, paramètres susceptibles de favoriser la recharge des aquifères.

Les critères accessibilité et exploitabilité en eau sont dominés par les classes médiocre et bonne, couvrant 75% de la zone étudiée. Ces deux classes localisées au Nord-Est, sont caractérisées par des forages assez profonds (>98m) et des taux de succès assez élevés, révélant un débit d'exploitation fort, favorisant donc une exploitabilité des eaux souterraine.

Les zones très favorables pour l'implantation de forage se localisent à extrême Nord-Est, au tour de la commune de Ouled Mimoun et au Nord-Ouest de la ville de Tlemcen. Ces zones correspondent aux zones de décharge des aquifères avec des flux d'écoulements assez importants. Les zones à potentialité mauvaise se situent dans la région de Sebdou au sud des monts de Tlemcen, constituées d'alluvions ancienne et récente d'âge Quaternaire (Holocène).

Mots clés : Potentialités hydriques, SIG, Monts de Tlemcen, Karst, MCDA

ABSTRACT

Abstract

The present work was carried out on the karst aquifers of Tlemcen Mountains (North-West Algeria). This is an assessment of the underground water potential by an integrated approach involving the use of remote sensing techniques, geographic information systems (GIS) and multi-criteria decision analysis called MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis).

Nine parameters have been integrated, namely: slope (%), effective infiltration (mm), drainage density (Km/km²), fracturing density (km/km²), alteration thickness (m), Total depth (m), success index (%), static level (m), and operating flow rate (m³/h). They are classified into 3 criteria: availability, accessibility and water exploitability.

The study area has an availability represented by a unique value. This availability could be explained by low slopes and high fracturing densities, which are two parameters likely to favor the recharge of aquifers.

The accessibility criteria and water exploitability are dominated by mediocre and good classes, covering 75% of the studied area. These two classes located in the North-East, are characterized by fairly deep drilling (> 98m) and fairly high success rates, revealing a strong exploitation rate, thus favoring an exploitability of groundwater.

The very favorable areas for the drilling implantation are located in the extreme northeast, around Ouled Mimoun and Northwest of the city of Tlemcen. These areas correspond to the areas of discharge of aquifers with fairly large flow flows. However, the areas with poor potential are located in the Sebdoou region South of the Tlemcen Mountains, consisting of old and recent Quaternary-age alluvium (Holocene).

Key words: Water potential, GIS, Tlemcen Mountains, Karst, MCDA.

INTRODUCTION

Introduction

I. PROBLEMATIQUE

Les ressources en eau dans une région donnée peuvent être superficielles ou souterraines. Leur mobilisation est dépendante de trois facteurs indispensables à étudier, à savoir : la disponibilité, l'accessibilité et l'exploitabilité. Toutefois l'adaptation des techniques théoriques, pratiques ou même économique est imposée pour une meilleure gestion des ressources hydrique à court et à long terme.

Sachant que, les perturbations climatiques actuelles et le développement socio-économique entravent la stabilité des ressources aussi bien à l'échelle régionale que planétaire, ces dernières deviennent un fléau qui préoccupe la communauté scientifique internationale qui s'est investie dans les études relatives aux potentialités des ressources en eau en utilisant de multiples méthodes isolées ou intégrées.

Dans cette optique, l'approche intégrée a été tenté par l'association des techniques de télédétection, des systèmes informatiques géographiques SIG et l'analyse décisionnelle multicritères appelée MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) déjà utilisée dans des travaux antérieures (Georges et al. 1983 ; Ba et al. 2011 ; Youan Ta et al., 2011 ; Doumouya et al.2012 ; Hyann et al. 2015 ; Yao et al. 2016 ; Akkari, 2022 ; Masoud et al., 2022) .

II. OBJECTIFS

Dans la région de Tlemcen, la conjoncture climatique (Climat semi-Aride), et le développement socio-économique ont engendré un déficit des ressources en eau. Pour pallier à ce déficit les autorités locales avaient lancé des prospections des eaux souterraines à travers la région, y compris les monts de Tlemcen considéré comme un réservoir souterrain potentiel à l'exploitation (Bensaoula et al. 2005).

A cet effet, cette étude vise à adopter l'approche intégrée dans la cartographie des potentialités en eau souterraine dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen. Ceci, permettra d'abord de valider la faisabilité d'utilisation de cette approche surtout dans les milieux karstiques dans nos régions, ensuite localiser les zones d'implantation de forage hydrique à grande productivité.

III. STRUCTURE DU MEMOIRE

Le présent mémoire s'articulera autour de quatre (4) chapitres avec une introduction où la problématique et les objectifs du sujet sont exposés. Ces chapitres sont suivis par une conclusion.

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les connaissances des milieux karstiques, de la télédétection et des SIG ;
- Le second chapitre s'intéresse au cadre physique de l'étude, à savoir le contexte régional, les données utilisées et décrit aussi les méthodes appliquées pour l'interprétation des données ;
- Le troisième vise particulièrement la cartographie morphométrique, lithologique, structurale et hydrogéologique des monts de Tlemcen ;
- Le quatrième consiste à faire spatialisation des potentialités en eaux souterraines dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen.

Premier chapitre : **Synthèse bibliographique**

I. ETAT DE CONNAISSANCES DES AQUIFERES KARSTIQUES

A. Les milieux karstiques

1. Le karst

Le mot Karst est dérivé des termes « Carso » et « Kras » utilisés par la population slovène pour décrire le paysage de pierres typiques de la région du karst classique (la région autour de Trieste et les montagnes Dinariques de la Slovénie) (Gams, 1993 ; El Janyani, 2013).

Le karst est un système complexe très particulier, fortement hétérogène, sur une grande gamme d'échelles d'observation. Selon Bakalowicz (1979), le karst est un ensemble de formes de surface et souterraines résultant de la dissolution de roches carbonatées (calcaire, marbre, dolomie, craie) par les eaux souterraines rendues acides par le dioxyde de carbone (CO₂).

Le karst est l'objet d'étude de plusieurs disciplines telles que : la géomorphologie, la spéléologie et l'hydrogéologie.

L'approche hydrogéologique est basée sur l'évaluation des réserves en eau souterraine des massifs karstiques et l'appréhension de leur mode d'écoulement (Mangin, 1978 ; El Janyani, 2013). Elle considère le milieu karstique dans son ensemble comme un aquifère dont les vides, pénétrables ou non, contiennent de l'eau susceptible d'être utilisée, en particulier pour l'alimentation en eau potable.

2. La karstification

La karstification est un processus d'altération chimique et d'érosion mécanique (abrasion) qui permet la formation de vides karstiques (grottes, avens, lapiaz...) connectés et hiérarchisés en constituant une unité de drainage karstique au sein de la roche originelle (El Janyani, 2013).

Les roches concernées sont celles qui pourront être dissoutes directement par l'eau de pluie et surtout celles qui peuvent être dissoutes par l'eau infiltrée à travers le sol, ce qui, en climat tempéré, regroupe principalement l'ensemble des formations carbonatées (calcaires et dolomies). La solubilité de ces roches carbonatées explique l'évolution superficielle et souterraine du paysage karstique. Il est admis que c'est le dioxyde de carbone (CO₂) dissous dans l'eau qui est l'agent principal quant à l'attaque chimique des calcaires, même si bien d'autres acides interviennent, fournis par les plantes (acide humique, fulvique, nitrique, etc.) et les éléments issus des sols (Bakalowicz, 1979 ; El Janyani, 2013).

B. Les aquifères karstiques

Ce sont des aquifères particuliers et singuliers du fait de leur genèse, leur structure et leur fonctionnement. Les dimensions de leurs vides présentent une très grande variabilité, depuis les fissures micrométriques à millimétriques jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres de section et longs de plusieurs kilomètres. Il en résulte des vitesses d'écoulement à

l'intérieur de l'aquifère très variables, allant de moins de quelques centimètres par heure à plusieurs centaines de mètres par heure. Ces circulations souterraines très rapides sont l'une des principales caractéristiques hydrogéologiques des aquifères karstiques (BRGM, 2022).

1. Description

La description de ces aquifères repose sur deux modèles : les modèles "globaux" et les modèles déterministes. Les premiers considèrent l'aquifère comme une "**boîte noire**" dont on étudie le comportement par des fonctions mathématiques. Ils ne font pas intervenir les processus physiques de l'écoulement et du transport, et donnent, par conséquent, peu d'information sur le fonctionnement à l'intérieur de l'aquifère. Ces modèles sont fréquemment appliqués en hydrologie.

Alors que les modèles déterministes tiennent compte du mécanisme physique de chaque phénomène reconnu dans les aquifères (hydraulique et transport). Ils permettent de tester l'effet sur les réponses de l'aquifère de certaines hypothèses sur sa structure ; ils forcent ainsi, l'hydrogéologue à faire des hypothèses sur la structure tridimensionnelle de l'aquifère (El Janyani, 2013).

2. Structure et fonctionnement

La structure interne d'un aquifère karstique se divise en trois entités distinctes, au sein desquelles, l'écoulement est structuré de manière différente depuis la surface vers l'aquifère (Figure 1).

- *La zone épikarstique* : Est la partie la plus proche de la surface. Cette zone altérée, épaisse de quelques mètres à quelques dizaines de mètres, constitue un milieu à porosité et à perméabilité importante (5 à 10 %) (BRGM, 2022).

Au moment des pluies, cette zone rassemble l'eau d'infiltration dans une nappe perchée locale et discontinue, drainée vers le bas, soit par les vides les plus larges en un ruissellement souterrain rapide, soit par les vides de petites dimensions, en une infiltration lente écoulant un mélange d'air et d'eau. Elle est donc le siège d'un stockage temporaire des écoulements, et constitue un aquifère perché épikarstique où les écoulements horizontaux sont prépondérants. C'est la zone où agit la végétation et où se développent les dépressions et les fentes dans la roche.

Les lapiaz et les dolines font partie de cette zone . Elles permettent l'infiltration de l'eau de pluie ou de ruissellement qui sera stockée de manière temporaire ou qui court-circuitera cette zone aquifère pour rejoindre la zone noyée via des conduits verticaux (BRGM, 2022).

- *La zone d'infiltration* : constituée par la partie non saturée de l'aquifère où des écoulements lents prennent place dans les fines fissures et des écoulements rapides au niveau de conduits verticaux plus ou moins connectés au réseau de conduits karstiques de la zone noyée.

- *La zone noyée* : correspond à la zone de stockage des eaux. Elle se développe principalement à l'aval, sans nécessairement s'étendre à l'ensemble d'un massif. Il faut y distinguer les drains (dont certains peuvent être assimilés à des rivières souterraines) qui assurent la fonction transmissive de l'aquifère, et les « systèmes annexes au drainage », situés dans la partie amont, de part et d'autre des drains et qui assurent la fonction capacitive ou de stockage. La porosité peut ici atteindre 15 %.

Les deux fonctions classiques d'écoulement souterrain dans les aquifères karstiques sont :

La fonction de drainage qui est assurée par un réseau de conduits hiérarchisés ; et la fonction de stockage qui est fournie soit par les parties micro-fissurées ou poreuses de la roche encaissante, soit par des cavités karstiques, parfois de grandes dimensions, connectées au drainage par des zones à fortes pertes de charge (El Janyani, 2013).

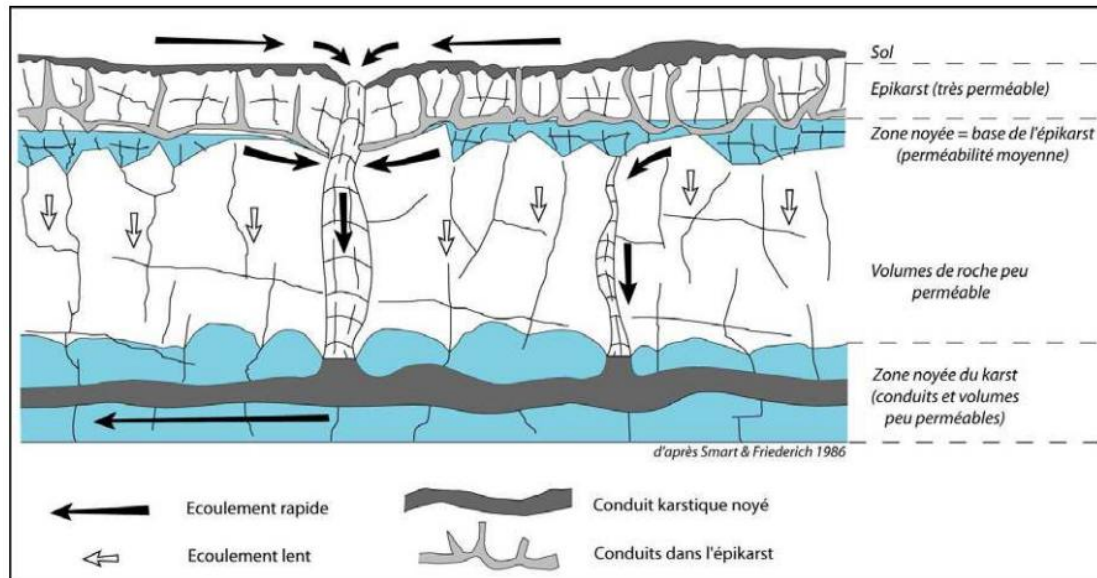
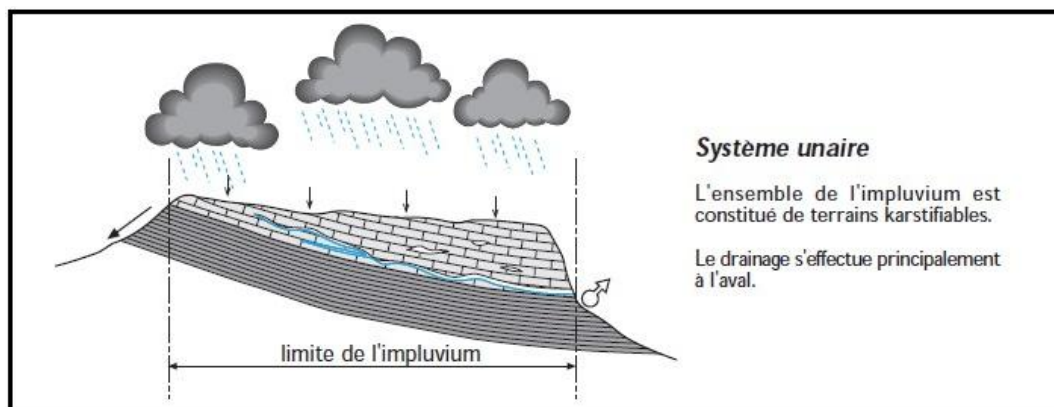


Figure 1: Les différents compartiments hydrauliques d'un aquifère karstique (D'après Smart et Friedrich, 1986 *in* El Janyani, 2013).

3. Modalités d'infiltration

En fonction des modalités d'infiltration dite aussi modalité d'arrivée des eaux de recharge, il est possible de distinguer deux types de systèmes karstiques (Figure 2) :

- *Les systèmes karstiques unaires* : Le système est entièrement alimenté dans les calcaires (système karstique = aquifère karstique) ;
- Les systèmes karstiques binaires : L'aquifère karstique est alimenté en partie non négligeable par du ruissellement de surface, c-à-d : système karstique = aquifère karstique + bassin de surface drainé par des pertes.



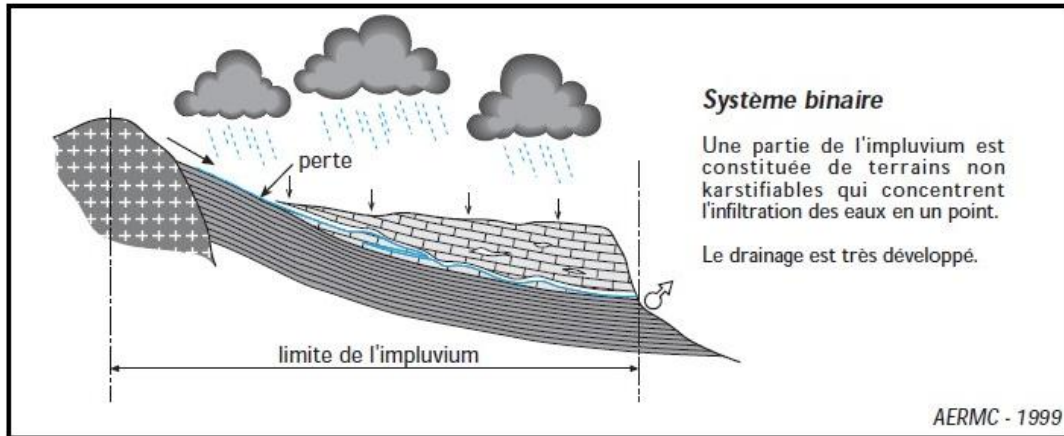


Figure 2: Les deux types de systèmes karstiques (BRGM, 2022).

4. Géomorphologie des aquifères karstiques

Les aquifères karstiques sont caractérisés par des phénomènes géomorphologiques particuliers tels que l'existence de grandes sources localisées, de pertes, l'absence de drainage superficiel, l'existence de dolines, poljés, vallées sèches, lapiés et enfin l'existence d'un réseau karstique mis en évidence par les explorations spéléologiques (Figure 3) (Jeannin, 1996 ; El Janyani, 2013).

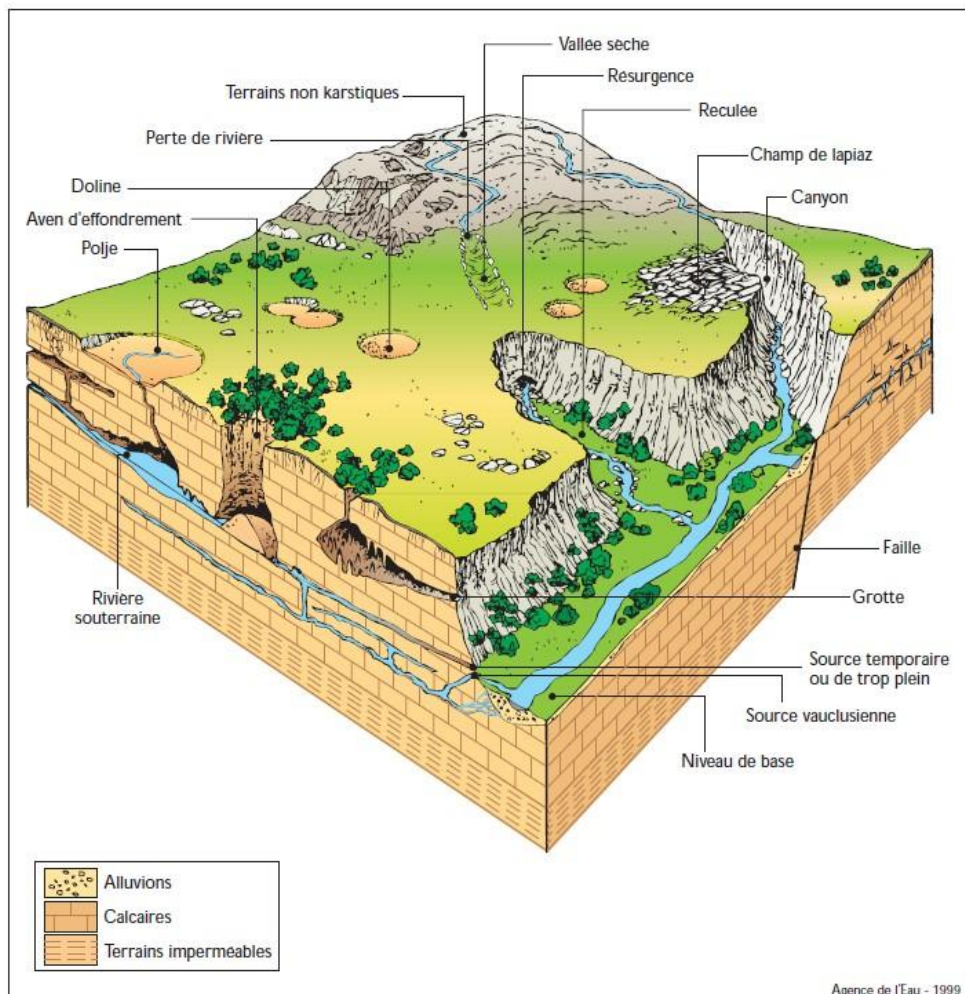


Figure 3: Schéma représentant un paysage karstique (BRGM, 2022).

II. TELEDETECTION ET SIG

A. Généralités sur la télédétection

1. Principes de base de la télédétection

Selon Garba (2012) la télédétection fait référence à la méthode scientifique et technologique d'identification, de mesure et d'analyse des attributs physiques des objets d'intérêt sans aucun contact direct.

1.1. Rayonnement et spectre électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est une forme d'énergie omniprésente qui nous entoure partout. Il revêt divers modèles tels que les ondes radio, les rayons X et rayons gamma, ainsi que la lumière du soleil (Coulibaly 1996).

Ce rayonnement provient principalement du soleil, sa lumière fournit la principale source d'éclairage sur Terre. La lumière visible, qui ne forme qu'une fraction du spectre électromagnétique, contient une gamme variée de longueurs d'onde. D'autres types de rayonnement, notamment les ultraviolets, les infrarouges et les micro-ondes courtes, sont invisibles à l'œil nu (Figure 4).

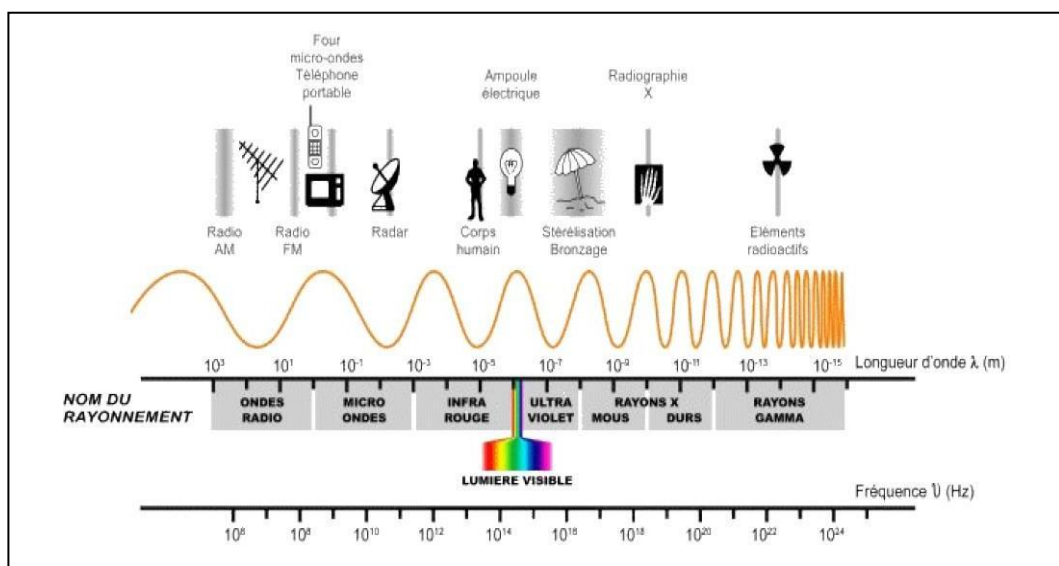


Figure 4 : Rayonnement et spectre électromagnétiques (Lillesans et Kiefer, 2000).

1.2. Signature spectrale

Dans le processus de déplacement d'une onde électromagnétique à travers un milieu, la nature de la matière et sa fréquence déterminent les interactions. L'absorption résonnante prévaut en tant que mécanisme principal, les atomes du milieu réémettent le rayonnement absorbé. Cette interaction énergétique provoque une signature spectrale, qui sert d'identification à l'entité (Pebay-Peyroulay 2012)

Par exemple (Figure 5), la quantité d'énergie réfléchiée par l'eau est faible par rapport aux plantes et au sol. Les plantes réfléchissent 50 %, le sol 30-40 %, tandis que l'eau réfléchit environ 10 %. Aussi, les signatures spectrales ne sont guère les mêmes selon les régions et les saisons de l'année.

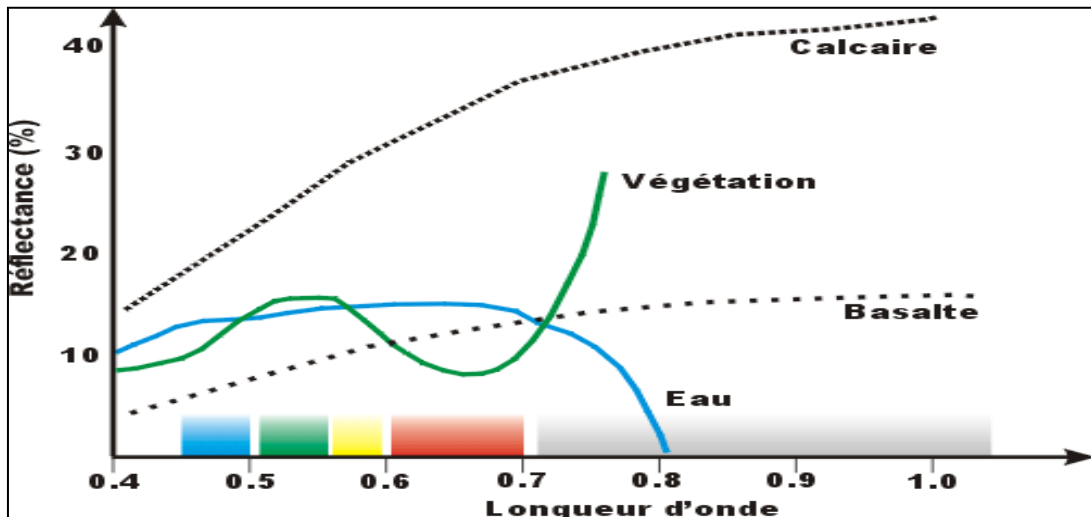


Figure 5: Signature spectrale de quelques éléments

2. Processus de la télédétection

Le processus de la télédétection nécessite sept étapes, énumérées comme suit (Figure 6)

:

- *Source d'énergie ou d'illumination (A)*: la première exigence pour la télédétection est d'avoir une source d'énergie qui illumine ou fournit de l'énergie électromagnétique à la cible d'intérêt.
- *Rayonnement et atmosphère (B)*: lorsque l'énergie se déplace de sa source à la cible, elle entre en contact et interagit avec l'atmosphère qu'elle traverse. Cette interaction peut avoir lieu une deuxième fois 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)* : un capteur est nécessaire (à distance, pas en contact avec la cible) pour collecter et enregistrer le rayonnement électromagnétique après que l'énergie a été diffusée ou émise par la cible.
- *Transmission, réception et traitement (E)*: l'énergie enregistrée par le capteur doit être transmise, souvent sous forme électronique, à une station de réception où les données sont traitées par un logiciel informatique en images (photographiques et / ou numériques).
- *Interprétation et analyse (F)*: l'image traitée est interprétée, visuellement et / ou numériquement ou électroniquement, pour extraire des informations désirées obtenues sur la cible.
- *Application (G)*: le dernier élément du processus de télédétection étant atteint l'application des informations extraites (Les données) de l'imagerie sur la cible, révèlent de nouvelles informations ou aident à résoudre un problème spécifique.

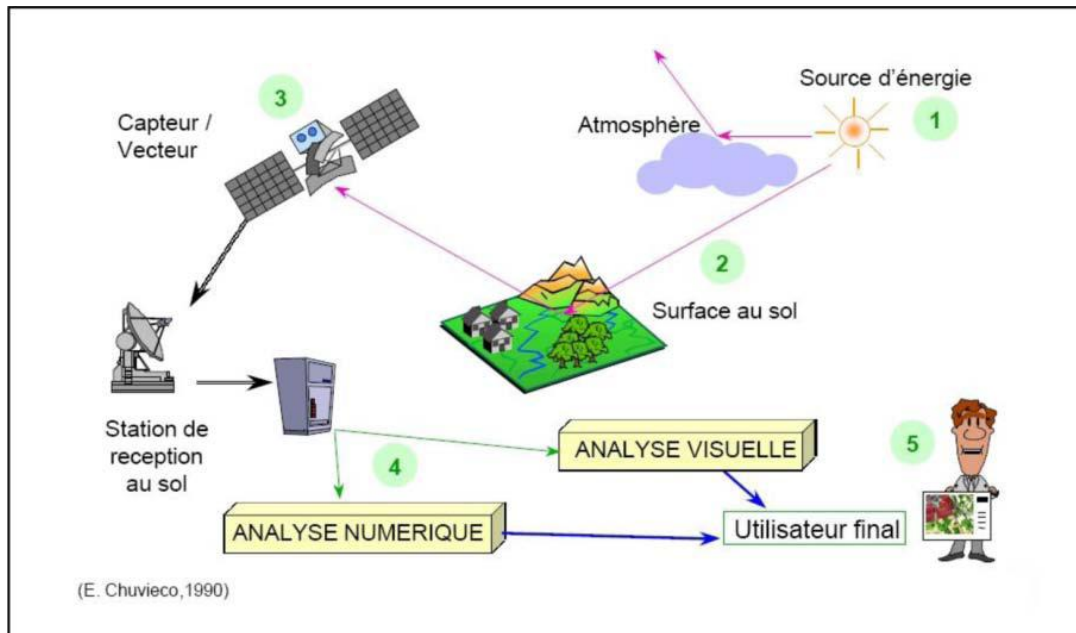


Figure 6 : Différentes étapes de la télédétection (Chuvico 1990).

3. Caractéristiques du capteur Landsat 8 ETM+

Landsat 8 est le dernier satellite de sa famille. Il a été lancé en février 2013 (www.nasa.gov). Ses scènes se caractérisent par une haute résolution de grande taille (185 km * 185 km), couvrant 11 bandes spectrales résumées sur le tableau 1 :

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

Bandes	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 7 : SWIR 2	30	22.11-2.29
Bande 8 : Panchromatique	15	0.50-0.68
Bande 9 : Cirrus	30	1.36-1.38
Bande 10 : Infrarouge thermique 1	100*(30)	10.60-11.19
Bande 11 : Infrarouge thermique 2	100*(30)	11.50-12.51

4. Application de la télédétection en hydrogéologie

L'imagerie de télédétection a de nombreuses applications dans les domaines géologiques : la cartographie des dépôts de surface, lithologique, structurale, l'exploration et exploitation des agrégats (sable et gravier), l'exploration minière, l'exploration pétrolière ainsi que la géologie environnementale. De plus, les contrastes géomorphologiques et lithologiques ont élargi les analyses de la télédétection dans l'optique de son apport à la conception de projet en domaine d'hydrogéologie surtout pour les milieux fissurés (Georges et al. 1983).

B. Systèmes d'Information Géographique (SIG)

Les systèmes d'information géographique sont des intégrations entre la collecte, l'enregistrement, le traitement et l'analyse des données pour arriver à des informations utilisables (Ghibeche, 2011).

1. Composantes 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 (Figure 7).



Figure 7 : Composantes du SIG (Bouadoud et al., 2013).

2. Mode de présentation des données géographiques

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 (Ghibeche, 2011).

2.1. Mode Raster

Le mode raster ou mosaïque correspond au découpage spatial usuel sous forme de cellules (pixels) ou de carrés (Figure 8).

2.2. Mode Vecteur

Un système vectoriel qui affiche des données graphiques sous forme de points, de lignes, de courbes ou de surfaces (aire) avec des attributs (Figure 8).

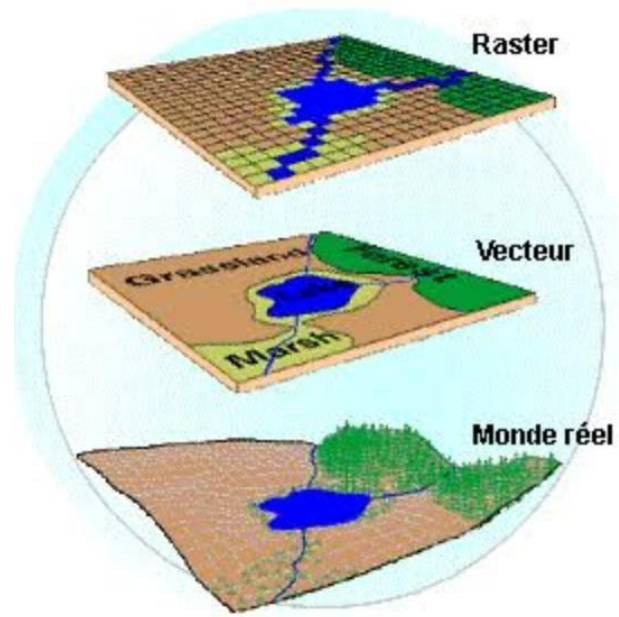


Figure 8: Types des formats d'images d'un SIG (Ghabeche, 2011)

Deuxième chapitre : **Cadre physique et méthodologie**

Deuxième chapitre : **Cadre physique et méthodologie**

I. CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

Les Monts de Tlemcen constituent le massif carbonaté karstifié le plus étendu du Nord-Ouest algérien, après celui des Monts de Saïda (Lasгаа 2012). D'après les travaux de Gevin (1952) et ceux de Gautier (1952), les premiers indices de sa karstification ont été mis en évidence en 1880 lors des premiers travaux de terrassement du barrage du Meffrouch (situé à 8 km au sud de Tlemcen) où l'on vit la première crue de septembre s'engouffrer et disparaître dans les fouilles ouvertes du barrage. Ce projet fut abandonné et ne put être repris qu'en 1946. Aussi, des observations analogues ont été faites lors des travaux de réalisation du barrage des Beni Bahdel, situé à 30 km au Sud-Ouest de Tlemcen (Lasгаа 2012).

A. Contexte géographique

Faisant partie de l'Atlas tellien occidental, les Monts de Tlemcen (ss) correspondent à un vaste horst de direction NE-SW. Ils sont enclavés sur quatre côtés (Figure 9). Au nord, elles sont bordées par le sillon miocène qui comprend les plaines de Maghnia, Hennaya et Sidi Bel Abbès. Les Hautes Plaines d'Oran s'étendent au Sud, tandis que les Monts de Daïa montent la garde à l'Est. Enfin, à l'Ouest, le Horst de Rhar Roubane complète l'enceinte (Marok, 1996).

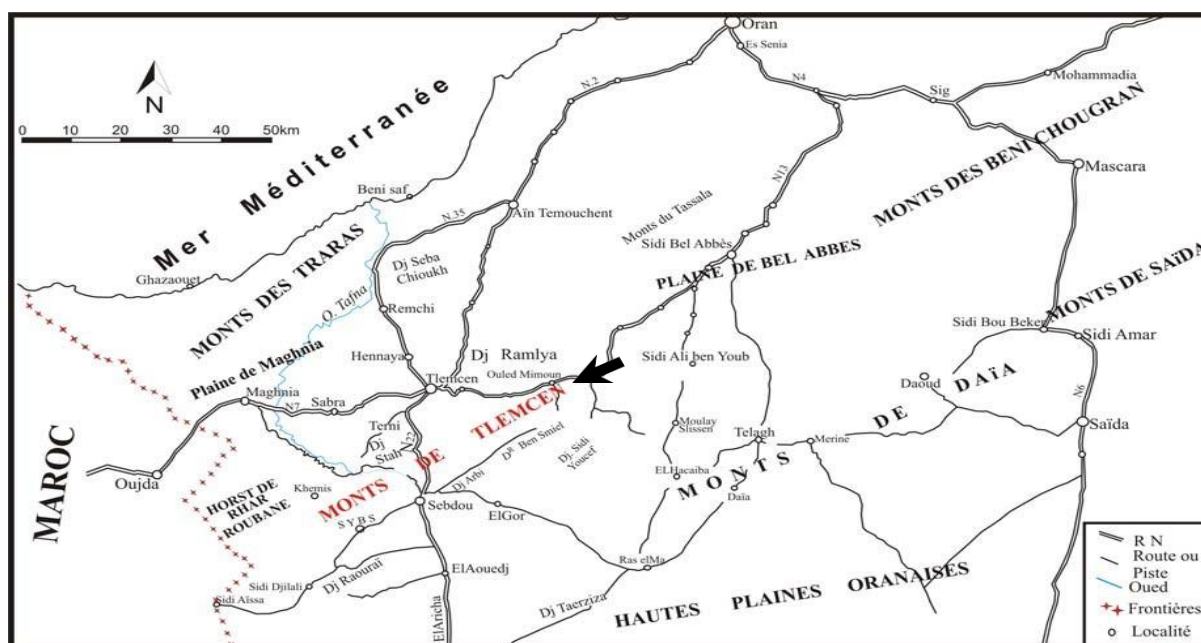


Figure 9. Situation générale des Monts de Tlemcen (s.s) (D'après Benest, 1985).

B. Contexte climatique et hydrologique

La région de Tlemcen jouit d'un régime climatique complexe marqué, à la fois, par le climat méditerranéen caractérisé par une saison pluvieuse et un été sec, et un climat montagneux avec des avancées sahariennes (Ablaoui, 2007).

Le second cours d'eau de l'Oranie appelé "Oued Tafna " prend naissance dans les hauteurs des monts de Tlemcen, au niveau de Ghar boumaaza, dans la région de Sebdo, ce cours d'eau d'une longueur de 170 km débouche en mer méditerranée, au niveau de la plage de Rachgoune (Figure 10). Ainsi, il draine son bassin versant à relief de petites et moyennes montagnes au sud par les monts de Tlemcen par plusieurs affluents tels que : oued Sebdo, oued Khemis, oued Nacheff, et oued Chouly (Yebdri, 2023).

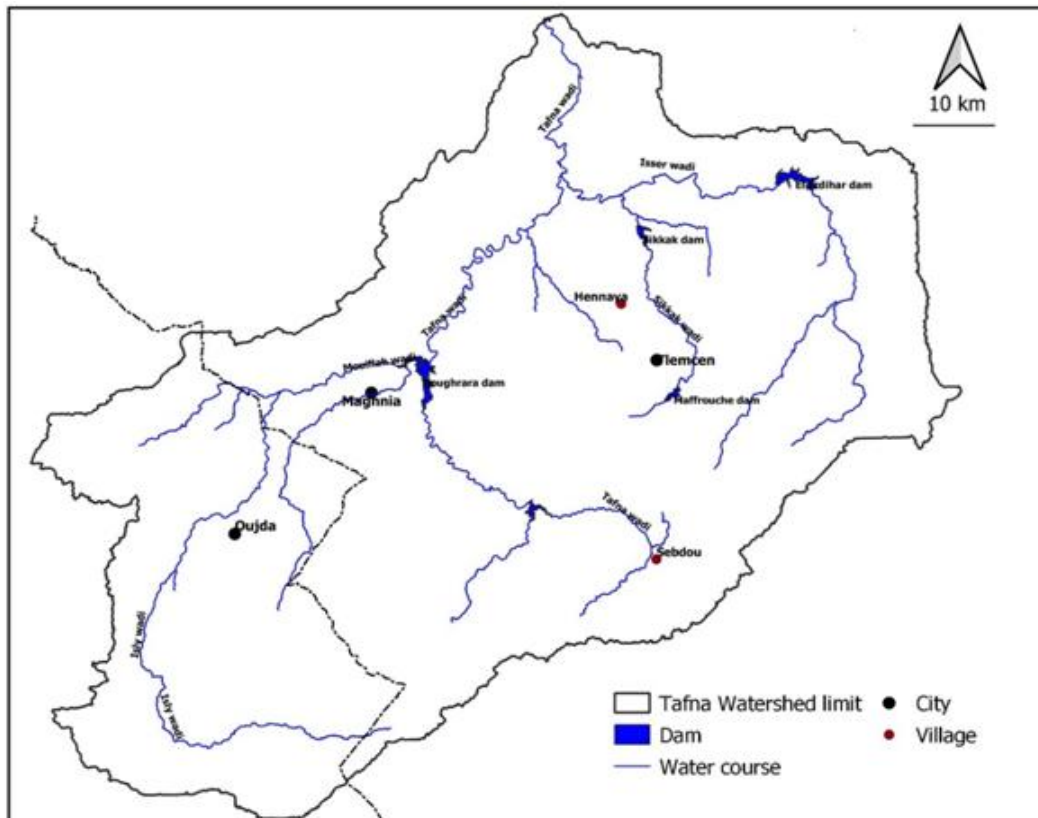


Figure 10. Réseau hydrographique du bassin versant de la Tafna (Yebdri, 2023).

C. Contexte géologique et hydrogéologique

1. Aperçu géologique

Au plan structural, la structure des Monts de Tlemcen correspond à trois principaux segments limités par la transversale de Tafna-Magoura à l'Ouest et celle d'Aïn Tellout à l'Est (Elmi, 1970 et Benest, 1971, 1982, 1985). Les segments en question sont souvent décalés suite au décrochement sénestre. Il s'agit de l'Ouest vers l'Est (Figure 11):

-la zone sigmoïde de Sidi Yahia-Sebdo;

-le panneau central arqué de Terni qui est nettement décroché vers le Nord-Ouest, le long de la faille bordière orientale du fossé de la Tafna ;

-le bloc sigmoïde de Lamoricière (Ouled Mimoun) qui est coincé entre la transversale N20° à rejeu sénestre d'Oued Chouly et la faille d'Aïn Tellout. Localement, les Monts de Tlemcen présentent également un double déversement résultant d'un serrage entre le môle rigide des Hautes Plaines oranaises et le Horst de Rhar Roubane.

D'après Benest (1982), l'évolution chronologique des événements structuraux enregistrés dans les Monts de Tlemcen se résume dans cinq phases tectoniques principales allant de l'Eocrétacé aux périodes récentes. Il s'agit :

- une phase éocrétacé ;
- une phase atlasique (liée à des mouvements compressifs et distensifs) ;
- une phase de compression N-S à NW-SE avec un paroxysme miocène probable
- une phase à dominante distensive : marquée essentiellement par la régression pliocène dans la zone de Terni).
- une phase récente dite plio – quaternaire : qui s'est traduite par des mouvements soit compressifs, soit distensifs.

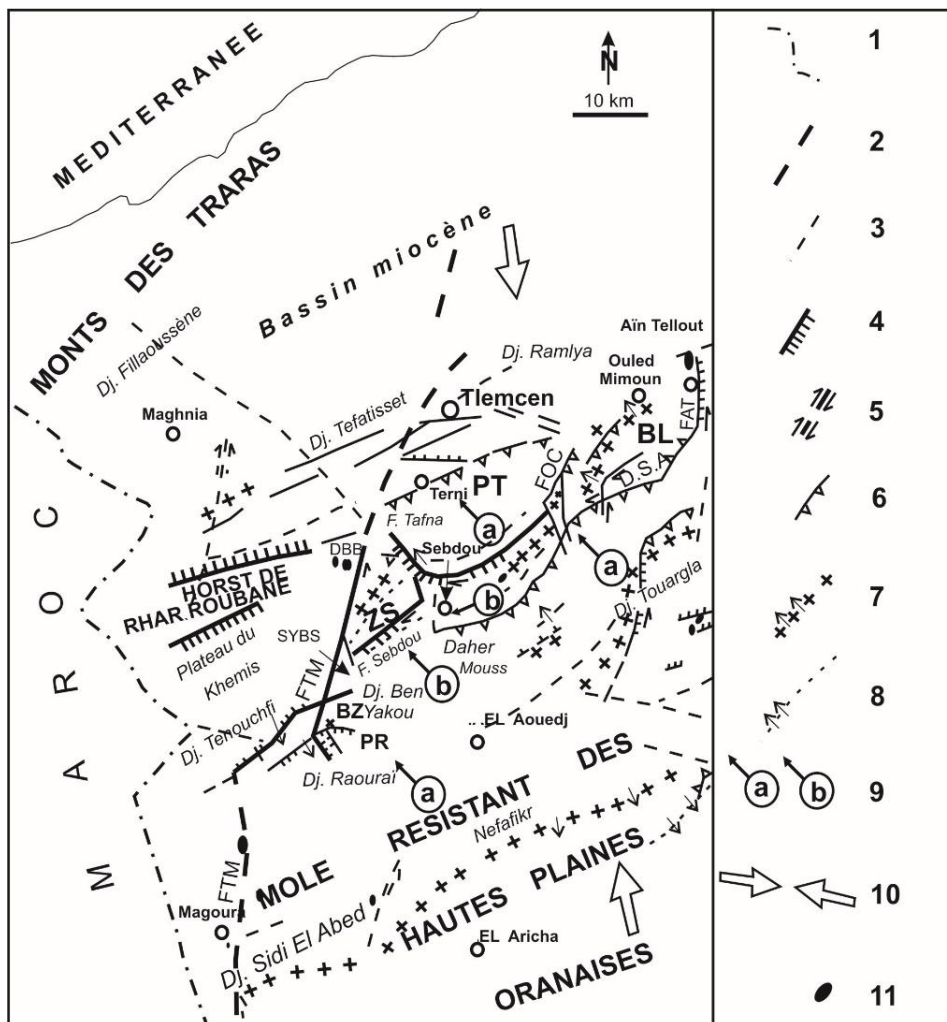


Figure 11. Carte structurale des Monts de Tlemcen au sens large (d'après BENEST, 1982).

1: Frontière algéro-marocaine; 2: Faille majeure; 3: Faille mineure; 4: Faille normale ayant joué verticalement; 5: Sens de décrochement; 6: Faille inverse ou chevauchante; 7: Anticlinal (les flèches indiquent la vergence); 8: Synclinal (les flèches indiquent la vergence); 9: Sens des principaux chevauchements ou déplacements (premier temps a et deuxième temps b); 10: Direction moyenne de compression ou de raccourcissement; 11: Extrusion gypsifère à faciès Keuper; **BL**: Bloc sigmoïde de Lamoricière; **BZ**: Djebel Bou Zatatt; **DBB**: Dépression des Beni Bahdel; **DSA**: Dépression de Sidi Abdallah; **FAT**: Décrochement d'Aïn Tellout; **FOC**: Transversale

d'Oued Chouly; **FTM**: Transversale Tafna-Magoura; **PR**: Panneau coulissé du Djebel Raouraïa; **PT**: Panneau central arqué de Terni; **SBYS**: Sidi Yahia Ben Sefia; **ZS**: Zone sigmoïde de Sidi Yahia.

Au plan lithostratigraphique, les formations mésozoïques occupent l'essentiel des Monts de Tlemcen au sens large (Figure 12). La succession lithostratigraphique type donné par Benest (1985) et Benest et *al.* (1999), présente des variations spectaculaires des faciès et des épaisseurs. Elle est considérée de bas en haut (Figure 13) :

- *Le Trias*

Les dépôts attribués classiquement au Trias sont représentés par des faciès argileux violacés, à verdâtres, riche en gypse et halite et associés parfois à des roches doléritiques dans lesquelles s'intercalent des niveaux carbonatés. D'après les travaux antérieurs (Marok, 1996; Bensefia, 2021), ces dépôts sont généralement localisés le long des zones de faiblesse et/ou le long des grands accidents, à l'exemple du diapir de Beni Bahdel.

- *Le Jurassique*

Alors que le Jurassique inférieur et moyen affleure dans les Monts de Rhar Roubane (partie occidentale des Monts de Tlemcen) et présente des variations spatiotemporelles des faciès, le Jurassique supérieur domine les affleurements dans les Monts de Tlemcen au sens strict (Figure 12).

Dans la succession lithostratigraphique donnée par Benest (1985) et Benest & *al.* (1999), Elle est de bas en haut :

- *les Argiles de Saïda* (Callovien-Oxfordien)(Epaisseur moyenne = 200 m): il s'agit d'une alternance argilo-gréseuse à intercalations de bancs de calcaires;

- *les Grès de Bou Médine* (Oxfordien supérieur-Kimméridgien supérieur *p.p.*)(Epaisseur moyenne = 300 m): c'est une alternance argilo-gréseuse à prédominance de grès. Ces derniers se distinguent par la présence des litages obliques ou entrecoupés ;

- *les Calcaires de Zarifet* (Kimméridgien supérieur)(Epaisseur moyenne = 100 m): ce sont essentiellement des calcaires dolomitiques renfermant quelques fossiles.

- *les Dolomies de Tlemcen* (Kimméridgien terminal)(Epaisseur moyenne = 200 m): suivie localement par la formation des « *Calcaires de Stah* », cette formation se distingue par son faciès essentiellement dolomitique.

- *les Marno-calcaires de Raouraï* (Tithonien basal) (Epaisseur moyenne = 60 m): ce sont des marnes passant latéralement à des marno-calcaires à intercalation de bancs de grès (Formation des *marno-calcaires de Hassi Haddou*). On les recontrent particulièrement sur le plateau de Terni, dans le Djebel Lato et à l'Est d'Aïn Fezza;

- *les Calcaires de Lato* (Tithonien inférieur) (Epaisseur moyenne = 50 m): il s'agit essentiellement de calcaires micritiques parfois dolomitiques et oolithiques;

- *les Dolomies de Terni* (Tithonien inférieur) (Epaisseur moyenne = 50 m): cette formation dolomitique est bien exposée sur le plateau de Terni et près du barrage Meffrouch. Elle se caractérise à sa base par la présence des bancs de calcaires à silex et parfois de calcaires oolithiques.

- *les Marno-calcaires de Hariga* (Tithonien supérieur) (Epaisseur = 165 m au Djebel Hariga d'El Gor): c'est une alternance de calcaires et de marnes qui passe latéralement à des calcaires dolomitiques;

- *les Marno-calcaires d'Ouled Mimoun* (Tithonien supérieur à Berriasien basal)(Epaisseur moyenne = 250 à 300 m): il s'agit d'une alternance d'argiles, de grès et de

calcaires lumachelliques « *Grès de Merchiche* » passant vers le haut à des calcaires oolithiques, parfois dolomitiques. Son extension latérale va du d'Ouled Mimoun jusqu'à la bordure nord du fossé de Sebdoou.

-Le Crétacé inférieur (= Néocomien)

Cet intervalle chronologique comprend dans l'ordre ascendant, les formations géologiques suivantes (Figure 12):

- *les Argiles de Lamoricière* (Berriasien moyen à Valanginien)(Epaisseur maximale = 225 m à El Rhoraf): c'est un ensemble argilo-gréseuse admettant à la base des intercalations de grès et de calcaires et au sommet des niveaux de calcaires. Cet ensemble passe latéralement à un faciès gréseux, plus épais « *Grès de Hassi Zerga* »;

- *les Grès de Berthelot* (Hauterivien)(Epaisseur moyenne = 150 m): il s'agit d'une alternance de grès et d'argiles. On distingue çà et là la présence des bancs carbonatés. Dans la région de Sebdoou, cette formation se termine par des calcaires d'âge Barrémien supérieur à Aptien « *Calcaires de Zyguine* ».

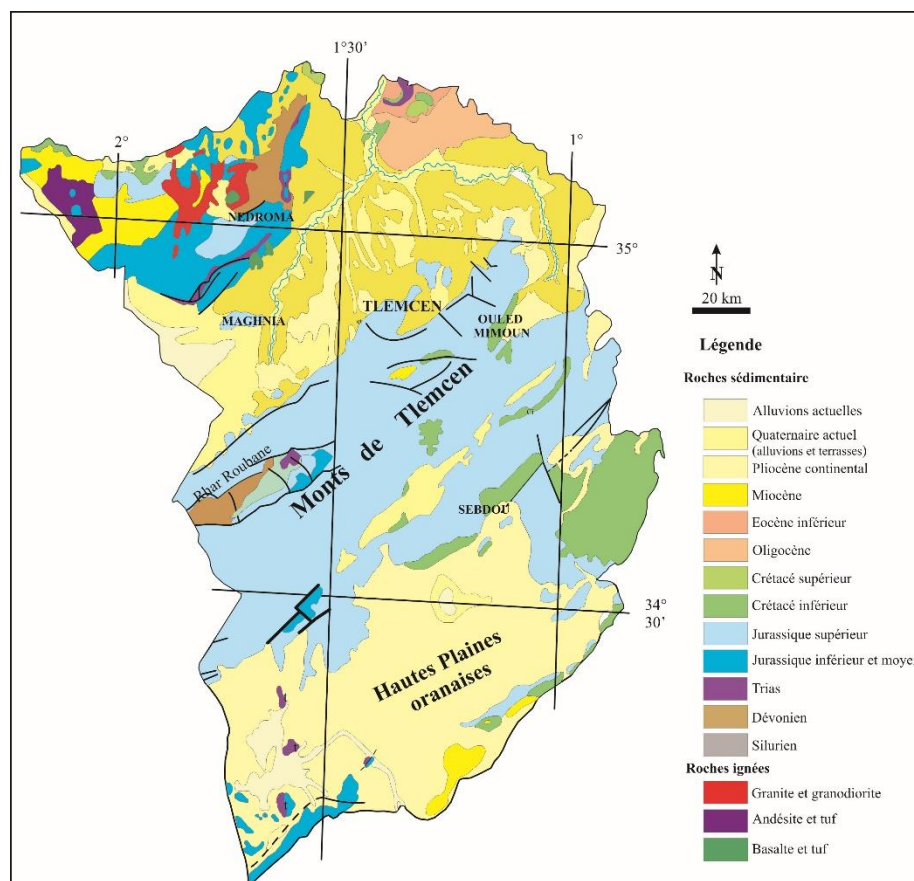


Figure 12. Carte géologique de Tlemcen (Extrait de la carte géologique de l'Algérie-Oran Nord au 1/500 000, modifiée) (in Yebdri, 2023).

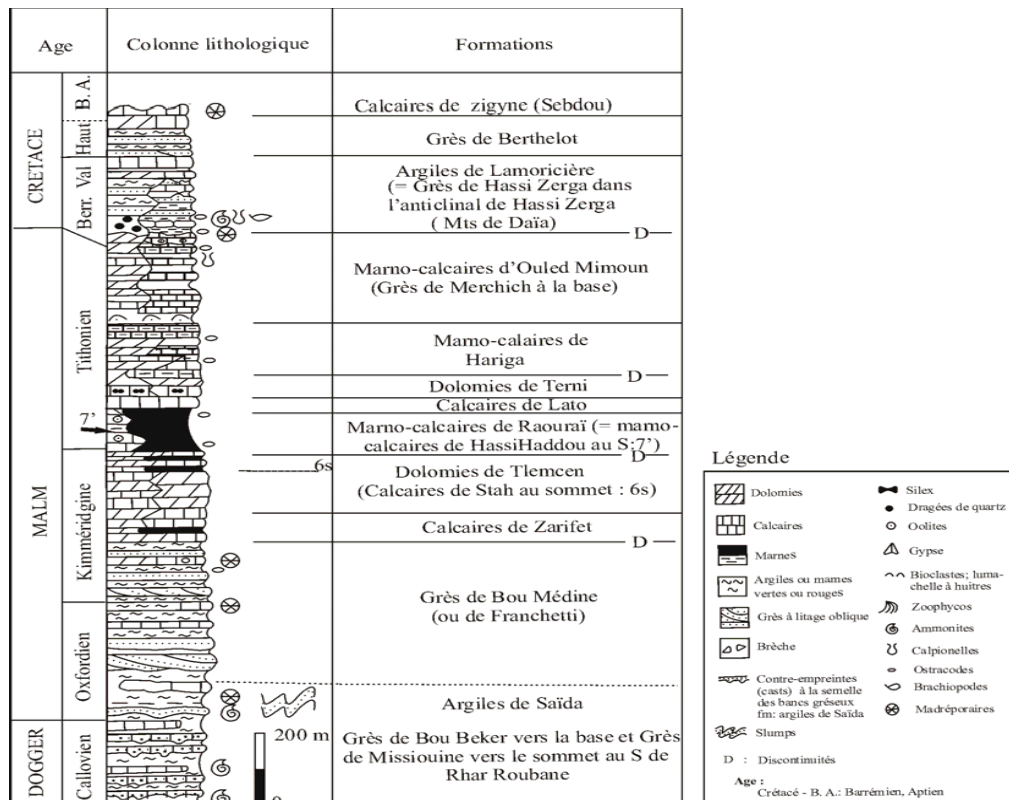


Figure 13. Série lithostratigraphique type des Monts de Tlemcen (s.l.) (D'après Benest et al., 1999).

2. Aperçu hydrogéologique

Dans ses travaux Collignon (1984,1986) avait décrit les principales formations géologiques perméables qui sont reconnues comme des aquifères potentiels. Il s'agit de :

-*Formations à fort potentiel aquifère* : constituées de Dolomies de Tlemcen, dolomies de Terni, grès de Merchiche, avec à leur base les calcaires de Zarifet. Ainsi que les formations d'âge Plio-Quaternaire constituées dans alluvions récents formés le long des oueds, les terrasses, croûtes calcaires du Quaternaire ancien et les conglomérats qui comblent le fossé de Sebdou. Ces formations présentent une lithologie favorable sur le plan hydrogéologique et se caractérisent par une forte capacité de rétention de l'eau.

-*Formations à faible potentiel aquifère* : elles regroupent des formations de nature lithologique variée où les séries à dominance argileuse ou marneuse occupent une place prépondérante, il s'agit des grès de Boumédien, les marno-calcaires de Raourai, Hariga et d'Ouled Mimoun, ainsi que les argiles de Lamoricière. Ces formations présentent une faible perméabilité d'interstices ou de fissures, donc il n'y existe pas d'aquifères notables.

D. Occupation du sol

Sur le plan occupation du sol, les monts de Tlemcen sont marqués par la présence d'une végétation naturelle tels que les forêts et maquis. Dans la zone montagneuse sud, au-dessus de 1200 m d'altitude, la majeure partie des terrains est occupée par une forêt de Chêne vert et de Pin d'Alep. Le Chêne liège se rencontre sur des terrains riches en silice qui caractérisent la forêt d'Ahfir. Au-dessous de 1200 m, il existe une association d'Oxycèdre, quelques vestiges de Chêne vert, de Palmier nain et de Tuya. A noter que les terrasses et le

fond des vallées des ruisseaux et oueds sont occupés par des terrains cultivés et les pentes sont couvertes de garrigues (Taleb, 2004).

II. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

A. Données disponibles

Afin de répondre aux objectifs souhaités, plusieurs données de la région considérée ont été utilisées, il s'agit des données satellitaires, géoscientifiques, et climatiques :

1. Données satellitaires

Ce sont les données spatiales qui sont à notre disposition et qui seront par la suite traitées avec différentes méthodes.

Il s'agit d'abord de l'image satellitaire du Nord-Ouest Algérien générée à partir de la scène Landsat8 – ETM+, acquise le 13/01/2023 (Path : 198 ; Row : 36) (Figure 14,A), téléchargeable du site de la NASA (<https://earthexplorer.usgs.gov>), ainsi que le modèle numérique de terrain (MNT) avec des résolutions de 30m, issu de la base de données (*The Shuttle Radar Topography Mission-USGS-EROS*), téléchargeable sous le logiciel Global Mapper 22.0 (Figure 14,B).

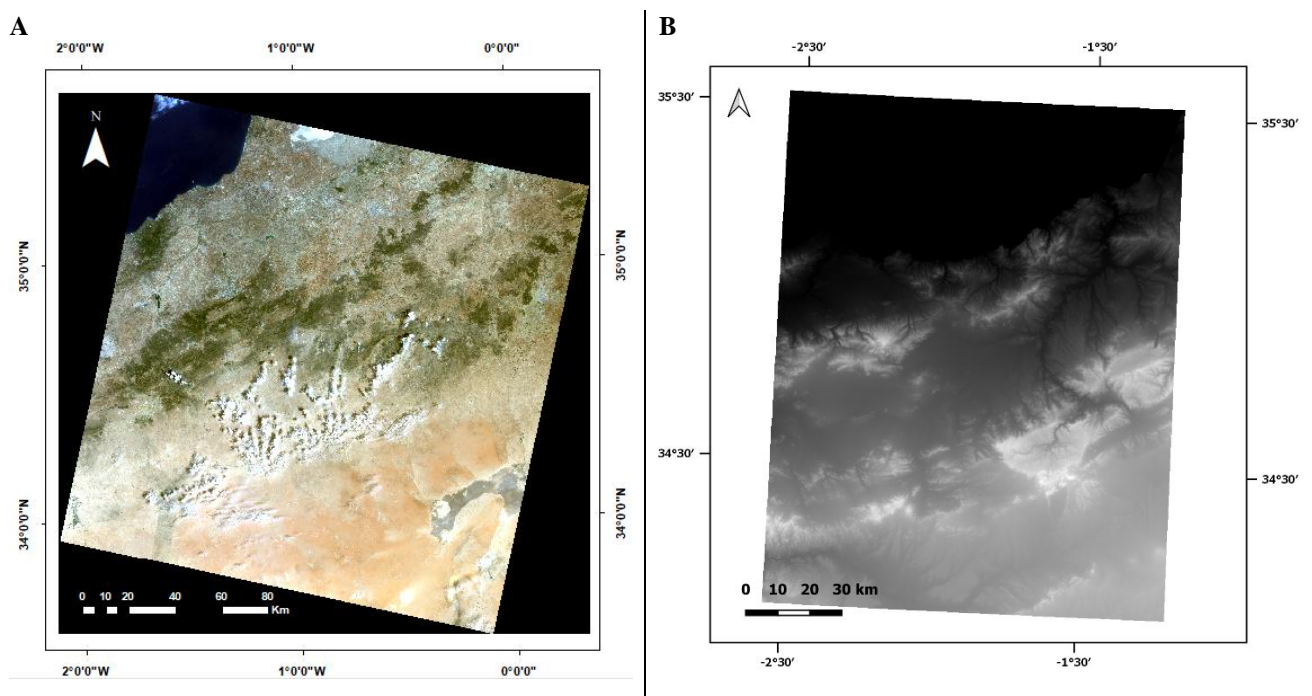


Figure 14. A. Image satellite Landsat 8, B. Modèle numérique de terrain, de la zone d'étude.

2. Données géoscientifiques

Les données géoscientifiques intégrées dans cette étude, sont des cartes géologiques sous format numérique, et des données hydrogéologiques temporelles.

2.1. Données cartographiques

Deux cartes géologiques fournies par le personnel du centre des Techniques Spatiales (CTS) d'Arzew, au niveau de la wilaya d'Oran, ont été utilisées. La première carte est de Tlemcen NI-30-XVII à l'échelle 200 000^{ème} et la deuxième est celle de Telagh NNI-30-XVIII (200 000^{ème}) (Figure 15 et 16).

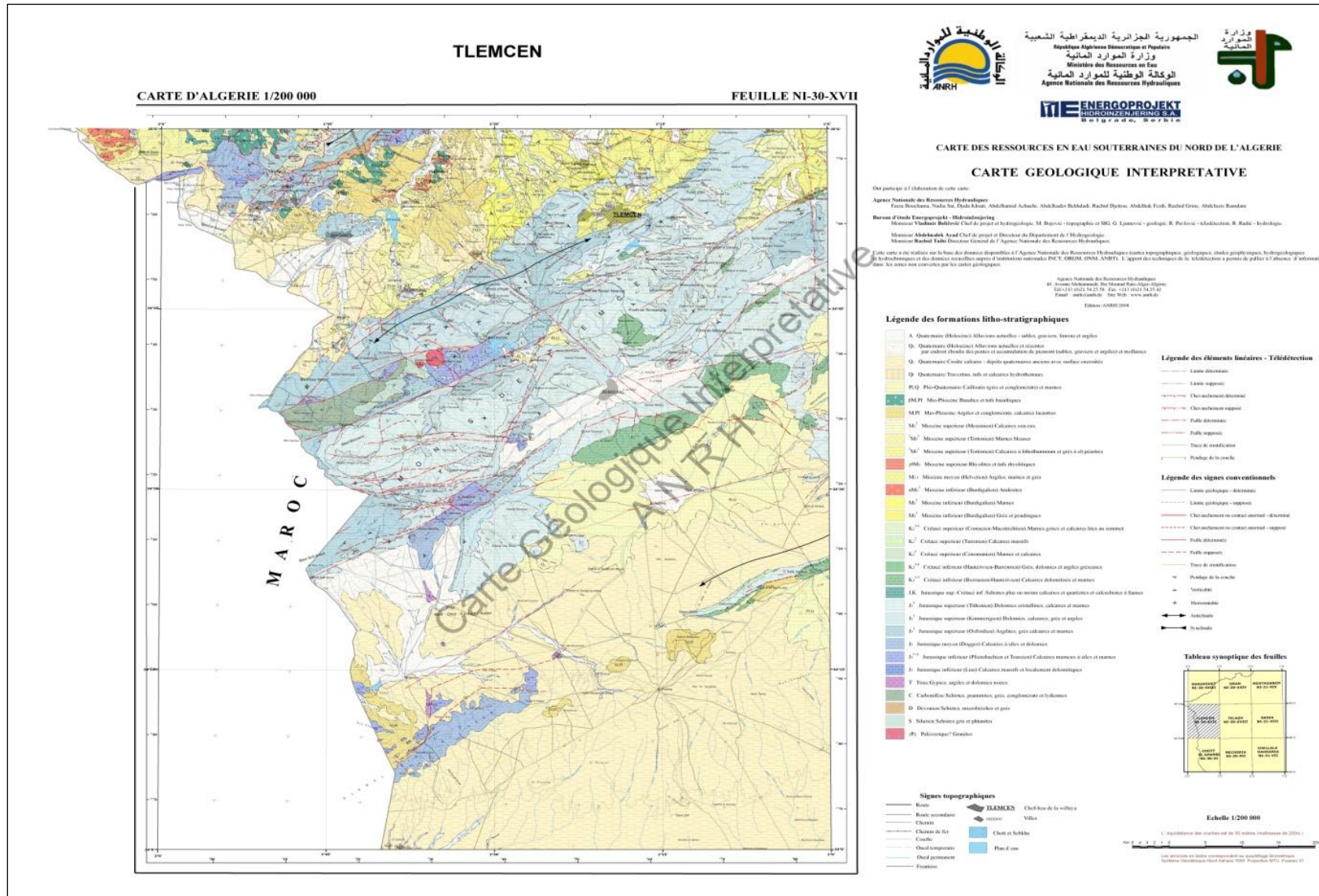


Figure 15. Carte géologique de la région de Tlemcen (ARNH, 2006).

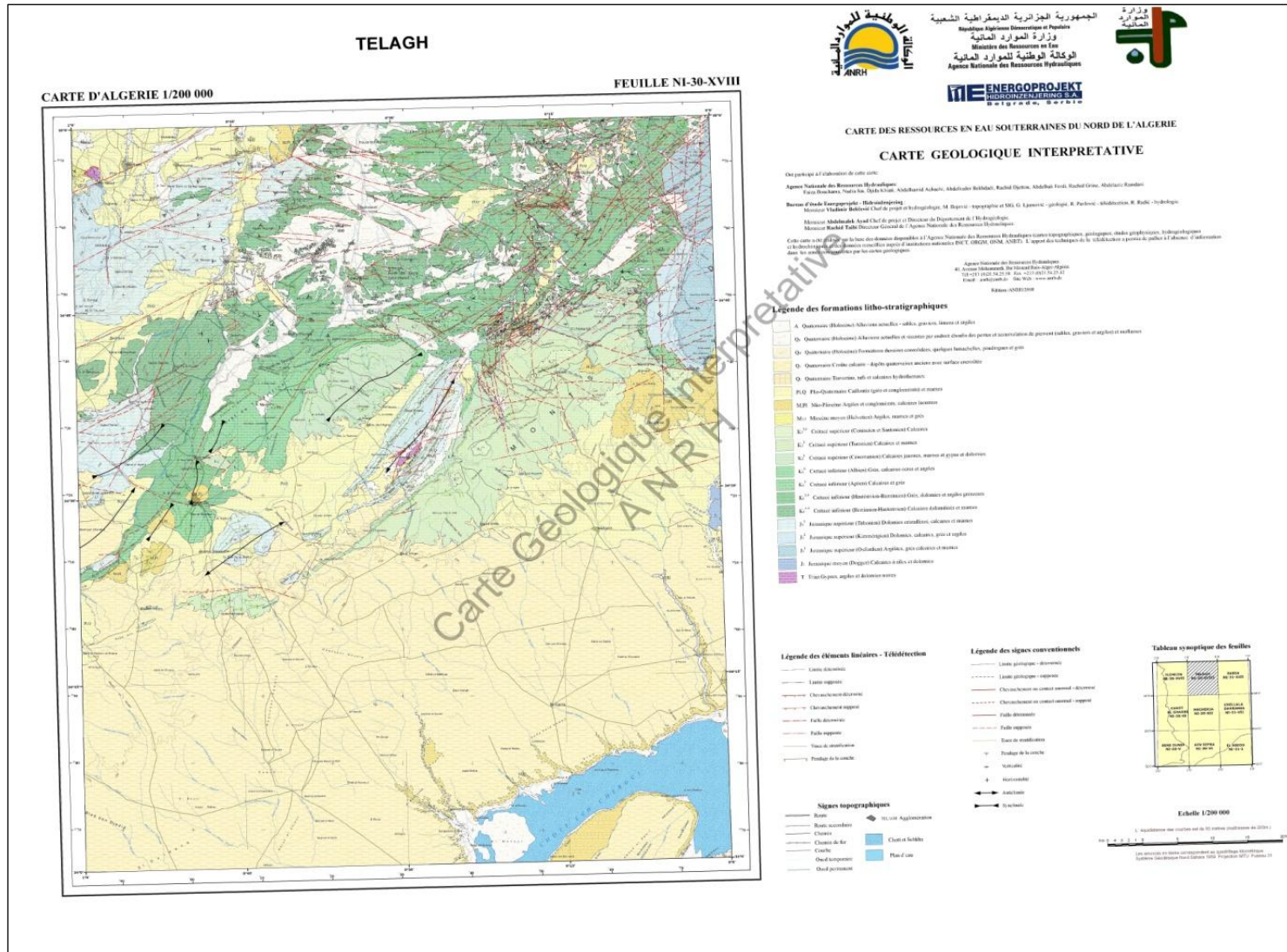


Figure 16. Carte géologique de la région de Telagh (ARNH, 2006).

2.2. Base de données des forages dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen

Ce sont des données obtenues auprès de la direction de l'Hydraulique de la wilaya de Tlemcen, et du centre des Techniques Spatiales (CTS) d'Arzew (Oran). Pour cette étude 60 forages ont été sélectionnés compris entre les coordonnées géographiques (110300 , 175100) et (146350 , 184500), avec plusieurs descriptions tels que : Localisation, profondeur (m), niveau statique (m), niveau dynamique (m), nature d'aquifère, débit d'exploitation (m) et l'usage de l'ouvrage. Toutefois, il faut souligner que tous les forages utilisés ont été mis en service en année 2005.

La délimitation de la zone d'étude a été effectuée à la suite de cette sélection de base de données (Figure 17) ainsi que les limites des formations aquifères de la zone d'étude.

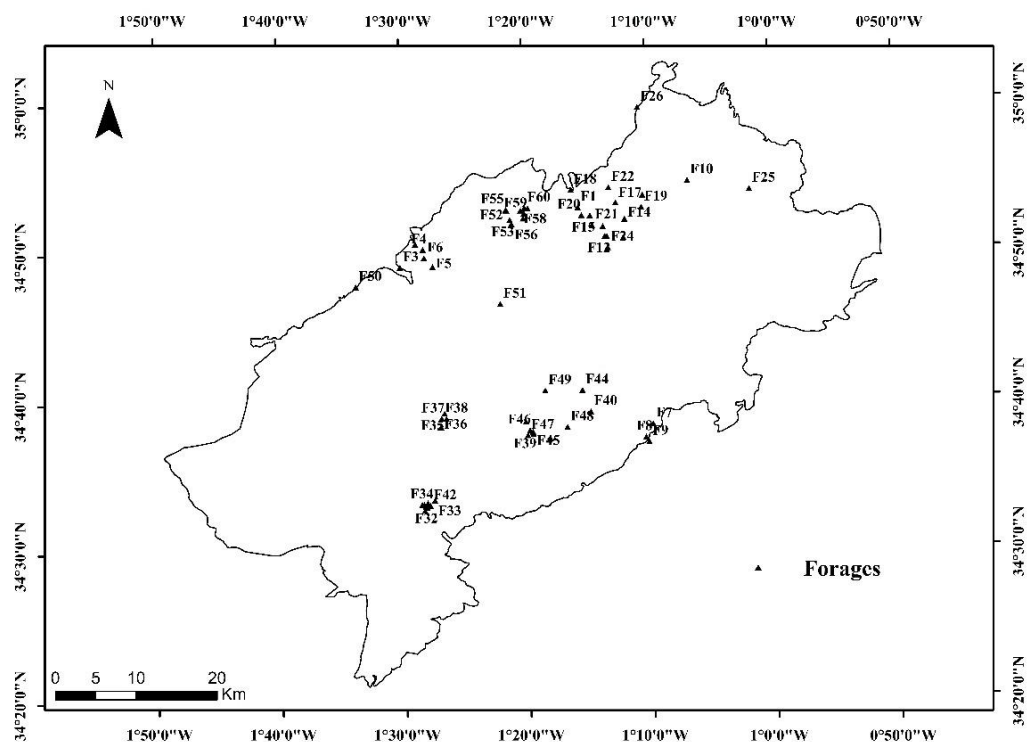


Figure 17. Localisation des forages dans les monts de Tlemcen.

3. Données climatiques

Les paramètres climatiques (températures, précipitations) à l'échelle journalière sur une période de 40 ans (Allant du 1 Janvier 1982 au 31 Décembre 2022) (Annexe I) ont été utilisés.

Ces données sont enregistrées au niveau de cinq stations (Sidi Djilali, Sebdu, Béni Snous, Benbadis et Tlemcen). Il est important de noter que cette base de données météorologique utilisée appartient au Data-Access de la Nasa Earth Science's.

B. Méthodes d'investigation

Dans ce mémoire, diverses méthodes de traitement ont été combinées : Traitement d'imagerie Landsat pour la détermination des cartes de faciès et celle des linéaments, les traitements des modèles numériques du terrain (MNT) pour l'extraction des paramètres géométriques ainsi que le modèle d'analyse multicritère basée sur l'établissement des cartes de disponibilité, d'exploitabilité et d'accessibilité des eaux souterraines. La combinaison de ces approches peut fournir une connaissance de potentialité hydrique des aquifères karstiques des monts de Tlemcen.

1. Traitement des données spatiales

1.1. Traitement d'imagerie Landsat

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

L'ENVI est un logiciel commercial conçu pour la visualisation et manipulation d'images de télédétection (images satellitaires optiques et radars, photographies aériennes), c'est un outil de zoom, contraste, transparence, brillance, projection et rééchantillonnage des données au vol. Il sert à extraire les informations significatives afin de prendre les meilleures décisions (Midekor et Wellens, 2013).

L'ENVI se compose de 3 fenêtres d'affichage (Figure 18), structuré comme suit :

- 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.

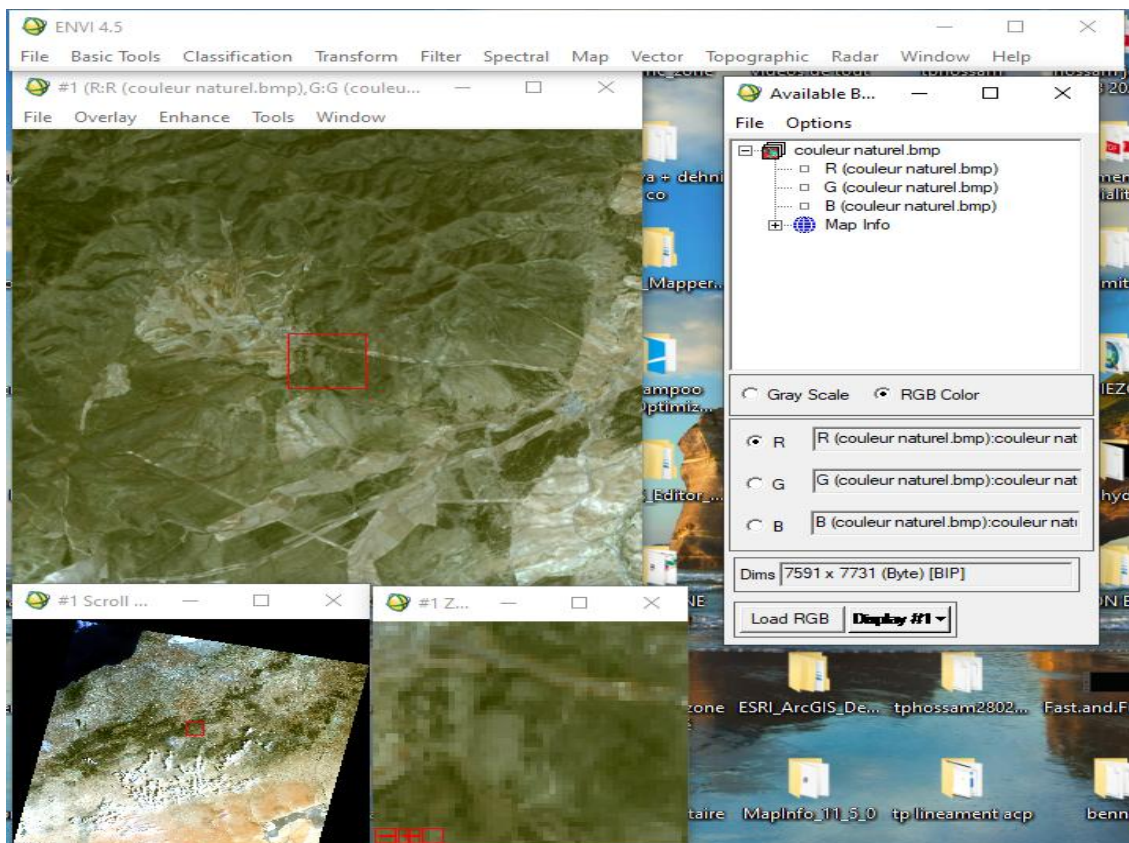


Figure 18. Interface ENVI (Version 4.5).

1.1.2. Méthodes standards

L'utilisation des méthodes standards lors du traitement des images satellites est essentielle car elle permet d'extraire une quantité importante d'informations précieuses des images avant qu'elles ne puissent être utilisées dans des applications spécifiques (www.nasa.gov).

a. Composition colorée

Pour composer des couleurs, il faut sélectionner trois bandes spectrales d'une image et les présenter en couleurs primaires (bleu, vert et rouge) selon le principe de composition des couleurs.

La composition des couleurs peut être classée en deux variantes qui reposent sur la sélection des bandes et la couleur attribuée à chaque bande.

- une composition colorée en couleurs naturelles qui donne une image en couleurs réelles (432) (Figure 19, A) ;
- une autre en fausses couleurs, elle consiste à attribuer des couleurs fictives aux bandes spectrales (532) (Figure 19, B).

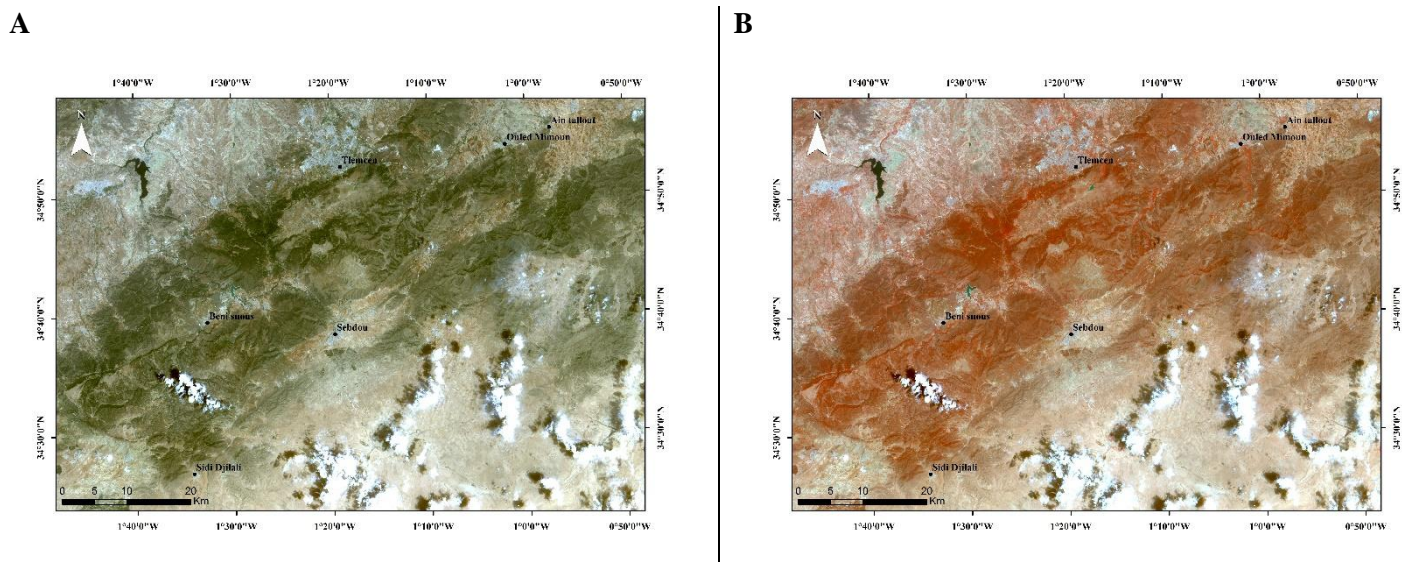


Figure 19. A. une image en couleurs réelles (432) ; B. en fausses Couleurs (532).

b. Analyse en composante principale classique

Les données dans certaines régions spectrales présentent souvent une corrélation élevée, ce qui explique pourquoi l'ACP a été appliquée de multiples façons. L'un de ses principaux objectifs est d'éliminer toute information spectrale excessive ou répétitive des ensembles de données à bandes multiples. En tant que forme de réduction de dimension, l'ACP restreint les composants pour atteindre cet objectif (www.nasa.gov).

La figure ci-dessous présente la courbe statistique de l'ACP classique :

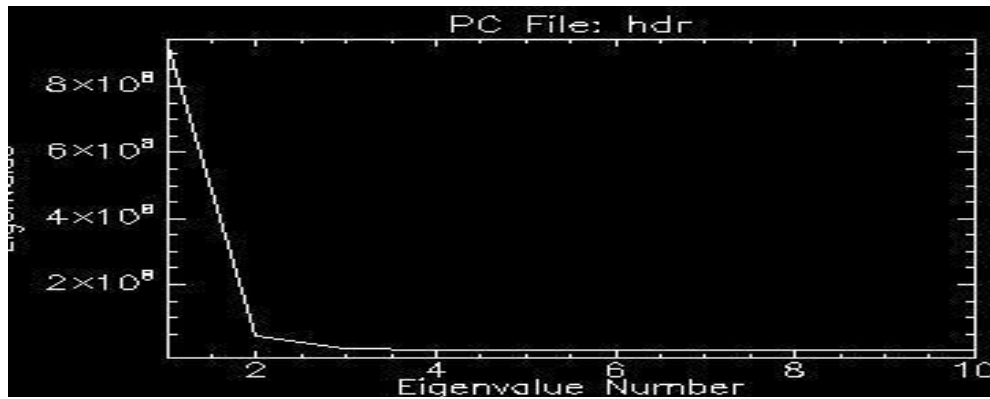


Figure 20. Courbe statistique de l'ACP classique.

Il est évident que la quantité d'informations la plus importante est concentrée dans les quatre premières bandes. Pour mieux visualiser cela, Il est préférable de générer une représentation codée par couleur pour l'ACP, pour mettre en évidence des nouveaux canaux.

1.1.3. Méthodes spécifiques

Des méthodes spécifiques complètent les traitements standards. Ils sont appliqués à des bandes spécifiques afin d'obtenir un contraste maximal et d'éviter les répétitions.

a. Analyse en composante principale sélective

A partir de l'analyse classique en composantes principales, il est possible de réduire le nombre de canaux à trois bandes (RGB), contenant un pourcentage d'information plus important (au moins 90%) (Laoufi, 2020).

Il se peut donc que nous manquions d'autres informations qui n'ont pas été cartographiées dans ces trois bandes et qui peuvent être intéressantes en fonction du degré de corrélation et de contraste spectral existant entre les six bandes Landsat8 ETM+.

A cet égard, l'application de l'ACP sélective permet de choisir une APC pour le spectre visible, une autre pour l'infrarouge moyen et le proche infrarouge. Cela permettra une meilleure sélection et caractérisation des objets dans la scène pour mieux refléter les composants dans ladite zone (Figure 21).

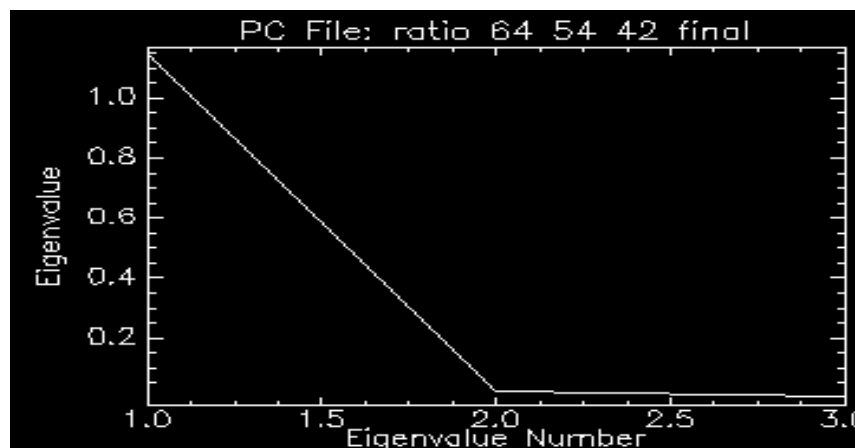


Figure 21. Courbe statistique de l'ACP sélective.

Cependant, la composante couleur de la première ACP du spectre visible combinée à la première ACP des spectres moyen et proche infrarouge permettra de tracer les limites, plus en détail.

b. Transformation RVB-ITS

La transformation RVB en ITS (intensité, teinte et saturation) modifie l'intensité de la réflexion, en mettant l'accent sur la saturation et la teinte de la couleur. A partir de cette analyse, un canal de couleur peut être obtenu.

c. Rapports des bandes (Bands ratios)

La géomorphologie d'une région présente souvent un obstacle à la réponse spectrale et la cartographie géologique devient alors difficile. De ce fait, l'utilisation d'échelles de baguage pour réduire l'impact du terrain pour l'augmentation du contraste entre les surfaces minérales est nécessaire.

d. Filtres

Le but de l'analyse par filtre est d'améliorer les caractéristiques linéaires et de renforcer le contraste de l'image. Dans la zone considérée, cette analyse est appliquée pour détecter et identifier le système de faille affectant diverses formations et favorisant la circulation des eaux souterraines.

1.2. Système d'information géographique (SIG)

Plusieurs systèmes d'information géographique ont été développés pour intégrer des données spatiales (Carte géologique géo-référencée, image satellitaire, MNT, ...) et temporelles (climatique, géoscientifique) disponibles dans une région d'étude donnée, afin de calculer des indices de spécificité géochimique, de potentialité hydrique ou même de vulnérabilité à un risque naturel donné ou à une pollution hydrique spécifique de cette dite région considérée.

Une brève présentation de l'outil SIG utilisé sera donnée.

1.2.1. Présentation de l'outil ARCGIS (Version 10.8.1)

ARCGIS est un logiciel SIG, développé par la société américaine *Esri (Environmental Systems Research Institute)*. Il est réparti en trois compartiments (Menad, 2018) (Figure 22) :

- *ArcCatalog* assure l'organisation et la gestion des données SIG ;
- *ArcMap* c'est l'application centrale d'ArcGIS, dont elle assure à la fois la visualisation et le traitement (analyse, édition,...) des données dans la fenêtre « data view ». La mise en page des cartes est réalisée dans la fenêtre « layout view ». A noter qu'il existe l'ArcGlobe, qui est comparable à ArcMap mais permet une visualisation 3D de la donnée ;
- ArcToolbox « boîte à outils », c'est là où ils sont regroupés l'ensemble des outils de géotraitement. Il est disponible à trois niveaux progressifs de perfectionnement à savoir : ArcView, ArcEditor, ArcInfo (le niveau le plus complet et le plus sophistiqué).

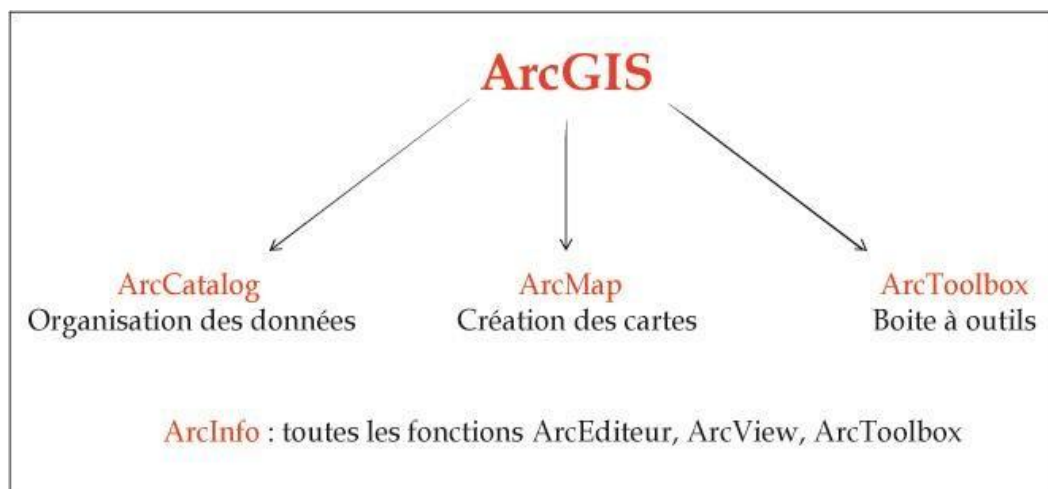


Figure 22. Architecture générale de l'ArcGIS (Menad , 2018).

La version 10.8.1 de ARCGIS propose une interface utilisateur qui permet une prise en main plus rapide, avec un accès simplifié aux menus et options.

1.2.2. Traitement des modèles numériques du terrain (MNT)

Un MNT (Modèle Numérique de Terrain) représente la surface du modèle du paysage. Il est constitué d'une grille dont chaque point possède des coordonnées (X,Y,Z) qui correspondent à la latitude, longitude et altitude (Tarmoul, 2018).

La disponibilité actuelle des modèles numériques de terrain soit sous leur forme matricielle ou vectorielle et le développement du SIG ont rendu possible l'automatisation des calculs et des mesures des paramètres morphométriques : la mesure de la géométrie, de l'hypsométrie, des pentes et l'organisation des réseaux hydrographiques (Yebdri, 2023).

1.2.3. Méthodes d'interpolation spatiale

Sous le Système d'Information Géographique (SIG), 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: (i) saisie des données, (ii) géotraitement (via un script de processus défini), (iii) géovisualisation (le développement d'un modèle spatial pour le traitement des données d'entrée dans des cartes thématiques de sortie) (Nusret & Dug, 2012).

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

- le krigeage ordinaire (OK : *Ordinary Kriging*) : réalisé par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interpolation et la modélisation du variogramme expérimentale (Gratton, 2002) ;
- la pondération de la distance inverse (IDW : *inverse distance weighting*) : est un processus permettant d'assimiler une valeur à tous point d'un espace à partir d'un semis de points connus (Franke 1982).

2. Méthode d'analyse multicritère

2.1. Principe

L'analyse de décision multicritère est basée sur l'utilisation de plusieurs paramètres appelés « critère » tels que : les paramètres morphométriques (Pente, drainage,...), géologiques (Infiltration, structure, lithologie,...), et hydrogéologique (niveau statique, profondeur, altération, débit,...), à partir desquelles un croisement et une reclassification de leurs informations spatiale et numérique aident à la réalisation de la carte des potentialités en eaux souterraines (Doumouya, 2012; Hyann et al., 2015; Akkari, 2022).

2.2. Définition des critères, pondération et agrégation des facteurs

Les critères relatifs à la potentialité en eau souterraine se regroupent en trois indicateurs quantitatifs : la disponibilité, l'accessibilité et l'exploitabilité de la ressource souterraine (Doumouya, 2012 ; Hyann et al., 2015 ; Mangoua et al. 2019). Leur description est donnée dans le tableau 2.

2.2.1. Critère de disponibilité

Ce critère est établi par la combinaison des paramètres de pente, la densité de drainage, la densité de fracturation, l'épaisseur d'altération et l'infiltration efficace (Hyann et al., 2015 ; Yao et al., 2016 ; Kouassi et al. 2019).

Dans cette étude, les cartes des pentes et des densités de drainages sont extraites grâce aux différents traitements du MNT découpé selon la zone considérée ; tandis que les cartes de linéaments et de densités de fracturation sont obtenues après extraction des fractures des images satellitaire Landsat. Les épaisseurs d'altération sont issues des données de forage fournies par CTS d'Arzew.

Le calcul de l'infiltration est effectué grâce à la formule du bilan hydrique globale dont l'expression est :

$$I = P - ETR - R$$

Avec : I : l'infiltration, P : précipitations (mm), R : lame d'eau ruisselée (mm), ETR : évapotranspiration réelle (mm).

L'appréciation de l'évapotranspiration réelle et de la lame d'eau ruisselée aux niveaux des stations étudiées sont estimées après calcul des évapotranspiration potentielles (ETP) calculées par la méthode du bilan hydrique de Thornthwaite (1948).

Pour l' ETP , Thornthwaite (1948) proposa une équation basée sur les températures moyennes mensuelles :

$$ETP = 16 \left(\frac{T \times 10}{I} \right)^{\alpha}$$

Avec

$$I = \sum i$$

Où

$$i = i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad \text{et} \quad \alpha = 0.016I + 0.5$$

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

L'évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée est obtenue à partir de la formule :

$$ETP_{\text{Corrigée}} = ETP \times F$$

F: facteur correctif fonction du mois (m) et de la latitude.

Alors que 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) (BONNET & al., 1970). Plusieurs cas peuvent se présenter :

-ETP < P → ETR = ETP : La quantité d'eau correspondant à P – ETP est emmagasinée dans le sol jusqu'à saturation de celui-ci. La partie de l'excédent dépassant éventuellement la réserve cumulée maximale (réserve utile ou RU) en eau du sol est disponible pour le ruissellement et l'infiltration (BONNET & al., 1970).

-ETP = P → ETR = P : Les réserves en eau de sol restent les mêmes que celles du mois précédent.

-ETP > P → ETR = P + tout ou partie de la réserve en eau du sol jusqu'à épuisement de celle-ci : Lorsque les réserves en eau du sol sont épuisées et que ETP > ETR, ETP – ETR = Déficit.

La valeur de l'évapotranspiration réelle annuelle est la somme des 12 valeurs d'évapotranspiration réelle mensuelles (BONNET & al., 1970).

Enfin la lame d'eau ruisselée est calculée par l'utilisation de l'équation 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).

Les résultats de l'ETP et ETR, R ainsi que les valeurs de I des cinq stations sont regroupés en Annexe I.

2.2.2. Critère d'accessibilité

Ce critère renseigne sur les conditions d'accès à la ressource en eau souterraine, considérées comme des facteurs économiques et sociaux car ils favorisent ou non l'accès à cette ressource (Hyann et al., 2015). Il est basé à la fois par la profondeur total des forages ainsi qu'à l'indice de succès (Yao et al., 2016 ; Kouassi et al. 2019).

La profondeur totale est le paramètre le plus important dans ce critère d'accessibilité car il indique la profondeur à forer pour obtenir le débit optimal. De ce fait, il donne des informations sur le coût du forage. Ce paramètre a été fournie par CTS d'Arzew.

L'indice de succès donne la probabilité de succès d'un forage et est calculé par l'équation suivante (Doumouya, 2012 ; Hyann et al., 2015 ; Mangoua et al. 2019).

$$a = \frac{b}{10} \times 100$$

Avec, **a** : indice de succès en pourcentage (%), **b** : Débit d'exploitation en m³/h.
L'indice de succès varie de 10 à 100 %.

2.2.3. Critère d'exploitabilité

Il dépend de deux paramètres : le premier est le débit d'exploitation conditionné par la quantité d'eau dans la réserve souterraine et le deuxième est le niveau statique de la nappe d'eau souterraine qui peut informer sur la rapidité de renouvellement de cette réserve en cas de forte sollicitation (Youan et al., 2011, Doumouya, 2012). Ces indicateurs d'exploitabilité proviennent des données de forage fournis par la CTS d'Arzew.

La standardisation des paramètres de chaque indicateur permet d'uniformiser les paramètres en définissant le degré d'appartenance de chaque critère à un intervalle commun de 1 à 10. La classe fortement défavorable a toujours la note la plus faible et la classe fortement favorable à la note la plus élevée (Youan et al., 2011, Doumouya, 2012). Cette standardisation des critères identifiés est renseignée dans le Tableau 2.

L'agrégation des indicateurs susmentionnés pourrait être réalisée par diverses méthodes. Plusieurs auteurs à l'exemple de Youan TA et al. (2011), Doumouya (2012), Hyann et al. (2015), Yao et al. (2016), Mangoua et al. (2019), Kouassi et al. (2019) et bien d'autres avaient portés leurs choix sur la méthode d'agrégation complète par pondération.

Cette méthode consiste à multiplier chaque paramètre standardisé par son coefficient de pondération respectif (Tableau 2) et ensuite en additionnant ces résultats pour produire un indice d'aptitude selon l'équation suivante :

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i$$

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

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

Indicateurs	Paramètres	Appréciation des Classes	Classes	Notes	Coef. De Pondération
Disponibilité en eau	Pente %	Très faible	0-1	9	0.25
		Faible	1-2	7	
		Moyenne	2-3	5	
		Forte	3-4	3	
		Très forte	>4	1	
	Infiltration efficace (mm)	Très faible	10 -25	1	0.50
		Faible	25-40	3	
		Moyenne	40-70	5	
		Forte	70-100	7	
		Très forte	>100	9	
	Densité de drainage	Très faible	<5	9	0.05

	(Km Km ²)	Faible	5-10	7	
		Moyenne	10 -15	5	
		Forte	15-20	3	
		Très forte	>20	1	
	Densité de fracture (km Km ²)	Très faible	1-5	1	0.12
		Faible	5-10	3	
		Moyenne	10-15	5	
		Forte	15-20	7	
		Très forte	>20	9	
	Epaisseur d'altération (m)	Très faible	<10	1	0.08
		Faible	10-20	3	
		Moyenne	20-30	5	
		Forte	30-40	7	
		Très forte	40- 78	9	
Accessibilité en eau	Profondeur totale (m)	Très faible	11-25	9	0.75
		Faible	25-52	8	
		Moyenne	52-70	7	
		Forte	70-85	5	
		Très forte	85-98	1	
Indice de succès (%)		Très faible	0-20	10	0.25
		Faible	20-40	8	
		Moyenne	40-60	6	
		Forte	60-80	3	
		Très forte	80-100	1	
Exploitable en eau	Niveau statique (m)	Très faible	1-5	1	0.25
		Faible	5-15	3	
		Moyenne	15-25	5	
		Forte	25-40	8	
		Très forte	40-45	10	
Débit d'exploitation (m ³ h ⁻¹)		Très faible	0-1	1	0.75
		Faible	1-3	3	
		Moyenne	3-5	5	
		Forte	5-8	8	
		Très forte	8-25	9	

Une reclassification des facteurs conduira à des cartes thématiques à quatre classes qui sont : la classe Mauvaise, la classe Médiocre, la classe Bonne et la classe Excellente. Ce nombre de classe est fixé à quatre pour une meilleure lisibilité et une bonne interprétation de la carte résultante (Youan et al., 2011 ; Doumbouya et al 2012 ; Hyann et al., 2015).

2.3. Validation des cartes thématiques : Analyse de l'incertitude

La validation des cartes thématiques : carte de disponibilité, d'exploitabilité, d'accessibilité ainsi que la carte finale de potentialités en eau souterraine, doit être précédée par calcul des incertitudes. Ces dernières sont réalisées sur les moyennes des divers résultats des principaux critères liés à cette étude (Doumouya et al., 2012).

Cette incertitude est calculée par l'équation :

$$\Delta \bar{X} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$$

Avec X : l'incertitude sur la moyenne de la série de données, σ : l'écart type de la série de données, m : le nombre de données.

Un facteur d'expansion K est calculé dans le but de déterminer l'intervalle de confiance. Ce facteur K permet la définition d'un intervalle de portée suffisante ayant pour but la certification des résultats (Doumouya et al., 2012 ; Mangoua et al. 2019). Il s'exprime par l'expression :

$$k = \frac{|E - \bar{X}|}{\sigma}$$

Avec k : le facteur d'expansion, E : la valeur extrême de la série statistique qui peut être le maximum ou le minimum de la série.

Les niveaux de confiance des différents paramètres sont déduits des différentes valeurs de (k). Ainsi $k = 1$ pour un niveau de confiance de **68%**, $k = 2$ pour un niveau de confiance de **95%** et $k = 3$ pour un niveau de confiance de **99%**.

Troisième chapitre : Cartographie des facies, des fractures & Analyses morphologiques et interprétations des écoulements souterrains

Troisième chapitre : **Cartographie des facies, des fractures & Analyses morphologiques et interprétations des écoulements souterrains**

I. CARTOGRAPHIE DES FACIES ET DES FRACTURES

A. Cartographie des facies

La lithologie présente dans les monts de Tlemcen est étroitement liée à la répartition des écoulements superficiels et souterrains. La région présente des formations karstiques fissurées très perméables, ce qui pourrait se traduire par une faible densité de drainage et une infiltration rapide des eaux de surface. A l'inverse, il existe également des formations imperméables qui favorisent le drainage, permettant ainsi un ruissellement efficace des eaux de surface.

La carte des faciès des monts de Tlemcen a été songée, en coïncidant à la fois les traitements des images satellitaires déjà mentionnés (Figure 23), et les cartes géologiques réelles géoréférencées sous ArcGIS.

A partir des deux premières images (Figure 23,a et b), l'uniformisation des couleurs démontre l'extension des terrains jurassiques karstiques qui occupent presque la totalité des monts de Tlemcen. La carte de compositions colorée en fausses couleurs (Figure 23,b), illustre cette différence par des limites bien marquées entre les différentes formations : les teintes marrons pour les formations jurassiques et les grisâtres pour les celles du mio-plio-quadernaire.

Grâce à la multitude de couleurs fournies par les bandes CP2, CP3 et CP4 de l'ACP classique, qui traduisent avec précision la richesse de la réflectance entre les différents objets. Les terrains d'âge Jurassique sont clairement visibles en couleur foncé (bleu foncé) et les autres couleurs claires sont des terrains miocène et plio-quadernaire et quadernaire, avec des formation carbonifère et autre d'âge trias (Figure 23,c et d).

La transformation RVB-ITS (Figure 23,d) a permis aussi la distinction de d'autres formations lithologiques, il s'agit de la formation quadernaire holocène en couleur mauve, et celle du miocène en couleur rougeâtre.

Les différences spectrales entre les bandes par l'utilisation des trois rapports de bande ($5/4$, $5/3$ et $5/2$) et leurs attribution aux couleurs primaires des images sont en RVB (Figure 23,e,f), ont permis la validation des formations jurassiques, miocènes et quadernaires de la zone considérée.

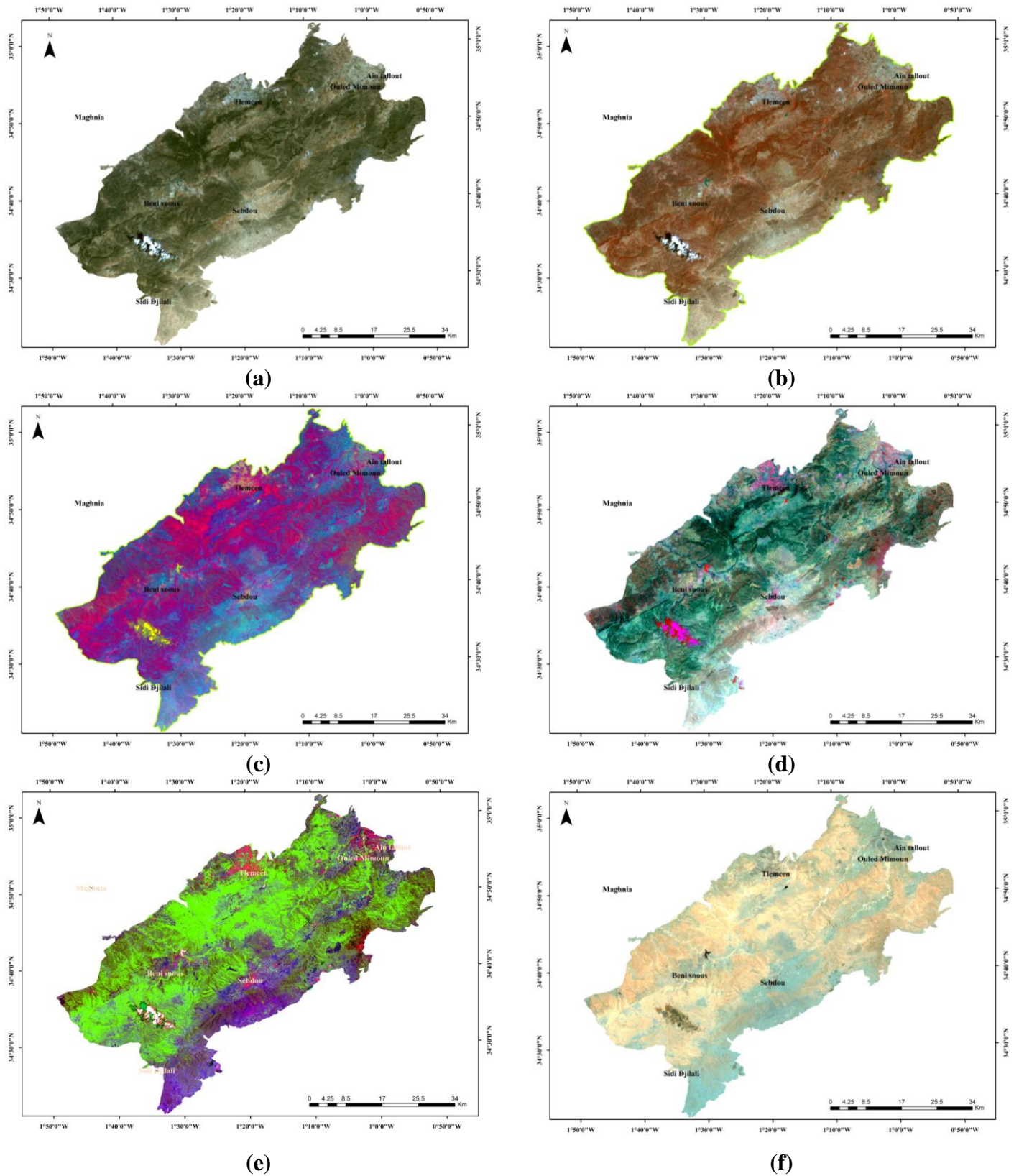
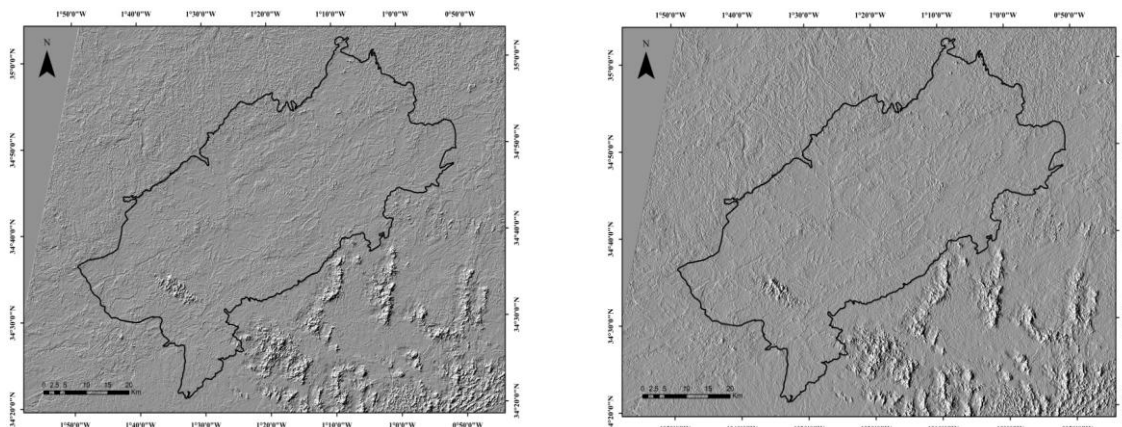


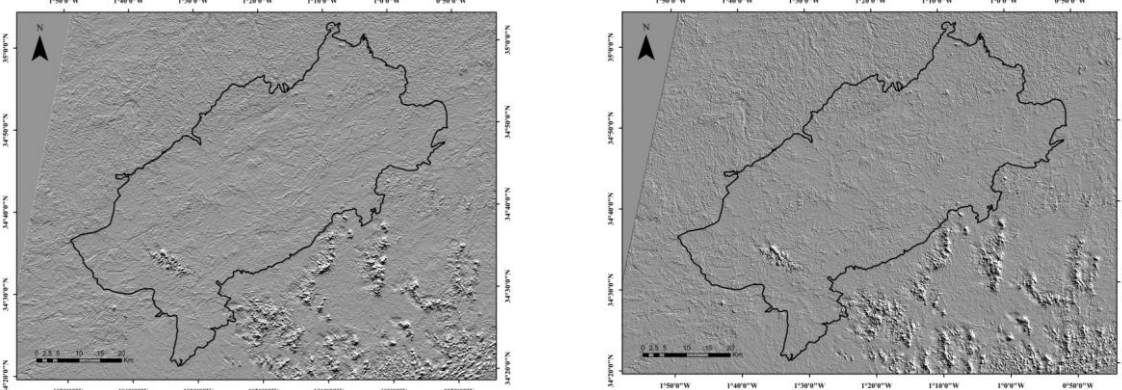
Figure 23. Etapes de traitement de l'image landsat8

[a. Composition colorée en couleurs naturelles 432 ; b. Composition colorée en fausses couleurs 532 ; c. Composition colorée CP4, CP3, CP2 ; d. Composition colorée CP3, CP2, CP1 ; e. Transformation RVB-ITS ; f. Composition colorée des rapports des bandes (5/4, 5/3 et 5/2)].

L'analyse par filtre effectuée par les directions 0° , 45° , 90° et 135° appliquées sur une matrice 3×3 , affiche des lignes droites perpendiculaires à la direction saisie (Figure 24).



Filtres directionnels 0° et 45°



Filtres directionnels 90° et 135°

Figure 24. Filtres directionnels 0°, 45°, 90° et 135°

A la lumière de cela, L'établissement de la carte des faciès des monts de Tlemcen a été obtenue, en la confrontant directement aux différentes données géo-scientifiques afin de coïncider chaque formation détecter par son âge.

Du point de vue lithostratigraphique, on distingue ce qui suit :

Quaternaire Holocène :	Alluvions actuelles et récentes
Quaternaire :	Croute calcaire- dépôts quaternaire anciens avec surface encroutée
Quaternaire :	Travertins, tufs et calcaires hydrothermaux
Plio-Quaternaire :	Cailloutis (grès et conglomérats) et marnes
Miocène supérieur (Tortonien) :	Calcaires a lithothamnium et grès a clypéastre
Crétacé inférieur (Berriasien - Hautérvien) :	Calcaires dolomitisés et marnes
Jurassique supérieur (Tithonien) :	Dolomies cristallines, calcaires et marnes
Jurassique supérieur (Kimmérgien) :	Dolomies, calcaires, grès et argiles
Jurassique supérieur (Oxfordien) :	Argilites, grès calcaires et marnes

Jurassique moyen (Dogger) :	Calcaires a silex et dolomies
Jurassique inférieur (Lias) :	Calcaires massifs et localement dolomitiques
Carbonifère :	Schistes, psammites, grès, conglomérats et lydiennes
Silurien :	Schistes gris et plitanites
Paléozoïque :	Granites

La carte des faciès est représentée sur la Figure 25:

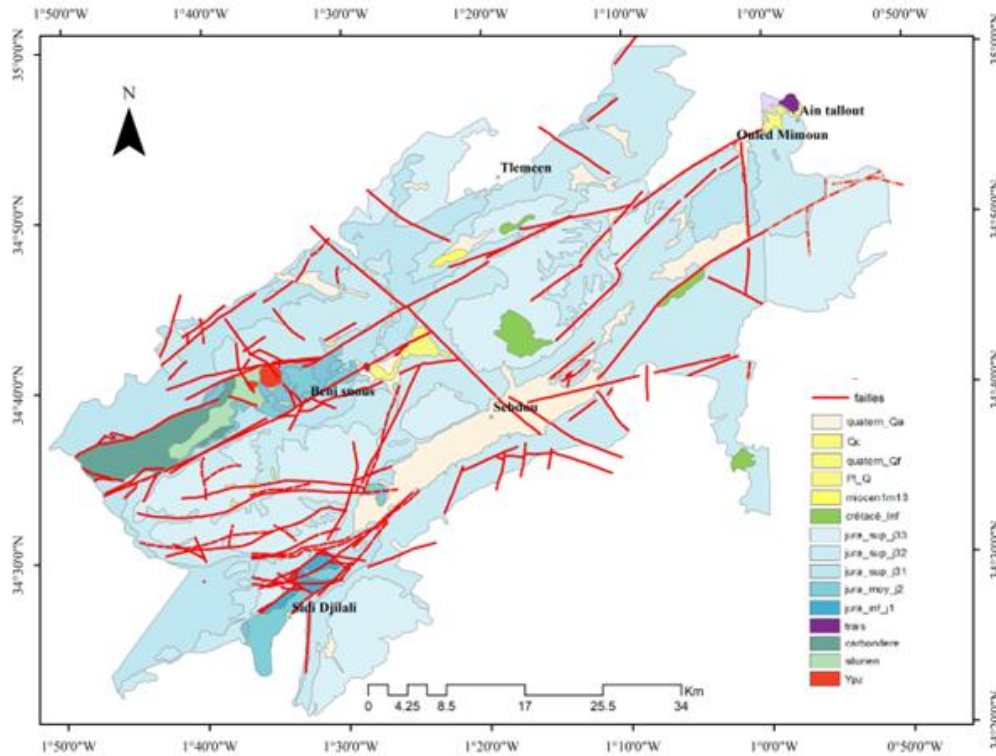


Figure 25. Carte de faciès des monts de Tlemcen.

[Quatern_Qa :Quaternaire Holocène ; Qc :Quaternaire ; Quatern_Qf :Quaternaire ; Pl_Q :Plio-Quaternaire ; Miocène1m13 :Miocène supérieur (Tortonien) ; Crétacé_inf :Crétacé inférieur (Berriasien-Hautérvien) ; Jura_sup_j33 :Jurassique supérieur (Tithonien) ; carbonifère ; Jura_sup_j32 :Jurassique supérieur (Kimmérigien), Silurien ; Jura_sup_j31 : Jurassique supérieur (Oxfordien) ; Ypz : Paléozoïque ; Jura_moy_j2 :Jurassique moyen (Dogger) ; jura_inf_j1:Jurassique inférieur (Lias)].

B. Cartographie des fractures

L'analyse tectonique surtout de la fracturation joue un rôle important dans l'hydrogéologique des monts de Tlemcen connus par son abondance en formations karstiques faillées (Karst discontinu). A cet effet, deux cartes structurales complémentaires ont été réalisées, l'une en extraction des failles réelles sur fond géologiques géo-référencié et l'autre appelée carte des linéaments, traitée par l'utilisation des filtres directionnels à partir des données de télédétection sous le logiciel *Geomatica*.

1. Issue de la carte géologique

L'extraction des failles a été réalisée par l'utilisation des cartes géologiques susmentionnées préalablement avec rajout des failles supposées par le personnel du CTS dans leurs travaux sur les monts de Tlemcen en 2009, ses failles supposées ont été observées par la fonction "hillshade" sous Arcgis (Figure 26).

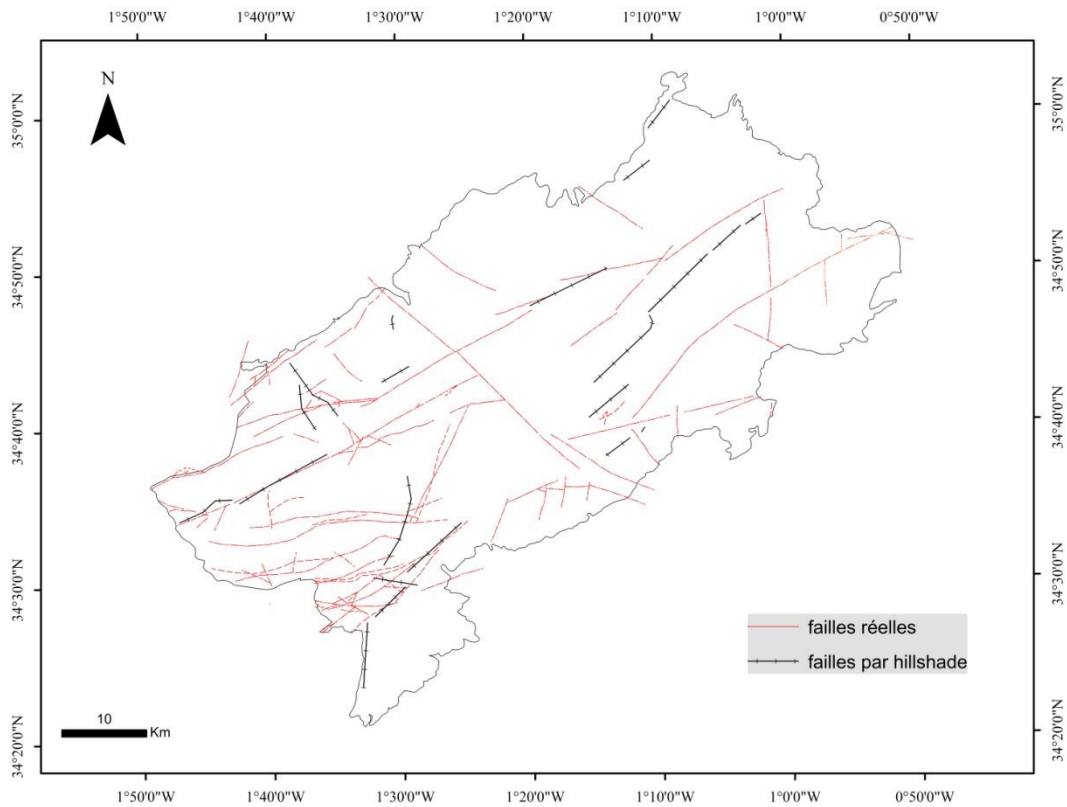


Figure 26. Failles issues de la carte géologique

2. Issue de la télédétection

L'inventaire des linéaments et les directions des accidents identifiés au sol sont générés sur la carte des linéaments de la figure suivante :

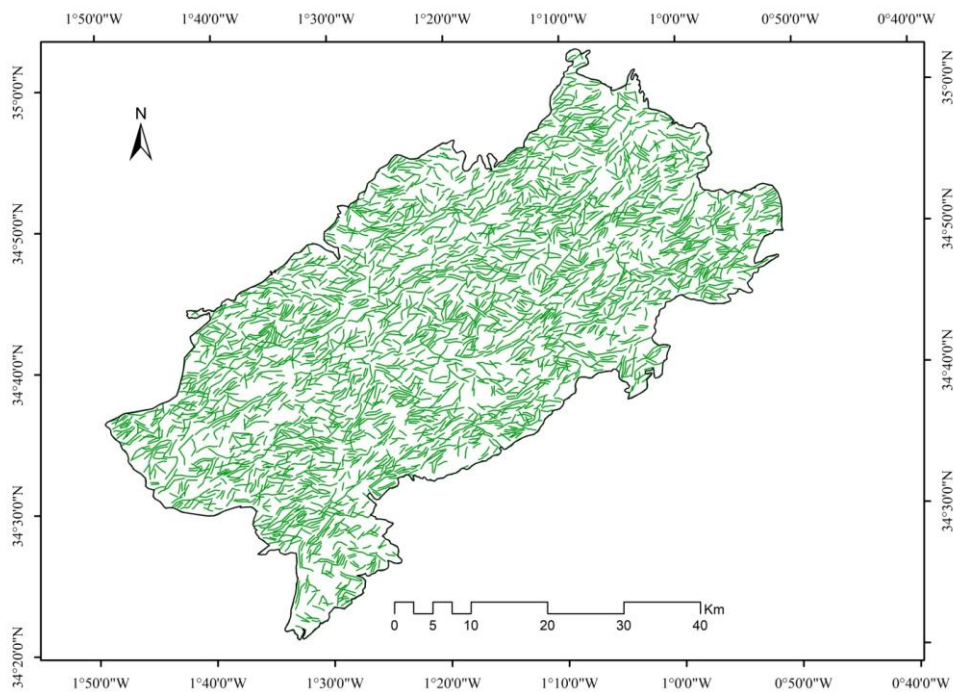


Figure 27. Carte des linéaments issue par la télédétection.

La figure 28 démontre que les zones les plus denses en fracturation (1.95 à 2.37 km/km²) correspondent majoritairement au placement des failles réelles (Figure 26).

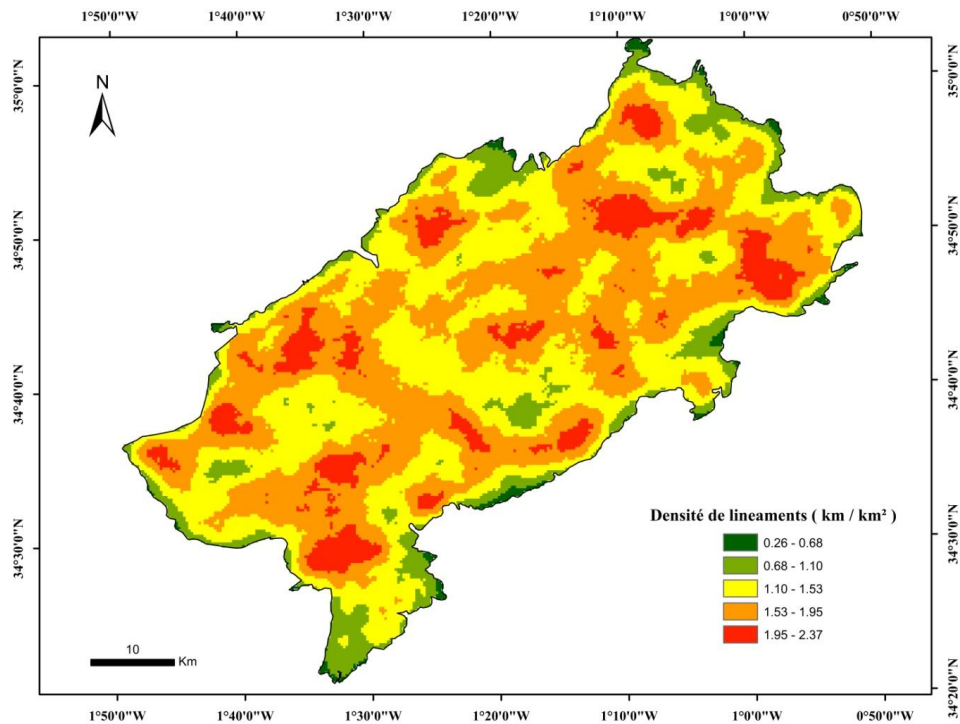


Figure 28. Carte de densité des linéaments.

3. Analyse globale des linéaments

L'élaboration de la rosace directionnelle montre clairement que les maximums des fractures sont orientés dans la direction préférentielle SW-NE et W-E (Figure 29), ceci correspond aux directions dites telliennes déjà confirmées par des travaux antérieurs.

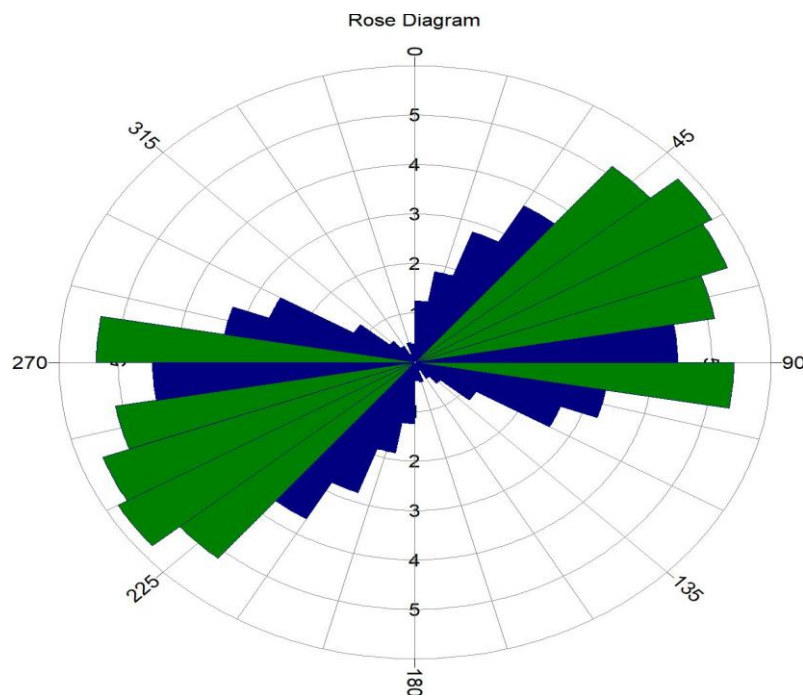


Figure 29. Rosace directionnelle de la fracturation

II. ANALYSE MORPHOMETRIQUE

La caractérisation morphométrique du secteur d'étude est réalisée ici par une quantification des paramètres géométriques descriptifs (Aire et périmètre) de la zone d'étude délimitée, une cartographie du relief par une présentation altimétrique et de pente ainsi qu'une classification de son réseau hydrographique.

A. Relief

1. Carte altimétrique

La région considérée à une aire drainée de 2838.78 km² et un périmètre d'environ 383.26 km. La carte altimétrique (Figure 30) montre que les altitudes varient entre 374 et 1830 m, avec une dominance des altitudes élevées (800 à 1200m) sur l'ensemble des monts de Tlemcen.

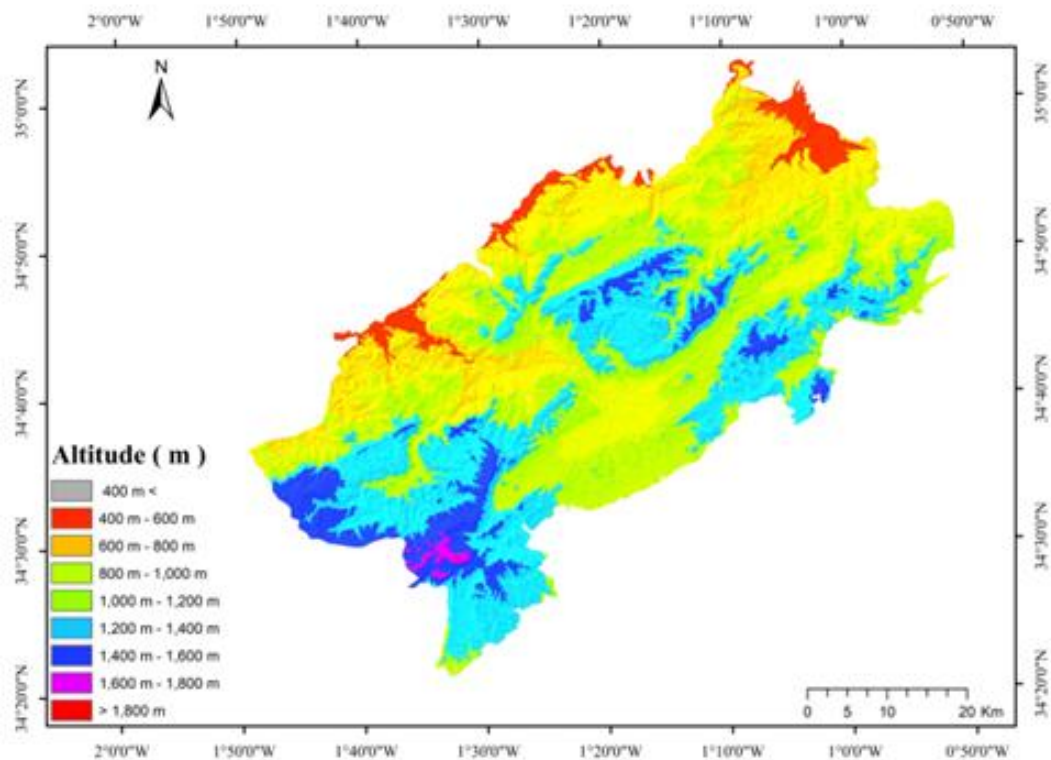


Figure 30. Carte altimétrique des monts de Tlemcen.

2. Carte des pentes

La carte des pentes représentée en figure 31 montre une variation comprise entre 0 et 64%, avec de fortes incisions des reliefs.

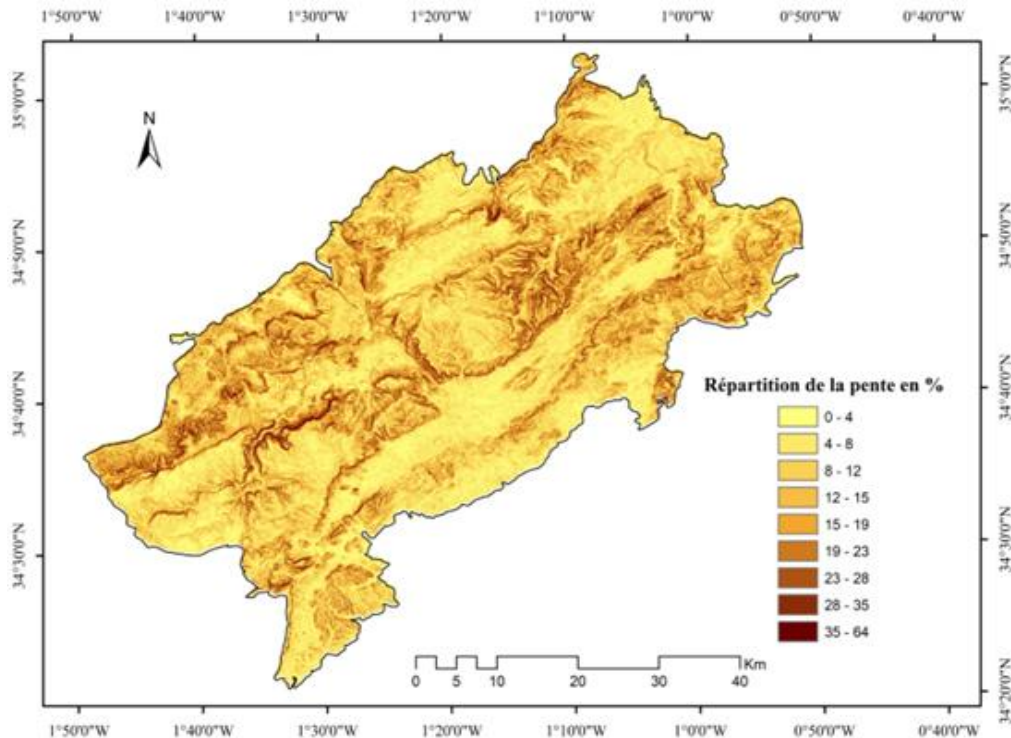


Figure 31. Carte des pentes des monts de Tlemcen.

B. Réseau hydrographique

Il est important de rappeler que la délimitation de notre région d'étude, ne coïncide pas avec la délimitation du bassin topographique, de ce fait plusieurs parties discontinues du réseau hydrographique seront représentées.

1. Carte de drainage

Le réseau de drainage au niveau des monts de Tlemcen a une forme dentritique avec des petits drains légèrement parallèles aux extrémités (Figure 32,A). Sa densité de drainage est en moyenne de 0.94 km²/km. Les densités les plus élevées (>1.68 km/km²) sont observés dans la partie occidentale des monts de Tlemcen (Figure 32,B).

2. Classification des talwegs

La classification des talwegs dite aussi la classification par ordre est une organisation des cours d'eau pour la description des artères de drainage de l'amont vers l'aval. Strahler (1952) l'avait défini, en se basant sur les règles suivantes :

- Tout cours d'eau sans affluent est d'ordre un ;
- Tout tronçon de rivière, formé par la réunion de cours d'eau d'ordre x est d'ordre (x+1).

D'après la classification de Strahler réalisée, à la fois, sous Arcgis et global mapper, le réseau hydrographique est de l'ordre de 5 (Figure 32,C).

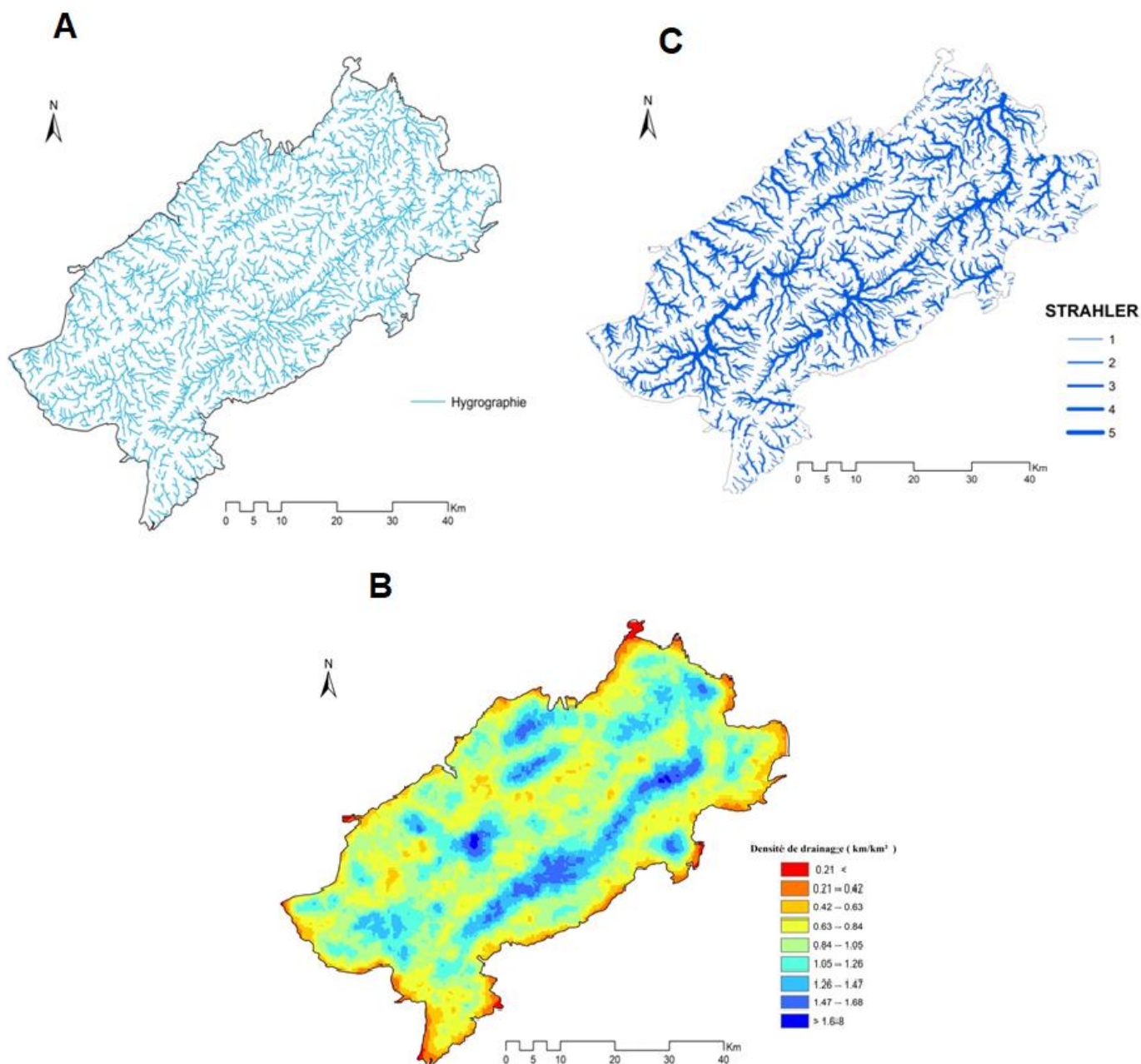


Figure 32. A. Carte de drainage ; B. Carte de densité de drainage ; C. classification de Strahler.

III. ECOULEMENTS SOUTERRAINS DANS LES AQUIFERES KARSTIQUES DES MONTS DE TLEMCEN

La compréhension des écoulements en milieu souterrain représente des enjeux à différents égards : un enjeu humain de par l'utilisation des eaux en usages divers (Potabilité, irrigation, industrie agro-alimentaire, ...etc ; celui environnemental dans le cadre des conséquences des réchauffements climatiques planétaires ; mais aussi un enjeu scientifique puisqu'il permet la conception des mécanismes hydrodynamiques souterrains (Lagrée, 2023).

Ces mécanismes hydrodynamiques dans le sous-sol dépendent de plusieurs facteurs tels que la pluviosité annuelle, les conditions aux limites, les types de limites, l'infiltration dans les sols poreux, les débits des écoulements ainsi que les variations de stockage (Castany, 1982).

Il est important à noter que l'estimation de ces facteurs est souvent sur grande distance (kilométriques), et bien que la période temporelle d'une pluviosité soit annuelle, le renouvellement des eaux est beaucoup plus lent en sous-sol, selon la profondeur, la nature lithologique du terrain mais aussi le type d'infiltration intrinsèque ou par fissuration (Lagrée, 2023).

La présente partie a été dédiée à une illustration des écoulements souterrains dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen. L'intérêt était de compléter les critères du modèle conceptuel des potentialités hydriques souterraines de la zone étudiée. A signaler que par manque de donnée d'une campagne piézométrique ponctuelle, les données hydrogéologiques utilisées sont celles de 60 forages réalisés durant la même année (celle de 2005). De ce fait cette analyse reste subjective et spécifique à la problématique de l'étude.

A. Cartes des écoulements souterrains

Les Monts de Tlemcen constituent sur le plan hydrogéologique un grand réservoir d'eau souterraine par excellence qui pourrait alimenter toute la wilaya. Sur le plan lithostratigraphique il est formé essentiellement de terrains cénozoïques et mésozoïques entouré par des formations plio-quadernaires. Sur le plan structural les Monts de Tlemcen attestent bien la présence de deux systèmes de décrochements de direction SW-NE à WSW-ENE. La lithologie de ces formations est celle de formations imperméables (grès de Boumediene, et marno-calcaire de Raouraï et Hariga) et celles de formations à perméabilité en grand représentées par les dolomies de Tlemcen, de Terny et des Grès de Tortonien.

La plupart des sources émergent à la faveur des failles ou de contacts anormaux (série renversée) qui jouent le rôle d'écran imperméable et constituent parfois des drains actifs. Enfin l'impluvium constitué de sources, formés de terrains karstiques et non karstiques, permet de classer le système karstique comme un système binaire (Benest et al., 1999).

Les cartes piézométrique de la figure 33, A et B démontre que bien qu'il soit difficile de déterminer les aires d'alimentation vu la complexité du terrain karstique, il est cependant possible d'avoir une idée sur le rôle du jurassique comme étant distributeur d'eau bien visible sur la carte tel le contact de ce jurassique situé en zone de rupture de pente avec la plaine de Hennaya, toutes les lignes de courant ont une direction privilégiée SE-NW, avec un axe de drainage dirigée vers la même direction que les lignes de courant, on remarque quelques poches d'affleurement mio-plio-quadernaire du côté NE sûrement alimentées par le jurassique des monts de Tlemcen (Figure 33,A). Afin de mieux comprendre le comportement hydrogéologique dans la zone d'étude il est nécessaire d'avoir plus d'informations sur la karstification du terrain.

Une zone de protubérance vers le NW induisant ainsi une zone d'alimentation assez importante et la morphologie des isopièzes est largement influencée par l'hétérogénéité du milieu (surtout la nature géologique des sols).

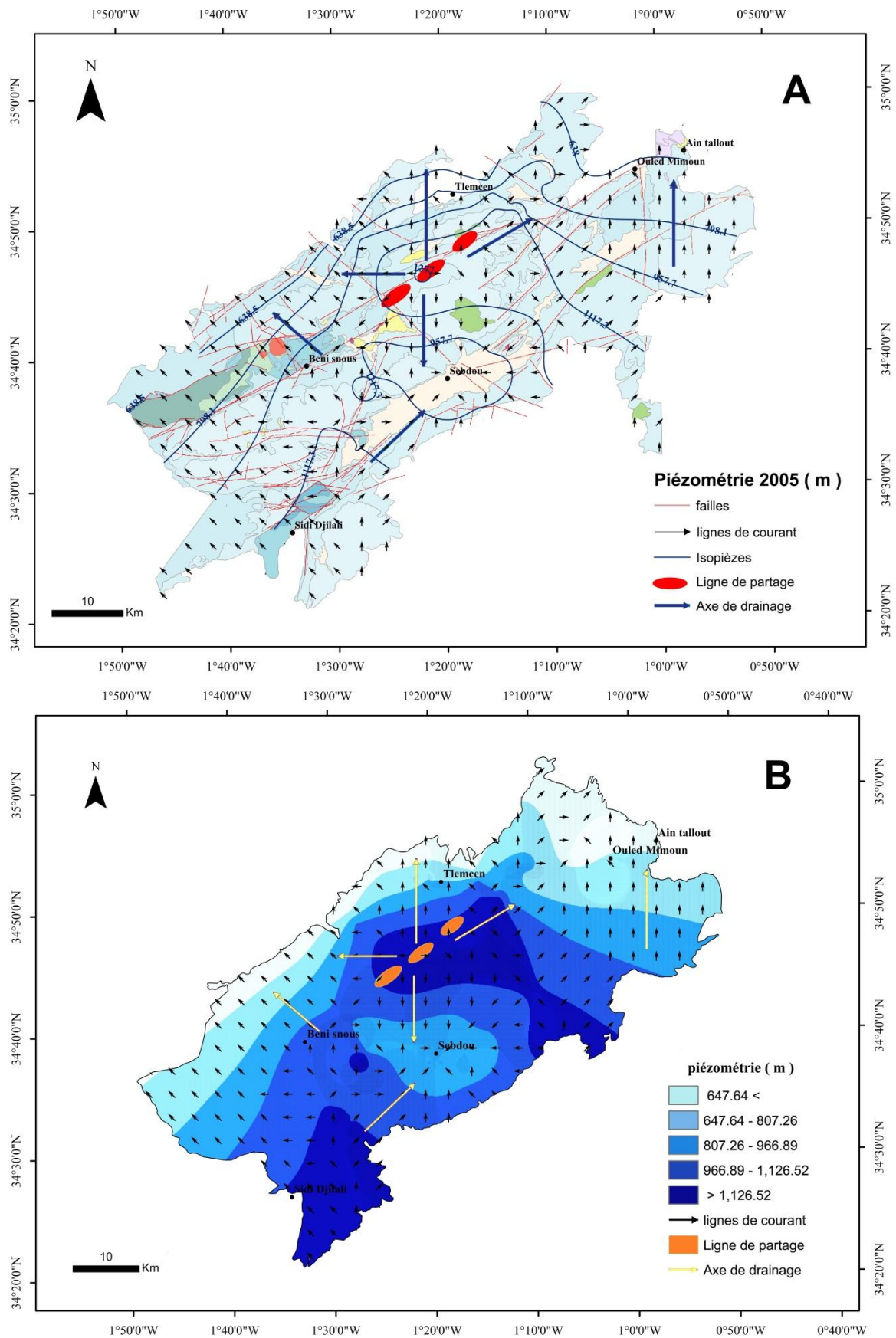


Figure 33. Cartes piézométriques des aquifères kastiques des monts de Tlemcen (2005) : A. avec fond géologique, B. sans fond géologique.

B. Carte des débits

D'après la figure 34 affichant la répartition spatiale des débits d'exploitation des eaux souterraines au niveau des forages des monts de Tlemcen, les débits les plus élevés ($> 15 \text{ m}^3/\text{h}$) sont répartie sur les zones Nord-ouest et est de la région délimitée, alors que les plus faibles débits sont enregistrées au niveau de la dépression plio-quaternaire de Sebdo.

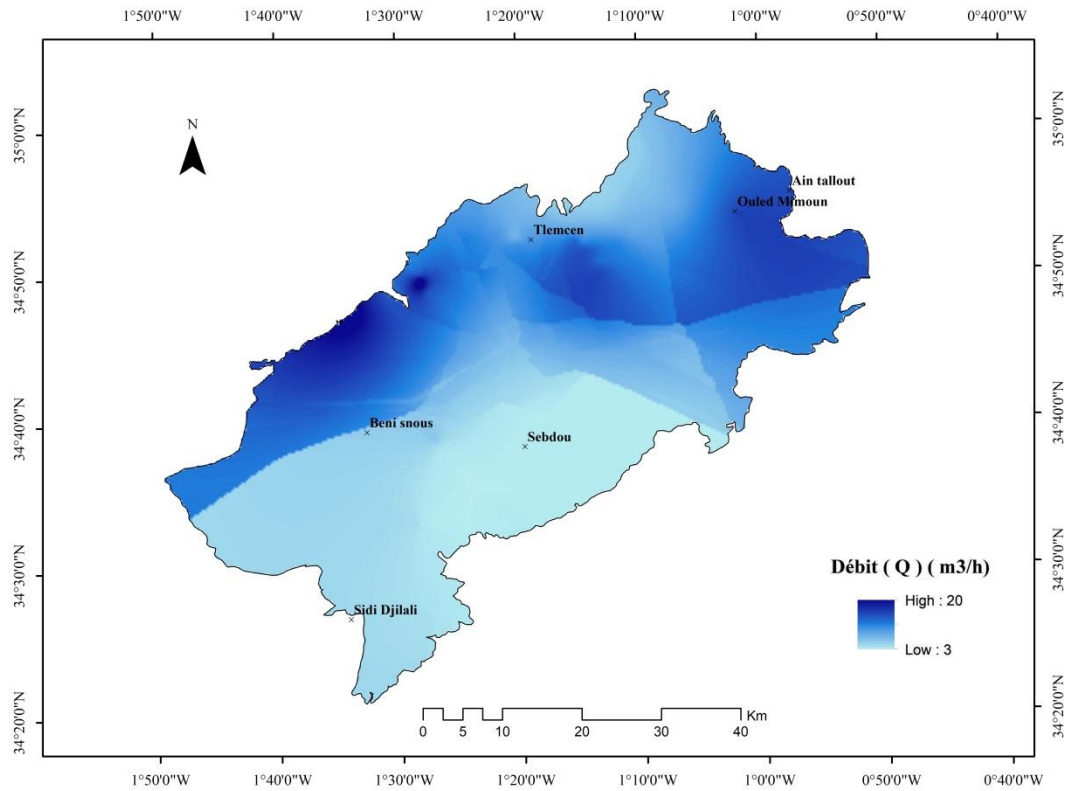


Figure 34. Carte des débits

Quatrième chapitre : **Potentialités des aquifères fissurés dans les monts de TLEMCEN**

Quatrième chapitre : **Potentialités des aquifères fissurés dans les monts de TLEMCCEN**

Dans ce dernier chapitre, la problématique des potentialités en eaux souterraines dans les aquifères fissurés est traité.

I. PREPARATION DES CARTES THEMATIQUES

Neuf paramètres influencent la potentialité de l'eau souterraine dans le secteur considéré : la pente (%), l'infiltration efficace (mm), densité de drainage (Km/km², densité de fracturation (km/km²), épaisseur d'altération, Profondeur total (m), indice de succès (%), Niveau statique (m), et débit d'exploitation (m³ /h). Ces facteurs sont censés contrôler la recharge et les écoulements (Masoud, 2022). Cependant, ils seront répartis en trois critères qualifiés (Disponibilité accessibilité et exploitabilité), présentés sous forme de carte thématique :

A. Critère de disponibilité en eau

Ce critère est calculé sur la base de données des paramètres : Pente (%), l'infiltration efficace (mm), densité de drainage (Km/km², densité de fracturation (km/km²), et les épaisseurs d'altération, déterminés préalablement au chapitre précédent.

Les valeurs des cinq paramètres sont considérées dans le tableau 3.

Tableau 3. Valeurs de paramètres du critère de disponibilité en eau (CDE)

Paramètre	Poids	Classes	Note	Valeurs
Pente (%)	0.25	>4	1	0.25
Infiltration efficace (mm)	0.50	10-25	1	0.50
Densité de drainage (km/km ²)	0.05	<5	9	0.45
Densité de fracturation (km/km ²)	0.12	1-5	1	0.12
Epaisseur d'altération (m)	0.08	40-78	9	0.72
Résultat du CDE	2.04			

Les résultats du critère CDE montrent que la valeur est estimée sur l'ensemble de la zone délimitée à 2.04 (tableau 3), l'égalité de cet indicateur rendra la spatialisation homogène sur toute la surface, a cet effet, sa carte thématique a été négligée.

B. Critère d'accessibilité en eau

Par rapport à l'accessibilité en eau, les deux paramètres qui le représentent ont été préparés par calcul de l'indice de succès en utilisant son équation (page 29 du Chapitre 2), et par déduction de l'épaisseur d'altération en se basant sur la carte géologique et les données de forages fournies par CTS d'Arzew (Tableau 4).

Tableau 4. Valeurs de paramètres du critère d'accessibilité en eau (CAE).

Paramètre	Poids	Classes	Note	Valeurs
Indice de succès (%)	0.25	0-20	1	0.25
		20-40	3	0.75
		40-60	5	1.25

		60-80	8	2
		80-100	10	2.5
Profondeur totale (m)	0.75	52-70	7	5.25
		70-85	5	3.75
		85-95	1	0.75
Résultat du CAE		9.75-30.75		

C. Critère d'exploitabilité en eau

Les niveaux statiques et les débits d'exploitation utilisés sont déduits directement des données des 60 forages réalisés en année 2005 délivrés par le CTS. Ces paramètres caractérisent le critère d'exploitabilité. Son calcul est donné dans le tableau 5 .

Tableau 5. Valeurs de paramètres du critère d'exploitabilité en eau (CEE).

Paramètre	Poids	Classes	Note	Valeurs
Niveau statique (m)	0.25	5-15	8	2
		15-25	6	1.5
		25-40	3	0.75
		40-54	1	0.25
Débit d'exploitation (m³ /h)	0.75	3-5	5	3.75
		5-8	8	6
		8-25	9	6.75
Résultat du CEE		4 - 8.75		

II. RESULTATS ET VALIDATION

La validation des cartes thématiques : carte d'exploitabilité, d'accessibilité ainsi que la carte finale de potentialités en eau souterraine, est précédée par calcul des incertitudes. Les niveaux de confiance des différents critères sont déduits des valeurs du facteur d'expansion (k) calculé sur la base des valeurs d'incertitude sur la moyenne, de l'écart type ainsi que la valeur extrême de la série de données (Voir chapitre 2). Ces dernières sont réalisées sur les moyennes des divers résultats des principaux critères liés à cette étude.

Notons que l'estimation des valeurs d'incertitude et de facteurs d'expansion, a donné des niveaux de confiance variant de 68% et 99%. Ils sont de 68% pour la carte d'accessibilité, de 95% pour la carte d'exploitabilité, ainsi un niveau de confiance de 99% pour la carte des résultats finals relatifs à la carte de potentialités en eau souterraine dans les monts de Tlemcen.

Une similitude de la spatialisation des deux cartes thématiques représentatives de l'accessibilité et l'exploitabilité est observée sur la figure 35, A et B :

Une délimitation horizontale de direction ouest – est divise le secteur considéré en deux zones : la première est localisée au nord – est caractérisée par une bonne à excellente accessibilité et exploitabilité des eaux souterraines ; la deuxième située au sud – ouest, affiche

des classes médiocres à mauvaises par rapport aux dit-critères surtout au environ de la région de Sebdou (Figure 35, A ,B).

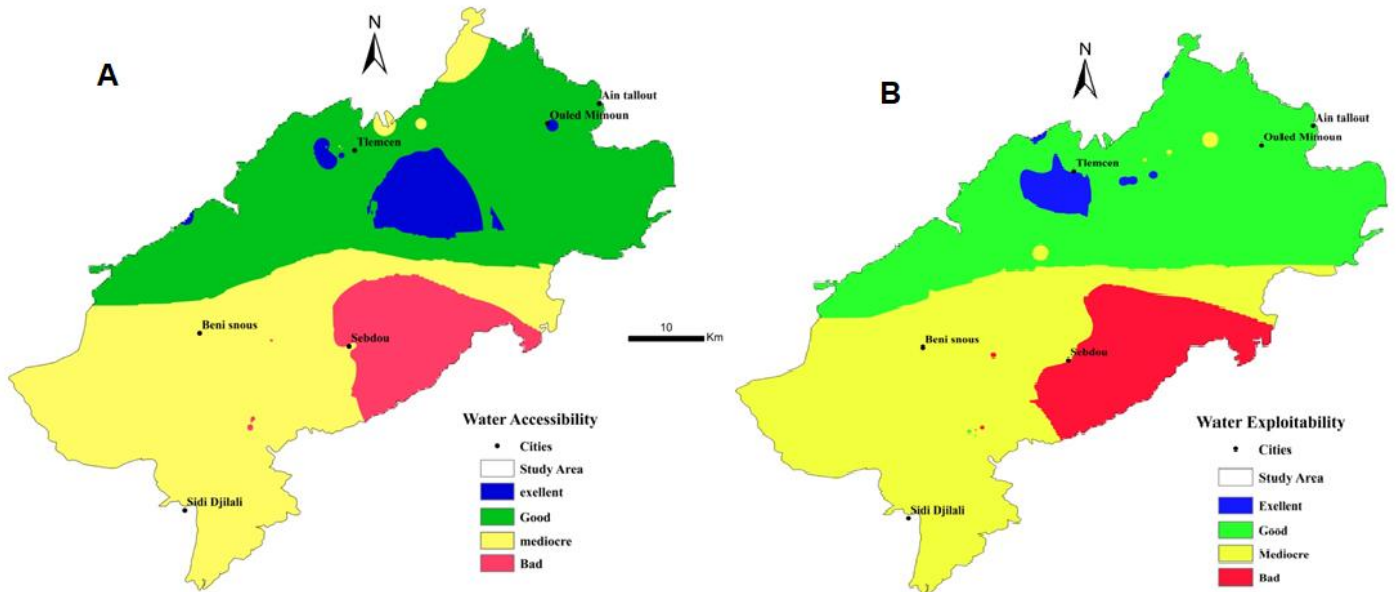


Figure 35. Cartes thématiques. A. Carte d'accessibilité, B. Carte d'exploitabilité.

La carte finale des potentialités en eau issue de la combinaison linéaire des cartes de disponibilité, accessibilité et d'exploitabilité selon leur coefficient de pondération est illustrée sur la figure 36 :

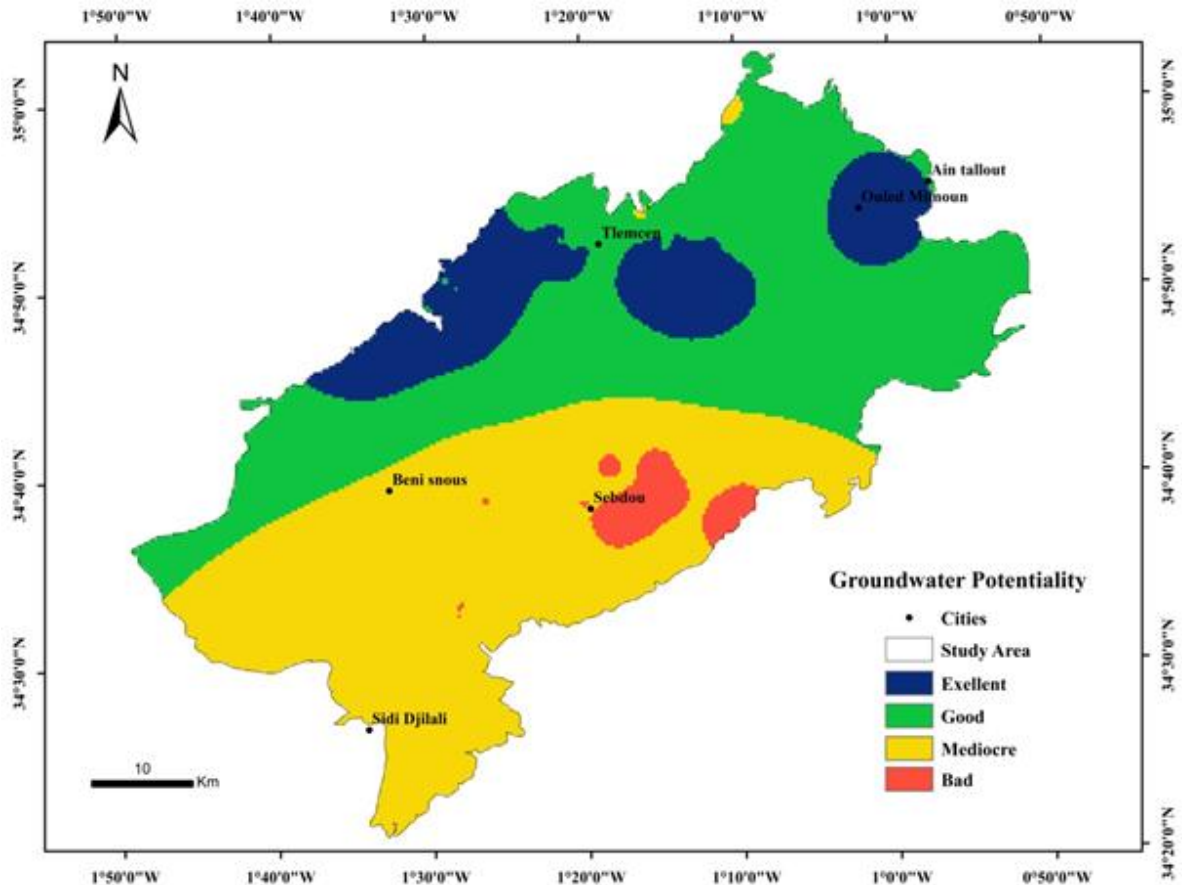


Figure 36. Carte de potentialité des eaux souterraines des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen.

Pour les aquifères karstiques des monts de Tlemcen, les zones de potentialités bonne à excellente occupent plus de 65% du domaine d'étude (Figure 36). Elles se localisent globalement dans la partie nord du domaine délimité. L'excellente classe se présente sous forme de petites plages disséminées dans l'extrême nord-Est (aux alentours de la localité de Oued Mimoun) et au Nord-Ouest (proche de la ville de Tlemcen) (Figure 36).

La zone à potentialité faible est relativement réduite, elle se trouve au sud à proximité dans la localité de Sebdoou.

III. DISCUSION

La réalisation de la carte analytique de la zone de potentiel hydrique souterrain par analyse d'approche intégrée par l'association des techniques de télédétection, SIG et l'analyse décisionnelle multicritères (MCDA), a permis de montrer un important outil pour l'évaluation du potentiel hydrogéologique des monts de Tlemcen.

Les aquifères jurassiques fissurés des monts de Tlemcen montrent des variations importantes du degré de la potentialité en eau souterraine.

La zone d'étude a une disponibilité continue et homogène représentée par une valeur unique. Cette disponibilité pourrait être expliquée par les faibles pentes et des densités de

fracturation élevées. Ces deux paramètres sont susceptibles de favoriser la recharge des aquifères (Shankar et al.2006 ; Inaytoulaye, 2023).

L'accessibilité et l'exploitabilité sont dominées par les classes médiocre et bonne avec un cumul couvrant les 75% de la zone étudiée. Ces deux classes divisent le secteur en partie nord-est caractérisée par des profondeurs de 98m, avec des taux de succès élevés (supérieurs à 72%). L'exploitabilité de cette partie du domaine est assez bonne représentée par des débits d'exploitation élevés ($7.2\text{m}^3/\text{h}$).

Les zones favorables à l'installation de forage se localisent en extrême nord-est, au tour de la localité de Ouled Mimoun et au nord-ouest de la ville de Tlemcen, ces zones correspondent aux zones de décharge des aquifères avec des flux d'écoulements assez important (Voir figure 33).

Il est important aussi rajouter que les zones à potentialité mauvaise localisées dans la région de Sebdou au sud des monts de Tlemcen, correspondent aux formations d'âge Quaternaire (Holocène) constituées d'alluvion ancien et récente.

CONCLUSION

Conclusions

Les principaux résultats obtenus dans cette étude consacrée à la spatialisation des potentialités en eau souterraine des aquifères fissurés des monts de Tlemcen, seront ici brièvement résumés:

- Sur le plan télédétection

La carte des faciès des monts de Tlemcen réalisée, en coïncidant à la fois les traitements des images satellitaires, et les cartes géologiques géoréférencées sous ArcGIS, confirment les affleurements dominants d'âge jurassique (Calcaires, dolomies, grès et argiles) dans le secteur d'étude.

L'extraction des failles réelles affiche une zone à forte densité de fracturation dans la partie ouest des monts de Tlemcen. Cette zonation est confirmée par la densité des linéaments issus de la télédétection (1.95 à 2.37 km/km²), qui sont orientés dans la direction préférentielle SW-NE et W-E. Ces linéaments correspondent majoritairement au placement des failles réelles aux directions dites telliennes déjà confirmées par des travaux antérieurs.

- Sur le plan morphométrique

Les monts de Tlemcen délimité dans ce travail sur une superficie drainée de 2838.78 km² et un périmètre de 383.26 km ont une variation altimétrique comprise entre 374 et 1830 m, avec une dominance des altitudes élevées (800 à 1200m) sur l'ensemble des monts de Tlemcen. Les pentes de ses reliefs varient entre 0 et 64%.

Le réseau de drainage dans ce secteur considéré a une forme dentritique avec des petits drains légèrement parallèles aux extrémités et une densité de drainage moyenne de 0.94 km²/km, et une classification de ses cours d'eau d'ordre 5.

- Sur le plan écoulement souterrain

La piézométrie établie par les données disponibles, démontre que toutes les lignes de courant ont une direction privilégiée SE-NW, avec un axe de drainage dirigé vers la même direction que les lignes de courant. On remarque quelques poches d'affleurement mio-plio-quadernaire du côté NE surement alimentées par le Jurassique des monts de Tlemcen. Ces informations restent subjectives de par le manque d'information sur la karstification du terrain.

- Sur le plan potentialité en eau souterraine

Dans un but d'essai de méthode de prospection hydrogéologique en vue d'implantation de forage, la spatialisation de la potentialité en eau dans les milieux karstiques des monts de Tlemcen a eu lieu.

Les critères accessibilité et l'exploitabilité en eau sont dominées par les classes médiocre et bonne, couvrant 75% de la zone étudiée. Ces deux classes localisées au Nord-Est, caractérisées par des profondeurs de forage supérieurs à 98m, avec des taux de succès élevés (>72%). L'exploitabilité de cette partie du domaine est assez bonne. Elle est représentée par des débits élevés (7.2 m³/h).

Les zones très favorables à l'installation de forage se localisent en extrême nord-est, au tour de la commune de Ouled Mimoun et au Nord-Ouest de la ville de Tlemcen. Ces zones correspondent aux zones de décharge des aquifères avec des flux d'écoulements assez importants. Les zones à potentialité mauvaise se situent dans la région de Sebdu au sud des monts de Tlemcen, constituées d'alluvions ancienne et récente d'âge Quaternaire (Holocène).

Comme perspectives :

A l'issue de cette étude qui constitue une première contribution à l'estimation des potentialités en eau dans les monts de Tlemcen, par utilisation de l'analyse décisionnelle multicritères (MCDA), de nombreuses perspectives nous apparaissent, en particulier:

- Actualiser les données piézométriques du secteur d'étude, et mettre en place un réseau de piézomètres pour suivre les fluctuations mensuelles des niveaux statiques des différents systèmes aquifères du domaine des monts de Tlemcen ;
- Délimiter le bassin versant réelle (hydrogéologique) du secteur ;
- Intégrer d'autres critères dans l'approche : Occupation du sol, pollution des eaux, drainage de surface, et précipitations, ...
- Compléter l'approche par l'association de l'étude géophysique, mais aussi l'intérêt socio-économique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Ablaoui (2007). Structure et fonctionnement de trois émergences karstiques des monts de Tlemcen à partir des réponses hydrologiques et hydrochimiques. *Mémoire de Magister*, Université d'Oran, 169p.

Akkari, D., (2022). L'apport du système d'information géographique (SIG) dans la définition des zones de potentiel hydrique dans le bassin versant Abou Ali (Liban Nord). *Journal of Alpine Research* (110-4). <https://doi.org/10.4000/rga.10015>.

Al-Sulaiman1 F.A., Al Fahdawi2 S.S.A., Al Qaisy S.A.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* 22, p1-13 .

Ba, F., Bouchard, C. & Abi-zeid, I. (2011). Analyse multicritère pour la priorisation des interventions en matière d'approvisionnement en eau en milieu rural au Sénégal : cas de la région de Diourbel. *rseau* 24, 9–22. <https://doi.org/10.7202/045824ar>

Bakalowicz, M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. *Thèse de doctorat d'état*, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6-, Paris, 254 p.

Benest M. (1971). Importance des mouvements de coulissage et de rotation dans la mise en place de la partie occidentale de la dépression de Sebdou (Monts de Tlemcen, Algérie). *Bulletin de la Société d'histoire naturelle d'Afrique du Nord*, t. 62, fasc. 1-2, pp. 21-38.

Benest M. (1982). Importance des décrochements sénestres (N-S) et dextres (E-W) dans les Monts de Tlemcen et de Daïa (Algérie Occidentale). *Revue de Géologie dynamique et de Géographie physique*, 23, pp. 345-362.

Benest M. (1985). Evolution de la plate-forme de l'Ouest Algérien et du Nord-Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : stratigraphie, milieux de dépôt et dynamique sédimentaire. Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon, n°95, 581 p. 188.

Benest M. et Elmi, S. (1969). Précisions stratigraphiques sur le Jurassique inférieur et moyen de la partie méridionale des monts de Tlemcen (Algérie). C.R. som. Soc. Géol. France, Paris, fasc.8,

Benest M., Bensalah M., Bouabdellah H. & Ouardas T. (1999). La couverture Mésozoïques et Cénozoïque du domaine Tlemcenien (Avant-pays Tellien d'Algérie Occidentale): Stratigraphie, paléoenvironnement, dynamique sédimentaire et tectogenèse Alpine. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, vol .10, n°2, p.127-157.

Bensaoula F., Bensalah M., Adjim M. (2005). Les forages récents dans les aquifères karstiques des monts de Tlemcen, *Larhyss Journal*, n°4, pp. 7-15

Bensefia K.E. (2021). Les dépôts Triasiques de l'Oranie : Géométrie et caractérisation minéralogique et géochimique des argiles. *Thèse de Doctorat*, Université de Tlemcen, 177p.

Bonnet M., Delarozier-Bouillin O., Jusserand Cl. & Rou P. (1970). Calcul automatique des 'Bilan d'eau' mensuels et annuels par les méthodes de Thornthwaite et de Turc. BRGM: 70 SGN 107 HYD, 20 p.

Bouadoud A., Bensaber I. & Assabar N. (2013). Utilisation du SIG pour la cartographie urbaine (cas de la ville de Fès). *PROJET TUTEUR*, Département de l'Environnement, FST, FES, MAROC, 41p.

Collignon B. (1984). Contribution de la spéléologie à la compréhension de l'hydrogéologie des Monts de Tlemcen. *Colloque de l'eau, clé du développement au Maghreb, Oran*, pp.3-12.

Collignon B. (1986). Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des monts de Tlemcen (Algérie). *Thèse de Doctorat*, Université d'Avignon, 282 p.

Coulibaly I. (1996). Interprétation structurale des linéaments par traitement d'image satellitaire : Cas des sous provinces d'Abitibi et d'Opatica (Quebec). *Mém. de Maitrise des sciences en télédétection. Dépt. Géol. Tel, UnivSherbrooks, Canada*, 106p.

Doumouya, I., Dibi, B., Kouame, K.I., Saley, B., Jourda, J.P., Savane, I. & Biemi, J. (2012). Modelling of favourable zones for the establishment of water points by geographical information system (GIS) and multicriteria analysis (MCA) in the Aboisso area (South-east of Côte d'Ivoire). *Environmental Earth Sciences* 67, 1763–1780. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1622-2>.

El Janyani S. (2013). Incidence des bétoires et de la karstogenèse des plateaux crayeux de la Haute-Normandie sur le fonctionnement hydrologique de l'aquifère de la craie Modélisation hydrogéologique des influences climatiques à différentes échelles spatio-temporelles. *Thèse de Doctorat, UFR des Sciences et Techniques, Université de Rouen*, 239 p.

Elmi S. (1970). Rôle des accidents décrochant de direction SSW-NNE dans la structure des Monts de Tlemcen (Ouest algérien). *Bulletin de la Société d'histoire naturelle d'Afrique du Nord*, t. 61, 3-4, pp. 3-8.

Franke R. (1982). Scattered data Interpolation: Tests of some methods. *Mathematics of Computation*, vol. 38, p. 181–200.

Gams, I. (1993). Origin of the term "karst", and the transformation of the Classical Karst (Kras). *Environmental Geology* 21, pp.110–114.

Gautier M. (1952). Le barrage des Beni-Bahdel et la conduite d'Oran, éléments de technologie des barrages algériens et de quelques ouvrages annexes, XIXème congrès géologique international, Alger 1952.

Garba O.M. (2012). Apport de la télédétection à l'étude de la fracturation : Exemple : Les Monts de Tlemcen (SS), *Dipl. Master*, Univ. Tlemcen, 41 p., 26 fig., 5 tab.

Gevin P. (1952). Le projet de barrage sur l'oued Meffrouch, éléments de technologie des barrages Algériens et de quelques ouvrages annexes, XIXème congrès géologique international, Alger 1952.

Ghibeche 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., 45 fig., 14tab.

Gratton Y. (2002). Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. *Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique*, 1(4), 4p.

Hyann, P., Naga, C., Honoré, C.T.J. & Issiaka, S. (2015). Cartographie des potentialités en eaux souterraines par l'utilisation de l'analyse multicritère et les SIG : Cas du district du denguele (nord- ouest de la côte d'ivoire). *European Scientific Journal vol.11, No.35 ISSN: 1857 – 7881*, pp.106-122.

Inaytoulaye S.G., Saley A.K.H., Sandao, I. & Garba, I. (2023). Application of a Multi-Criteria Approach for the Assessment of Groundwater Potential in the Basement Zone: A Case of Tamou (South West Niger). *International Journal of Geosciences* 14, 1–18. <https://doi.org/10.4236/ijg.2023.141001>.

Jeannin P.Y. (1996). Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques. *Thèse de doctorat*, université De Neuchâtel, 244 p.

Kouassi, W.F., Kouassi, K.A., Mangoua, M.J., Kamenan, Y.M. & Kouadio, Z.A. (2019). Evaluation des potentialités en eau souterraine de la portion Ivoirienne du bassin versant du Niger. *International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 25 No. 2*, pp. 774-784.

Laoufi A. (2020). Apport de la teledetection et des sig pour la cartographie hydrologique et hydrogéologique cas du bassin versant d'isser (l'Algérie nord occidentale) . *Thèse master* , Univ. Tlemcen 52 p., 42 fig .

Lasgaa I. (2012). Le berriasien de la region d'ouled mimoun:micropaleontologie, sedimentologie et paleoenvironnements (tlemcen , algerie nord occidentale) . *Thèse Magister*, Univ. Tlemcen , 61 p., 15 fig.

Lillesand T.M. & Kiefer R.W.(2000). Remote sensing and image interpretation , John wiley & Sons , Inc., New York, N.Y., pp 470-615

Mangin, A. (1978). Le karst, entité physique abordé par l'étude du système karstique, *Colloque de l'Association des Géologues du Sud-Ouest*, Tarbes, pp. 21-37.

Marok A. (1996). Stratigraphie, sédimentologie et interprétations géodynamiques du Lias-début de Dogger : Exemple de sédimentation carbonatée de plate-forme en Oranie (Monts de Sidi El Abed, hautes-plaines Algérie Occidentale). *Thèse Magister*, Univ. Lyon I, 199 p., 89 fig.

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>

Menad W.(2018). université Hassiba benbouali de CHLEF faculté Génie civil et Architecture _ système d'informations géographique 2017/2018

Nusret D. & Đug S. (2012). Application of the Inverse Distance Weighting and Kriging Methods of the Spatial Interpolation on the Mapping the Annual Amount of Precipitation in Bosnia and Herzegovina. *International Environmental Modelling and Software Society (IEMSS)*, Leipzig, Germany.

Pepay-Peyroula E. (2012). manuel de cours : Physique, chapitre 5 : les ondes électromagnétiques , Univ Joseph Fourier de Grenoble , 2012 .

Shankar, R.M.N. and Mohan, G. (2006) Assessment of the Groundwater Potential and Quality in the Bhatsa and Kalu River Basins of Thane District, Western Deccan Volcanic Province of India. *Environmental Geology*, 49, 990-998. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0137-5>.

Taleb A. (2004). Etude du fonctionnement de l'écosystème oued. Rôle du milieu hyporhéique dans l'évolution de la qualité des eaux en aval du barrage de Hammam Boughrara sur la Tafna. *Thèse de Doctorat*. Université de Tlemcen, 104 p.

Tarmoul S. (2018). Etude comparative de l'écoulement sur les bassins versants endoréiques du Hodna et des Hauts plateaux constantinois. Cas d'étude des oueds L'ham, Lougmane, Soubella et chemorah (Algérie orientale). *Thèse de Doctorat 3ème cycle (L.M.D.)*, Université de Constantine 1, 251 p.

Thorntwaite C.W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38, pp. 55-94.

Watson D.F. & Philip G.M. (1985). A refinement of inverse distance weighted interpolation , *geotraitement 2* :315-327 .

Yao A. B., Goula B.T.A., Kane A., Mangoua M. J. & Kouassi K. A. (2016). Cartographie du potentiel en eau souterraine du bassin versant de la Lobo (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire) : Approche par analyse multicritère. *Hydrological Sciences Journal (1-12)*, pp. 857-867. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.932360>

Yebdri L. (2023) - Etude de la vulnérabilité des eaux du bassin versant de la Tafna (Algérie, Nord-Occidentale). *Thèse de Doctorat*, Université de Tlemcen, 212p.

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/riq.21.43-71>.

Zekri N. (December 2021). Cartographie de la vulnérabilité potentielle des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant de Tafna (Nord-Ouest Algérien) , *Rev. Mar. Agron. Vét* 9(4) , p608-615.

Web graphiques

<http://www.franckvidal.fr/pages/intro--teledetection/28962794.html>

<https://sigesocc.brgm.fr/spip.php?article468>

<https://www.nasa.gov>

LISTE FIGURES ET TABLEAUX

Liste des figures

Figure		Pages
Figure 1	Les différents compartiments hydrauliques d'un aquifère karstique (D'après Smart et Friedrich, 1986 <i>in</i> El Janyani, 2013)	5
Figure 2	Les deux types de systèmes karstiques (BRGM, 2022)	6
Figure 3	Schéma représentant un paysage karstique (BRGM, 2022)	6
Figure 4	Rayonnement et spectre électromagnétiques (Lillesans et Kiefer, 2000)	7
Figure 5	Signature spectrale de quelques éléments	8
Figure 6	Différentes étapes de la télédétection (Chuvico 1990)	9
Figure 7	Composantes du SIG (Bouadoud et al., 2013)	10
Figure 8	Types des formats d'images d'un SIG (Ghabeche, 2011)	11
Figure 9	Situation générale des Monts de Tlemcen (<i>s.s</i>) (D'après Beneste, 1985)	12
Figure 10	Réseau hydrographique du bassin versant de la Tafna (Yebdri, 2023)	13
Figure 11	Carte structurale des Monts de Tlemcen au sens large (d'après BENEST, 1982)	14
Figure 12	Carte géologique de Tlemcen (Extrait de la carte géologique de l'Algérie-Oran Nord au 1/500 000, modifiée) (<i>in</i> Yebdri, 2023)	16
Figure 13	Série lithostratigraphique type des Monts de Tlemcen (<i>s.l.</i>)(D'après Benest et al., 1999)	17
Figure 14	A. Image satellite Landsat 8, B. Modèle numérique de terrain, de la zone d'étude	18
Figure 15	Carte géologique de la région de Tlemcen (ARNH, 2006)	19
Figure 16	Carte géologique de la région de Telagh (ARNH, 2006)	20
Figure 17	Localisation des forages dans les monts de Tlemcen	21
Figure 18	Interface ENVI (<i>Version 4.5</i>)	22
Figure 19	A. une image en couleurs réelles (432) ; B. en fausses Couleurs (532)	23
Figure 20	Courbe statistique de l'ACP classique	24
Figure 21	Courbe statistique de l'ACP sélective	24
Figure 22	Architecture générale de l'ArcGIS (Menad , 2018)	26
Figure 23	Etapes de traitement de l'image landsat8	33
Figure 24	Filtres directionnels 0°, 45°, 90° et 135°	34
Figure 25	Carte de faciès des monts de Tlemcen	35
Figure 26	Failles issues de la carte géologique	36
Figure 27	Carte des linéaments issue par la télédétection	36
Figure 28	Carte de densité des linéaments	37
Figure 29	Rosace directionnelle de la fracturation	37
Figure 30	Carte altimétrique des monts de Tlemcen	38
Figure 31	Carte des pentes des monts de Tlemcen	39
Figure 32	A. Carte de drainage ; B. Carte de densité de drainage ; C. classification de Strahler	40
Figure 33	Cartes piézométriques des aquifères karstiques des monts de Tlemcen (2005) : A. avec fond géologique, B. sans fond géologique	42
Figure 34	Carte des débits	43
Figure 35	Cartes thématiques. A. Carte d'accessibilité, B. Carte d'exploitabilité	46
Figure 36	Carte de potentialité des eaux souterraines des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen	47

Liste des tableaux

		Pages
Tableau 1	Caractéristiques des bandes Landsat 8 (Al-sulaiman et <i>al</i> , 2017)	9
Tableau 2	Classification et standardisation des paramètres (Hyann et al., 2015 ; Yao et al., 2016)	29
Tableau 3	Valeurs de paramètres du critère de disponibilité en eau (CDE)	44
Tableau 4	Valeurs de paramètres du critère d'accessibilité en eau (CAE)	44
Tableau 5	Valeurs de paramètres du critère d'exploitabilité en eau (CEE)	45

ANNEXE

Annexe I : les déferentes paramètres des 5 stations étudiées

Stations	Paramètres	Jan.	Fev.	Mar.	Avl.	Mai.	Jui.	Juil.	Aout.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	inter annuel
Benbadis	P (mm)	61.22	47.59	60.82	57.13	48.38	14.32	6.35	13.82	33.48	46.99	67.73	52.5	510.4
Latitude (34.9468)	T (C°)	8.12	9.41	12.08	14.71	18.66	23.55	27.59	27.58	23.16	18.29	12.62	9.4	17.1
Longitude (-0.8355)	ETP (mm)	13.69	17.5	33.28	50.36	85.99	130.99	177.46	167.2	108.18	66.46	30.08	17.44	898.69
	ETR (mm)	13.69	17.5	33.28	50.36	85.99	88.65	6.35	13.82	33.48	46.99	30.083	17.44	437.69
	R (mm) (inter annuel)	54.87												
	I (mm) (inter annuel)	17.83												
Tlemcen	P (mm)	60.59	48.62	57.46	50.32	43.75	11.91	5.74	12.73	31.01	45.3	67.39	50.06	484.91
Latitude (34.8746)	T (C°)	9.47	10.58	12.96	15.31	18.94	23.46	27.32	27.53	23.58	19.17	13.85	10.76	17.74
Longitude (-1.3122)	ETP (mm)	16.82	20.21	35.8	51.72	85.46	127.47	172.37	164.9	109.61	70.06	33.82	20.84	909.13
	ETR (mm)	16.82	20.21	35.8	51.72	85.46	62.64	5.74	12.73	31.01	45.3	33.82	20.84	422.13
	R (mm) (inter annuel)	45.98												
	I (mm) (inter annuel)	16.79												
Beni snouss	P (mm)	55.26	46.26	55.82	48.73	41.59	11.8	7.23	14.74	31.74	45.01	60.48	46.57	465.27
Latitude (34.6197)	T (C°)	6.91	8.31	11.11	13.78	17.78	22.73	26.86	26.73	22.2	17.23	11.42	8.14	16.1
Longitude (-1.7007)	ETP (mm)	12.08	16	31.83	48.7	82.89	126.14	170.57	160.87	103.96	63.53	28.2	15.63	860.44
	ETR (mm)	12.08	16	31.83	48.7	82.89	67.97	7.23	14.74	31.74	45.01	28.2	15.63	402.06
	R (mm) (inter annuel)	45.34												
	I (mm) (inter annuel)	17.86												
Sidi djilali	P (mm)	50.6	40.83	51.4	45.01	38.51	11.53	5.99	13.96	30.38	42.36	56.85	41.17	428.65
Latitude (34.3979)	T (C°)	5.93	7.39	10.26	13.09	17.31	22.49	26.74	26.47	21.69	16.46	10.48	7.16	15.46
Longitude (-1.5332)	ETP (mm)	10.26	14.24	29.66	46.89	81.91	126.13	170.61	159.5	101.98	60.92	25.94	13.67	841.77
	ETR (mm)	10.26	14.24	29.66	46.89	81.91	54.92	5.99	13.96	30.38	42.36	25.94	13.67	370.24
	R (mm) (inter annuel)	37.05												
	I (mm) (inter annuel)	21.35												
Sebdou	P (mm)	51.87	41.85	52.25	46.14	40.3	11.81	6.14	14.31	30.84	44.53	58.27	42.2	440.55
Latitude (34.6491)	T (C°)	5.93	7.39	10.26	13.09	17.31	22.49	26.74	26.47	21.69	16.46	10.48	7.16	15.46
Longitude (-1.3231)	ETP (mm)	10.26	14.24	29.66	46.89	81.91	126.13	170.61	159.5	101.98	60.92	25.94	13.67	841.77
	ETR (mm)	10.26	14.24	29.66	46.89	81.91	61.26	6.14	14.31	30.84	44.53	25.94	13.67	379.69
	R (mm) (inter annuel)	40.22												
	I (mm) (inter annuel)	20.63												

P : Précipitation (mm) ; T : température (C°) ; ETP : Evapotranspiration potentielle (mm) ; ETR : Evapotranspiration réelle (mm) ; R : ruissellement (mm) ; I : infiltration efficace (mm)

