

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, de la Terre et de l'Univers

Département D'Ecologie et Environnement

Laboratoire de recherche n°31

Gestion conservatoire de l'eau, des sols et des forêts et développement durable de zones montagneuses de la région de Tlemcen



**Annnonce de soutenance  
THESE**

Présentée pour l'obtention du **grade** de DOCTORAT SCIENCES

En : Ecologie Végétale

Par : ENNEBATI MOHAMMED EL AMIN

**POTENTIALITES HYDRO-AGRICOLES DE LA REGION SUD DE TLEMCEEN EN  
VUE D'UNE GESTION DURABLE DES PARCOURS STEPPIQUES**

Soutenue publiquement, le 09 Avril 2026., devant le jury composé de :

Nom/Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
MERZOUK Abdessamad	Prof	Président	Univ. Tlemcen
HADDOUCHE Driss	Prof	Directeur de Thèse	Univ. Tlemcen
BACHIR BOUIADJRA Salah Eddine	Prof	Examineur	Univ. S-B-A
BOUDJEMAA Abderezzak	MCA	Examineur	Univ. Tlemcen
BENTEKHICI Nedjla	MRA	Examinatrice	Centre des Techniques Spatiales Arzew, Oran
AMARA Mohammed	MCA	Examineur	Univ. Ain-Temouchent

Année universitaire 2024-2025

## REMERCIEMENT

*Je rends grâce à Dieu pour m'avoir accordé la force de persévérer, la lucidité d'écrire, et la patience d'aller au bout de ce parcours. Je Lui suis reconnaissant de m'avoir permis de réaliser ce rêve et d'éprouver la joie sincère de lever les mains vers le ciel en murmurant « Yakayoum ».*

*J'exprime ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, le Professeur Driss HADDOUCHE, pour la confiance qu'il m'a témoignée, la clarté de ses orientations, la rigueur de son encadrement et la bienveillance avec laquelle il a guidé mes pas durant toutes ces années de recherche.*

*Mes sincères remerciements vont également à l'ensemble des membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce travail avec attention et générosité.*

*Je n'oublie pas mes enseignants, dont l'engagement et la transmission du savoir ont façonné mon parcours académique et nourri ma curiosité scientifique.*

*Je souhaite exprimer une gratitude toute particulière à mon épouse, pour son soutien constant, sa compréhension et sa patience inépuisable. Ses encouragements et sa présence à mes côtés ont été une source essentielle de courage et d'équilibre.*

*Enfin, mes remerciements les plus sincères vont à ma famille, mes amis et à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce modeste travail.*

## **DEDICACE**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*À ma mère, pour son amour inconditionnel, sa tendresse et les sacrifices consentis afin d'assurer mon bonheur et ma réussite.*

*À mon père, modèle de sagesse et de persévérance, pour son soutien constant, ses encouragements et la confiance qu'il m'a toujours témoignée.*

*À mon épouse, dont la patience, la compréhension et le soutien indéfectible ont accompagné chacune des étapes de ce travail. Sa présence bienveillante et son encouragement quotidien ont été pour moi une source essentielle de motivation.*

*À mon fils Adam, dont la joie et la spontanéité ont apporté lumière et équilibre tout au long de cette période.*

*À mes frères, pour leur affection et leur appui.*

*À mes amis, pour leur fidélité et leurs encouragements.*

*À tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

## RESUME

Les parcours steppiques algériens jouent un rôle stratégique dans l'économie agricole nationale. Cependant, la gestion durable des ressources en eau dans ces milieux semi-arides reste largement insuffisante, souvent négligée par les autorités locales, malgré son importance cruciale pour le développement rural.

Cette étude porte sur une zone de 3 200 km<sup>2</sup> située au sud de la wilaya de Tlemcen, englobant cinq communes : Sebdou, Sidi El Djilali, El Gor, El Bouihi et El Aricha. L'objectif principal est d'identifier et de caractériser l'ensemble des points d'eau existants (forages, puits, sources) en tenant compte de paramètres tels que le débit, la profondeur et la localisation. Un total de 119 points d'eau a été recensé et intégré dans un Système d'Information Géographique (SIG), constituant une base de données spatiale exhaustive.

L'utilisation du MNT et les images satellitaires ont permis de réaliser des cartes thématiques nécessaires dans ce projet (Carte hypsométrique, carte d'occupation du sol, carte d'exposition...etc.).

La méthode de classification K-means a été appliquée pour regrouper les points d'eau selon leurs caractéristiques hydro-agricoles, permettant de créer des zones révélant les disparités spatiales en matière de potentiel hydraulique. Ces résultats constituent un outil d'aide à la décision pour les collectivités locales, en vue d'une gestion plus équitable et durable de la ressource en eau.

Ce travail s'inscrit dans le cadre des Objectifs de Développement Durable, notamment l'ODD 6 (accès équitable à l'eau) et la cible 15.3 de l'ODD 15 (*lutte contre la dégradation des terres*), en contribuant à la préservation des écosystèmes steppiques.

**Mots Clés :** Développement durable, Eau, SIG, K-means, Steppe, Algérie.

## ABSTRACT

***“Hydro-agricultural potential of the southern region of Tlemcen with a view to sustainable management of steppe rangelands ”***

The Algerian steppe rangelands play a strategic role in the national agricultural economy. However, sustainable water resource management in these semi-arid areas remains largely insufficient and is often overlooked by local authorities, despite its critical importance for rural development.

This study focuses on a 3,200 km<sup>2</sup> area in the southern part of Tlemcen Province, covering five municipalities: Sebdou, Sidi El Djilali, El Gor, El Bouihi, and El Aricha. The main objective is to identify and characterize all existing water points (boreholes, wells, springs), based on parameters such as flow rate, depth, and geographic location. A total of 119 water points were inventoried and integrated into a Geographic Information System (GIS), forming a comprehensive spatial database.

Digital Elevation Models (DEM) and satellite imagery were used to produce thematic maps required for the analysis (e.g., hypsometric map, land use map, aspect map, etc.).

The K-means classification method was applied to group the water points according to their hydro-agricultural characteristics, allowing for the delineation of zones that reveal spatial disparities in water resource potential. These results offer a decision-support tool for local authorities in promoting more equitable and sustainable water management.

This work contributes to the goals of the Sustainable Development Agenda, particularly SDG 6 (ensuring equitable access to water) and Target 15.3 of SDG 15 (*combating land degradation*), by supporting the preservation of vulnerable steppe ecosystems.

**Keywords :** Sustainable development, Water, GIS, K-means, Steppe, Algeria.

## المخلص

**“الإمكانات الهيدرو-زراعية لمنطقة جنوب تلمسان بهدف الإدارة المستدامة للمراعي السهبية”**

تلعب المناطق السهبية الجزائرية دورًا استراتيجيًا في الاقتصاد الزراعي الوطني. ومع ذلك، لا تزال إدارة الموارد المائية في هذه المناطق شبه الجافة تعاني من ضعف كبير، وغالبًا ما يتم تجاهلها من قبل السلطات المحلية، رغم أهميتها الحيوية في تحقيق التنمية الريفية.

تركز هذه الدراسة على منطقة تمتد على مساحة 3200 كلم<sup>2</sup> في جنوب ولاية تلمسان، وتضم خمس بلديات: سبدو، سيدي الجيلالي، القور، البويهي، والعريشة. الهدف الرئيسي هو تحديد وتوصيف جميع نقاط المياه الموجودة (آبار، ينابيع، آبار أنبوبية..)، مع الاعتماد على معايير مثل معدل التدفق، العمق، والموقع الجغرافي. تم جرد ما مجموعه 119 نقطة مياه وإدراجها ضمن نظام المعلومات الجغرافية (SIG)، لتكوين قاعدة بيانات مكانية شاملة.

وقد تم استخدام نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) وصور الأقمار الصناعية لإعداد خرائط موضوعية ضرورية مثل خريطة الارتفاع، وخريطة استعمالات الأراضي، وخريطة الانحدار والاتجاه، وغيرها.

تم تطبيق طريقة التصنيف K-means لتجميع نقاط المياه وفقًا لخصائصها الهيدرو-زراعية، مما أتاح تحديد مناطق توضح التفاوتات المكانية في الإمكانيات المائية. تشكل هذه النتائج أداة لدعم اتخاذ القرار لدى السلطات المحلية من أجل إدارة أكثر عدلاً واستدامة للموارد المائية.

وتساهم هذه الدراسة في تحقيق أهداف التنمية المستدامة، لا سيما الهدف السادس (ضمان الوصول العادل للمياه) والهدف 15.3 من الهدف الخامس عشر (مكافحة تدهور الأراضي)، من خلال دعم حماية النظم البيئية السهبية الهشة.

**الكلمات المفتاحية:** التنمية المستدامة، المياه، نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، K-means، السهوب، الجزائر.

## TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES .....	9
LISTE DES TABLEAUX .....	10
LISTE DES ABREVIATIONS.....	11
INTRODUCTION GENERALE .....	14
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA STEPPE ALGERIENNE.....	17
I.1 - Délimitation des zones steppiques .....	17
I.2 - Milieu physique.....	19
I.3 - Etat de la steppe.....	25
I.4 - Occupation des terres et ressources fourragères .....	26
I.5 - Systèmes de production.....	26
I.6 - Cause de déséquilibre.....	27
CHAPITRE 2 : OUTILS D'OBSERVATION ET D'ANALYSE SPATIALE « APPORT DE LA TELEDETECTION ET DES SIG DANS L'ETUDE DES DYNAMIQUES ENVIRONNEMENTALES » .....	35
I. Télédétection.....	35
I.1 - Définition .....	35
I.2 - Objectifs de la télédétection .....	36
I.3 - Principes de base de la télédétection .....	38
I.4 - Les étapes de réalisation.....	39
I.5 - Techniques de la télédétection .....	40
I.6 - Bases physiques et technologiques.....	40
I.7 - Méthodes de traitement d'image.....	45
II. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG).....	54
II.1 - Historique des SIG .....	54
II.2 - Définition d SIG.....	56
II.3 - Le concept du système d'information géographique (SIG) .....	57
II.4 - Fonctionnement d'un SIG .....	58
II.5 - Mode de représentation des données géographiques .....	64
II.6 - Les Avantages et les inconvénients d'un SIG.....	72
III. SIG et télédétection.....	74

Chapitre 3 : Les Outils d'analyse (Machine Learning).....	76
1- Introduction à K-means.....	78
2- Origine et développement.....	78
3- Principe de fonctionnement.....	79
4- Applications environnementales.....	80
5- Avantages.....	80
6- Limites de l'algorithme.....	80
CHAPITRE 4 : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE.....	81
I. Situation géographique.....	81
II. Présentation du relief et du réseau hydrographique.....	83
II.1 - Morphologie et topographie de la zone d'étude.....	83
II.2 - Hydrologie.....	83
II.3 - Géomorphologie.....	86
II.4 - La géologie.....	86
II.5 - Pédologie.....	87
II.6 - Paramètres biologiques.....	88
II.7 - Environnement bioclimatique de la région d'étude.....	90
II.8 - Aspect socioéconomiques.....	103
CHAPITRE 5 : APPROCHES METHODOLOGIQUES.....	117
I. La collecte des données.....	117
I.1 - Prospection sur terrain.....	117
I.2 - Cartes géographiques utiles.....	118
I.3 - SIG et Télédétection.....	118
II. Gestion des données.....	118
III. Analyse statistique par le K-means clustering.....	119
III.1 - Conversion et correction des données.....	120
III.2 - Analyse Box Plot.....	120
III.3 - Analyse K-means.....	121
III.4 - Test du model de Silhouette.....	121
CHAPITRE 6 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	123
I. Cartes thématiques.....	124
I.1 - Carte d'Exposition.....	124

I.2 - Carte Hypsométrique.....	126
I.3 - Carte des pentes.....	127
I.4 - Carte Lithologique.....	129
I.5 - Carte d'occupation du sol.....	131
II. Synthèse de la base de données.....	134
III. Classification des points d'eau.....	136
CONCLUSION GENERALE .....	143
BIBLIOGRAPHIE .....	147

## **LISTE DES FIGURES**

<i>Figure n° 1 : Limites Géographiques de la zone steppique algérienne. (NEDJRAOUI, 2002).....</i>	<i>18</i>
<i>Figure n° 2 : Principe de la télédétection simplifié.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure n° 3 : Les différentes étapes de télédétection (BONN et ROCHON, 1993).....</i>	<i>39</i>
<i>Figure n° 4 : Diagramme du spectre électromagnétique pertinent pour la télédétection par satellite (BONN et ROCHON, 1993). .....</i>	<i>42</i>
<i>Figure n° 5 : Différence entre capteur Actif et Passif (ZAOUI, 2013).....</i>	<i>43</i>
<i>Figure n° 6 : Représentation de pixel d'une image (HADDOUCHE, 1998).....</i>	<i>46</i>
<i>Figure n° 7 : Les principales fonctionnalités d'un système d'information géographique (EASTMAN, 1993).....</i>	<i>59</i>
<i>Figure n° 8 : Le modèle de données en mode raster .....</i>	<i>66</i>
<i>Figure n° 9: Représentation Model Numérique de Terrain (MNT).....</i>	<i>66</i>
<i>Figure 10 : Représentation géographique selon le modèle vectoriel.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure n° 11 : Méthodes de transformation des données spatiales : de vecteur à raster et inversement.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure n° 12 : Classification des données par K-means.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure n° 13 : Carte de situation de la zone d'étude (ENNEBATI, 2015) .....</i>	<i>81</i>
<i>Figure n° 14 : Schéma simplifié de la zone de d'étude (ENNEBATI, 2015).....</i>	<i>82</i>
<i>Figure n°15 : Carte illustrant le réseau hydroclimatologique de la zone d'étude (A.N.R.H., 2005) .....</i>	<i>84</i>
<i>Figure n° 16: Carte représentant les réseaux hydrographiques ainsi que les bassins versants de la zone d'étude (P.D.A.U., 2014) .....</i>	<i>85</i>
<i>Figure n° 17 Carte illustrant la position des trois stations météorologiques dans la zone d'étude (Ennebati, 2015).....</i>	<i>92</i>
<i>Figure 18: Précipitations mensuelles moyennes observées aux stations d'observation météorologiques d'El-Aricha, de Sidi Djilali et de Ras El-Ma (Ennebati, 2015).....</i>	<i>93</i>
<i>Figure n° 19 : Variation saisonnière des régimes climatiques observés dans les trois stations .....</i>	<i>95</i>
<i>Figure n°20 : Évolution mensuelle des températures moyennes des trois stations .....</i>	<i>96</i>
<i>Figure n°21 : Représentation ombrothermique des trois stations d'après la.....</i>	<i>99</i>
<i>Figure n° 22 : Représentation pluviométrique des trois stations d'après Emberger .....</i>	<i>102</i>
<i>Figure n° 23 : Histogramme de l'évolution démographique de la zone d'étude.....</i>	<i>105</i>
<i>Figure n° 24 : Carte illustrant la densité démographique de la zone d'étude pour l'année 2008 (ENNEBATI, 2015).....</i>	<i>107</i>
<i>Figure n° 25 : Distribution de la Surface Agricole Totale (S.A.T.) de la zone d'étude représentée par un histogramme (D.S.A., 2015) .....</i>	<i>109</i>
<i>Figure n° 26 : Diagramme circulaire représentant la part de la S.A.U. pour chaque commune.....</i>	<i>110</i>
<i>Figure n° 27 : Distribution du cheptel de la zone d'étude pour l'année 2014 (D.S.A., 2015) .....</i>	<i>113</i>
<i>Figure n° 28 : Distribution du cheptel de chaque commune en 2014 illustrée par un camembert.....</i>	<i>114</i>
<i>Figure n° 29 Variation annuelle des effectifs du cheptel dans la zone d'étude sous forme d'histogramme .....</i>	<i>116</i>
<i>Figure n°30 : Prétraitement et évaluation du clustering K-means.....</i>	<i>120</i>
<i>Figure n°31 : Représentation de l'analyse Whisker Plot.....</i>	<i>121</i>
<i>Figure n° 32 : Les approches méthodologiques poursuivies .....</i>	<i>123</i>
<i>Figure n° 33 : Histogramme illustrant la distribution des surfaces selon l'exposition du relief.....</i>	<i>125</i>
<i>Figure n° 34 : Carte représentant la répartition des expositions par rapport au degré d'insolation au sein de la zone d'étude .....</i>	<i>125</i>
<i>Figure n° 35 Répartition des surfaces selon les classes d'altitude de la zone d'étude.....</i>	<i>127</i>
<i>Figure n° 36 : Carte représentant la répartition altitudinale (hypsométrique) de la zone d'étude.....</i>	<i>127</i>
<i>Figure n° 37 : Répartition des surfaces selon les classes de pente dans la zone d'étude.....</i>	<i>129</i>
<i>Figure n° 38 Carte représentant la répartition des classes de pente dans la zone d'étude.....</i>	<i>129</i>
<i>Figure n° 39 : Répartition des surfaces selon les différentes couches lithologiques de la zone d'étude.....</i>	<i>131</i>
<i>Figure n° 40 : Carte représentant la répartition des différentes formations lithologiques dans la zone d'étude .....</i>	<i>131</i>

<i>Figure n° 41 : Répartition des surfaces de chaque type d'occupation du sol.</i>	133
<i>Figure n° 42 : Carte d'occupation de la zone d'étude</i>	133
<i>Figure 43 : Répartition du nombre de points d'eau (forages, puits et sources) dans les communes steppiques de la wilaya de Tlemcen</i>	135
<i>Figure n° 44 : Débits total et moyen de la zone d'étude</i>	136
<i>Figure n° 45 : Les valeur du test silhouette pour k optimal</i>	136
<i>Figure n°46 : Carte de classification des points d'eau (k=6)</i>	138
<i>Figure n°47 : Carte d'aptitude hydro-agricole basée sur le clustering K-means</i>	140

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau n° 1 : Variation des effectifs du cheptel durant la période 1987-1999 (en milliers de tête)....	33
Tableau n° 2 : Variation du cheptel de la période 2003-2010 (en milliers de tête)	33
Tableau n° 3: Association entre couleurs primaires et leurs longueurs d'onde (HADDOUCHE, 1998).....	49
Tableau n° 4 : Comparaison des points forts et limites des classifications supervisée et non supervisée (ZAOUI, 2013)	52
Tableau n° 5 : Points forts et limites des représentations vectorielle et raster.....	69
Tableau n° 6 : Superficie et périmètre des différentes communes étudiées.....	82
Tableau n° 7 : Situation géographique des stations météo : X, Y, altitude, commune et wilaya.....	91
Tableau n°8 : Températures moyennes mensuelles et annuelles	95
Tableau n° 9 : Étages bioclimatiques et valeurs du Q2 pour chaque station	103
Tableau n° 10 : Variation démographique au cours des trois derniers recensements généraux de la population et de l'habitat	104
Tableau n° 11 : Répartition de la population par unité de surface dans chaque commune en 2008...	106
Tableau n° 12 : Distribution des superficies des terres de la zone d'étude (ha)	108
Tableau n°13 : Rendements des cultures herbacées au cours de l'année agricole 2013/2014.....	111
Tableau n°14 : Rendements des cultures pérennes au cours de l'année agricole 2013/2014	111
Tableau n°15 Productivité des cultures dans la zone d'étude exprimée en Qx par hectare.....	112
Tableau n°16 Répartition des surfaces des terres selon leur exposition dans la zone d'étude.....	124
Tableau n°17 : Distribution des superficies selon les classes d'altitude de la zone d'étude.....	126
Tableau n°18 : Distribution des superficies selon les classes de pente dans la zone d'étude	128
Tableau n°19 : Distribution des superficies selon les différentes couches lithologiques de la zone d'étude	130
Tableau n°20 : Distribution des superficies selon les différents types d'occupation du sol de la zone d'étude	132
Tableau n°21 : Inventaire des points d'eau dans les communes steppiques de la wilaya de Tlemcen	134
Tableau n°22 : Parametre des valeur k (k=6).....	137

## LISTE DES ABREVIATIONS

°C : Degré Celsius

µm : Micromètre

µm : Micromètre

µm : Micromètre

A.B.H. : Agence de Bassin Hydrographique

A.C.P. / ACP : Analyse en Composantes Principales

ADE : Algérienne des Eaux

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

APC : Assemblée Populaire Communale

Arc Hydro : Extension d'ArcGIS pour l'analyse hydrologique

ArcGIS : Logiciel de cartographie et d'analyse spatiale (ESRI)

B.D. / BD : Base de Données

B.D.G. / BDG : Base de Données Géographique

B.L.A. / BLA : Bovins Laitiers Améliorés

B.L.M. / BLM : Bovins Laitiers Modernes

C.P.C.S. : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols

D.P.A.T. : Document de Planification et d'Aménagement du Territoire

D.S.A. : Direction des Services Agricoles

DD : Développement Durable

DEM : Digital Elevation Model (Modèle Numérique de Terrain)

ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus (capteur Landsat ETM+)

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

GPS : Global Positioning System

H.C.D.S. / HCDS : Haut Commissariat au Développement de la Steppe

HA / Ha : Hectare

HPAE / PHAE / HAPE : Types de régimes pluviométriques saisonniers cités

HRV : Haute Résolution Visible

I.G.N : Institut Géographique National

I.N.R.A. : Institut National de la Recherche Agronomique

IA : Intelligence Artificielle

IR : Infrarouge

ITS : Intensité Teinte Saturation

km / km<sup>2</sup> : kilomètre / kilomètre carré

LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

m / m<sup>3</sup> : mètre / mètre cube

M.A.D.R. : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural

M.O.S. / MOS : Modèle d'Organisation Spatiale

m<sup>3</sup> : mètre cube

ML : Machine Learning (Apprentissage automatique)

mm : millimètre

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MS : Matière Sèche

n° : Numéro

O.D.D. / ODD : Objectifs de Développement Durable

ONU : Organisation des Nations Unies

P.D.A.U. : Plan Directeur d'Aménagement Urbain

PC : Personal Computer (Ordinateur Personnel)

PIR : Proche Infrarouge

Qx : Quintaux

Qx/Ha : Quintaux par hectare

RADAR : Radio Detection And Ranging

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat

RH : Ressources Hydriques

RS : Remote Sensing (Télédétection)

RVB : Rouge, Vert, Bleu

S.A.T. : Superficie Agricole Totale

S.A.U. : Superficie Agricole Utile

S.B.G.D. / SGBD : Système de Gestion de Base de Données

S.I.G. / SIG : Système d'Information Géographique

SPOT : Satellite Pour l'Observation de la Terre

STI : Système de Traitement d'Images

SVC : Support Vector Clustering

T\_moy : Température moyenne

TM : Thematic Mapper

UA : Unité Agricole

UF : Unité Fourragère

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture

UV : Ultraviolet

ZA : Zone d'Apprentissage

## INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières décennies, les milieux naturels des zones arides et semi-arides ont connu une dégradation accélérée, résultant de la forte croissance démographique, des changements socio-économiques rapides et de l'évolution des modes d'exploitation des ressources naturelles.

En Algérie, l'équilibre fragile de l'écosystème steppique reposait autrefois sur une interaction harmonieuse entre les communautés humaines et leur environnement. Cet équilibre, fondé sur des pratiques traditionnelles adaptées, garantissait la régénération et la durabilité des ressources naturelles. Cependant, l'introduction de nouveaux modes de gestion et de mise en valeur du territoire, souvent étrangers aux systèmes pastoraux ancestraux, a profondément transformé ces espaces. Cette mutation a entraîné une détérioration progressive, perceptible à toutes les échelles de l'espace steppique (ENNEBATI, 2015).

La dégradation environnementale s'y manifeste aujourd'hui de manière aiguë. Les zones steppiques, dont les ressources pastorales assurent la subsistance de plus de trois millions et demi d'habitants, subissent depuis plusieurs décennies une pression croissante qui affecte directement la ressource « parcours » (BENSOUIAH, 2003).

Ces vastes étendues, cœur de l'élevage ovin extensif en Algérie, sont particulièrement vulnérables aux sécheresses répétées et aux pressions anthropiques telles que le surpâturage ou la mise en culture de sols peu adaptés. Les ressources naturelles fondamentales de ces régions « l'eau, le sol et la végétation » ont été profondément altérées par la combinaison de la densification humaine, de l'augmentation du cheptel et d'une sécheresse persistante. Même les potentialités hydrologiques de ces milieux n'échappent pas à cette tendance dégradante (HADDOUCHE, 2009).

L'expansion des surfaces cultivées dans les zones steppiques, conjuguée à l'augmentation du cheptel et à des modes d'exploitation inadaptés, a provoqué plusieurs formes de dégradation environnementale : défrichement intensif, disparition du couvert végétal, surpâturage, érosion et appauvrissement progressif des sols (ENNEBATI, 2015).

L'eau, ressource vitale et facteur déterminant du développement économique et social, constitue un élément central de toute stratégie de durabilité. Sa disponibilité et sa bonne gestion conditionnent directement la stabilité des écosystèmes et la sécurité alimentaire des populations.

Comme l'ont souligné CHERIFA et al. (2024), la raréfaction croissante des ressources en eau impose une gestion beaucoup plus rigoureuse, visant à limiter les pertes et les usages non productifs. Cette approche repose sur une compréhension approfondie des composantes du bilan hydrique et des mécanismes hydrogéologiques sous-jacents.

Selon BOUANANI (2004), plus de trente années d'efforts en matière d'infrastructures hydrauliques ont mis en évidence la nécessité d'intégrer pleinement la problématique de l'eau dans les politiques de développement durable, en considérant à la fois ses dimensions économiques, sociales et environnementales.

Dans cette optique, la mise en place d'outils modernes d'observation et d'analyse, tels que la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG), s'avère indispensable pour assurer une gestion optimale des ressources hydrologiques et orienter les décisions d'aménagement.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail, qui vise à valoriser et à exploiter les potentialités locales en combinant les données de terrain, les informations cartographiques et les relevés numériques au sein d'un SIG intégré.

L'accent est mis sur la localisation et la caractérisation des points d'eau (forages, puits, sources) dans la steppe du sud de Tlemcen. Ces données, traitées à l'aide de logiciels spécialisés tels qu'ArcGIS, ont permis la réalisation de cartes thématiques précises prenant en compte la pente, l'exposition, l'hypsométrie et d'autres paramètres physiques essentiels.

Bien que les Systèmes d'Information Géographique (SIG) soient largement utilisés pour l'analyse spatiale, ils présentent certaines limites en termes d'efficacité des résultats. L'intégration de méthodes d'apprentissage automatique, telles que l'algorithme K-means, permet de surmonter ces limites et d'exploiter plus efficacement les données disponibles.

## Structure générale de la thèse

Notre travail de recherche s'articule autour de trois grands axes, chacun correspondant à une étape essentielle du processus scientifique, répartis en plusieurs chapitres cohérents :

- Le premier axe est consacré à l'état de l'art et à la collecte des données nécessaires à la mise en œuvre de l'étude. Il comprend :
  - Introduction générale, qui pose le cadre, la problématique et les objectifs de la recherche.
  - Chapitre 1 : Présentation de l'écosystème steppique, dans lequel sont décrites les caractéristiques générales, les enjeux environnementaux et socio-économiques de la steppe algérienne, afin de mieux situer le contexte de l'étude.
- Le deuxième axe porte sur les outils méthodologiques mobilisés, ainsi que sur la délimitation précise de la zone d'étude. Il est structuré en trois chapitres :
  - Chapitre 2 : Outils d'investigation : Il présente les apports de la télédétection et du Système d'Information Géographique (SIG) dans l'acquisition et le traitement des données spatiales.
  - Chapitre 3 : Outils d'analyse : Ce chapitre développe l'approche par apprentissage automatique (Machine Learning), notamment à travers les algorithmes de classification tels que le K-means.
  - Chapitre 4 : Délimitation et description de la zone d'étude, où sont exposées les caractéristiques physiques, hydrologiques et administratives du territoire concerné.
- Le troisième axe est consacré à l'application concrète de la méthodologie sur le terrain d'étude, ainsi qu'à l'interprétation des résultats. Il comprend :
  - Chapitre 5 : Démarche méthodologique, qui détaille les étapes suivies pour traiter, analyser et classer les données.
  - Chapitre 6 : Résultats et discussion, où sont présentées les cartes de potentiel hydro-agricole, les analyses spatiales et les implications pour la gestion durable de la ressource.

Enfin, la thèse se termine par une conclusion générale accompagnée de perspectives de recherche et d'application, ouvrant la voie à de futures études ou projets de développement dans le domaine de la gestion intégrée de l'eau en milieu steppique.

## **Chapitre 1 : PRESENTATION DE LA STEPPE ALGERIENNE**

En Algérie, la zone steppique s'étend entre l'Atlas tellien au nord et l'Atlas saharien au sud. Elle couvre une superficie estimée à environ vingt millions d'hectares (NEDJRAOUI, 2002). Ce vaste ensemble forme une bande longitudinale d'environ mille kilomètres de long, dont la largeur varie selon les régions : elle atteint près de 300 km dans la partie occidentale et centrale, mais se réduit à moins de 150 km vers l'est du pays.

La délimitation de cette région repose principalement sur des critères pluviométriques, avec des précipitations moyennes annuelles comprises entre 100 et 400 mm (KHALIL, 1997).

### **I.1 - Délimitation des zones steppiques**

Comme le souligne KHELIL (1997), la vaste étendue steppique du pays n'est pas homogène ; elle se divise en sous-régions clairement identifiables, dont la différenciation repose sur des critères liés au climat, au relief et à la dynamique de la végétation :

#### **I.1.1 - Bordure sub-steppique**

Cette zone se situe approximativement entre les isohyètes de 300 et 400 mm de précipitations annuelles.

Elle occupe la bordure méridionale de l'Atlas tellien dans sa partie centrale, et s'étend vers l'est sur les hauts plateaux constantinois, les monts du Hodna ainsi que les massifs de l'Aurès. Les hauts plateaux constantinois présentent une vocation essentiellement agro-pastorale, tandis que les massifs du Hodna et de l'Aurès se caractérisent davantage par une activité sylvo-pastorale, associant élevage et exploitation forestière.

#### **I.1.2 - Région steppique proprement dite**

La région steppique est comprise entre les isohyètes 200 et 300 mm et qui comprend :

##### **⇒ Au centre**

Les hautes plaines steppiques algéro-oranaises, englobant les régions de Hassi Bahbah, M'Sila, ainsi que le nord des wilayas de Laghouat et d'El Bayadh, forment un vaste ensemble semi-aride.

Ces espaces sont principalement couverts par des parcours steppiques, ponctués de nappes alfatières et de zones d'agriculture marginale qui se développent localement grâce aux épandages des crues d'oueds.

Plus au sud, les piémonts et massifs de l'Atlas saharien tels que les monts des Ouled Naïl, le Djebel Amour et les monts des Ksour se distinguent par une végétation de parcours naturels associée à des formations forestières clairsemées.

⇒ **A l'Est**

Les hautes plaines de M'Sila, Khenchela et Tébessa sont isolées des plateaux centraux par le relief accidenté des Aurès, qui délimite clairement ces deux domaines.

**I.1.3 - Région steppique présaharienne**

Cette zone se situe dans la bande comprise entre les isohyètes de 100 et 200 mm de précipitations annuelles.

Elle se caractérise par la prédominance de parcours à tendance saharienne, où alternent des formations steppiques clairsemées et des vallées alluviales offrant localement des potentialités agricoles limitées :

⇒ **Au centre**

La zone comprend les piémonts méridionaux de l'Atlas saharien, la cuvette du Hodna, ainsi que le plateau saharien s'étendant au sud des wilayas de Djelfa et de Laghouat.

⇒ **A l'Est**

L'extrémité orientale de l'Atlas saharien englobe les monts du M'zab et des Nemencha, ainsi que le plateau saharien situé au sud des wilayas de Tébessa et de Biskra.

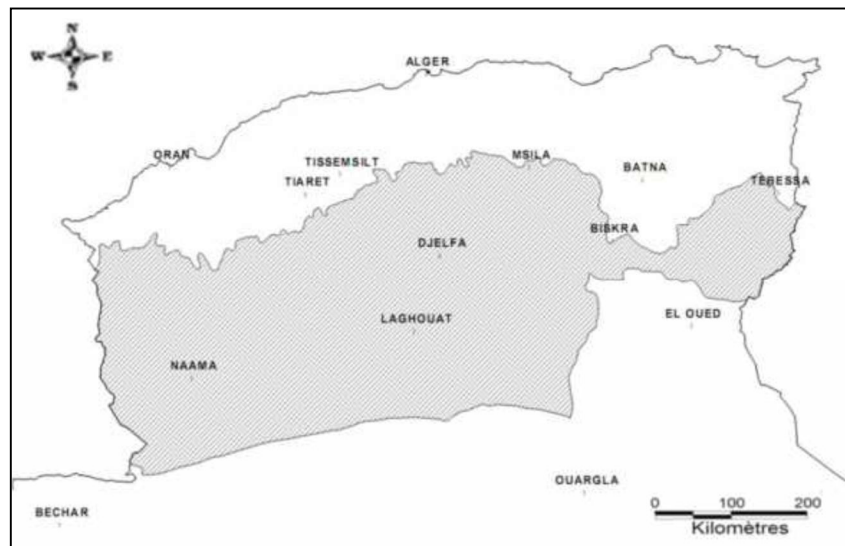


Figure n° 1: Limites Géographiques de la zone steppique algérienne. (NEDJRAOUI, 2002)

## **I.2 - Milieu physique**

### ***I.2.1 - Climat***

#### **I.2.1.1 - Pluviométrie**

De manière générale, la pluviométrie moyenne annuelle dans la zone steppique demeure faible, variant entre 100 et 400 mm selon les régions. Sa répartition spatiale et temporelle est très irrégulière, les précipitations se manifestant le plus souvent sous forme d'averses intenses et d'orages violents (NEDJIMI et al., 2012).

Selon KHELIL (1997), la quantité de pluie diminue progressivement vers l'ouest, notamment du côté d'Aïn Sefra, en raison de l'influence orographique du Grand Atlas marocain. Elle augmente ensuite vers la zone centrale (El Bayadh, Aflou, Djelfa), avant de décroître à nouveau dans les régions de Boussaâda et M'Sila, soumises à l'effet d'assèchement de l'enclave saharienne du Hodna.

Plus au sud, au niveau du piémont de l'Atlas saharien (Laghouat), les précipitations chutent nettement et diminuent rapidement à mesure que l'on s'éloigne de la flexure sud-atlasique.

Les massifs montagneux tels que les monts des Ouled Naïl et le Djebel Amour bénéficient d'un régime pluviométrique plus favorable : ils reçoivent en moyenne plus de 400 mm/an, et certaines crêtes peuvent enregistrer jusqu'à 600 mm/an.

#### **I.2.1.2 - Température**

La température constitue l'un des paramètres climatiques majeurs influençant directement la diversité floristique et faunistique des milieux steppiques.

Dans cette région, le climat se caractérise par des contrastes thermiques marqués, avec des variations extrêmes entre les saisons.

Selon Le HOUEROU (1977), cité par KHELIL (1997), le régime thermique de la steppe algérienne est typiquement continental, présentant une amplitude annuelle supérieure à 20 °C.

Les gelées hivernales, fréquentes et parfois prolongées, freinent la croissance de la végétation. Cette contrainte pousse les éleveurs à migrer vers les zones sahariennes plus clémentes, où les températures plus élevées favorisent la disponibilité du pâturage un déplacement saisonnier connu sous le nom d'Azzaba.

À l'inverse, durant l'été, la forte chaleur limite également le développement des plantes. Les éleveurs entreprennent alors une transhumance vers le Nord, notamment vers les plateaux céréaliers, pour profiter de parcours plus verdoyants un mouvement appelé Achaba.

#### I.2.1.3 - Autres facteurs climatiques

- Les conditions climatiques de la steppe sont fortement influencées par plusieurs facteurs atmosphériques :
- Le sirocco : ce vent chaud et sec, caractéristique de la saison estivale, constitue une contrainte majeure. Il accentue l'évaporation, provoque un assèchement rapide des sols et réduit considérablement la disponibilité en eau superficielle ainsi que l'humidité de la végétation.
- Les gelées hivernales : elles représentent l'un des facteurs limitants essentiels des zones steppiques. Associées aux basses températures, elles freinent la croissance des plantes et modifient les cycles végétatifs naturels.
- La neige : elle n'apparaît qu'à haute altitude, notamment sur les massifs des Ouled Naïl, où elle peut persister plusieurs jours selon l'exposition et l'altitude.
- Les vents dominants, de secteur ouest et nord-ouest, sont fréquents au printemps et en automne. Ils s'accompagnent souvent d'orages localisés pouvant générer des précipitations brèves mais intenses.

#### I.2.2 - Hydrographie et ressources hydriques

- Le réseau hydrographique de la steppe algérienne est largement conditionné par les variations saisonnières et interannuelles des précipitations, ainsi que par la configuration du relief (KHELIL, 1997).
- La plupart des oueds présentent un régime irrégulier, se caractérisant par des lits à sec durant la saison estivale et par des crues soudaines survenant généralement au début ou à la fin de l'hiver, voire ponctuellement en été. Ces épisodes de crues peuvent engendrer une érosion marquée des sols et occasionner la perte de bétail, en particulier dans les zones de pâturage.
- Les cours d'eau steppiques ne rejoignent pratiquement jamais la mer ; ils se dispersent dans les dépressions fermées et les chotts, où ils s'évaporent ou s'infiltrent.
- Dans ces régions, les ressources en eau sont limitées, faiblement renouvelables et inégalement réparties.

- Selon le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (M.A.D.R., 2008), les potentialités hydriques de la steppe se composent principalement de deux catégories :
- Les eaux superficielles, issues des précipitations orageuses, représentent un volume estimé à environ 40 milliards de m<sup>3</sup> par an. Cependant, seule une faible proportion est effectivement mobilisée par des infrastructures hydrauliques, tandis que le reste est perdu par évaporation ou infiltration.
- Les eaux souterraines, dont le potentiel global est évalué à près de 1,4 milliard de m<sup>3</sup>, constituent la ressource la plus fiable. Elles sont utilisées pour l'alimentation humaine, l'abreuvement du bétail et l'irrigation. Néanmoins, cette ressource reste insuffisamment étudiée hormis dans quelques périmètres comme Oued Touil et le Hodna et fait l'objet d'une exploitation souvent désordonnée.
- La prolifération de forages non maîtrisés a provoqué une baisse notable du niveau des nappes alluviales et phréatiques, rendant de nombreux puits improductifs.

### *1.2.3 - Nature des sols*

Le sol constitue un milieu dynamique et cohérent, dont les caractéristiques résultent de son évolution historique, des conditions environnementales et, dans bien des cas, de l'influence des activités humaines.

Dans les zones steppiques, les sols sont généralement pauvres, peu profonds et fragiles, en raison de la faible teneur en humus et de la limitation du développement pédologique.

Adaptés à un climat aride à semi-aride, ils demeurent peu évolués et souvent discontinus. Leur dynamique est dominée par les processus d'érosion et de morphogenèse, qui priment sur ceux de la pédogenèse (HADDOUCHE, 1998).

Le sol représente en outre un élément vital de l'environnement, dont la dégradation est souvent irréversible et entraîne des conséquences graves, tant à court qu'à long terme (HALITIM, 1985, cité par KHELIL, 1997).

D'après HADDOUCHE (1998) et les classifications établies par la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (C.P.C.S., 1967), les sols de la steppe algérienne se répartissent en plusieurs grandes catégories :

- les sols minéraux bruts d'érosion, souvent associés aux reliefs instables ;
- les sols peu évolués, issus d'apports éoliens ou alluviaux ;

- les sols calcimagnésiques, riches en carbonate de calcium ;
- les sols halomorphes, marqués par une salinité élevée ;
- et les sols isohumiques, développés localement dans les zones légèrement plus humides.

Dans l'ensemble, les sols steppiques se distinguent par une faible profondeur, une teneur limitée en matière organique et une grande vulnérabilité à l'érosion.

Les secteurs les plus fertiles, favorables à une céréaliculture irrégulière, se localisent dans les dépressions, les lits d'oueds, les dayas et les piémonts montagneux, où s'accumulent les éléments fins et une plus grande réserve en eau.

#### ***1.2.4 - Végétation steppique naturelle***

La végétation steppique se distingue par la faible présence de formations forestières, composées principalement de Pin d'Alep (*Pinus halepensis*), de Chêne vert (*Quercus ilex*) et de Genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*).

Ces peuplements boisés, souvent clairsemés, alternent avec des formations végétales basses à couverture discontinue, généralement dégradées sous l'effet combiné du climat aride et de la pression anthropique.

Selon BENCHERIF (2011), les steppes algériennes se structurent autour de quatre grands types de formations végétales naturelles, qui se différencient par leur composition floristique, leur densité et leur adaptation aux conditions écologiques locales :

##### **1.2.4.1 - Steppes à graminées**

La formation à alfa (*Stipa tenacissima*) représente l'un des faciès végétaux les plus caractéristiques des steppes algériennes.

Cette graminée vivace se rencontre seule ou en association avec d'autres espèces pérennes, sur des sols bien drainés et généralement peu profonds.

Les parcours dominés par l'alfa présentent une bonne valeur pastorale, en particulier lorsqu'ils abritent une flore annuelle diversifiée favorisée par le microclimat créé sous les touffes de la plante.

Au printemps, les épis d'alfa, riches en éléments nutritifs, contribuent notablement à la valeur fourragère du parcours, estimée à environ 0,60 UF/kg de matière sèche.

En revanche, lorsque ces parcours sont dépourvus d'épis ou appauvris en plantes annuelles, leur valeur nutritive diminue considérablement.

Les feuilles d'alfa, à forte teneur en cellulose, possèdent alors une valeur énergétique plus faible, variant de 0,25 à 0,35 UF/kg de matière sèche, ce qui réduit leur intérêt pour l'alimentation du bétail.

#### **I.2.4.2 - Steppes à chaméphytes**

La formation à armoise blanche (*Artemisia herba-alba*) constitue l'un des types de parcours les plus représentatifs des steppes algériennes.

Elle se développe soit en peuplements purs, soit en association avec d'autres espèces vivaces adaptées aux conditions semi-arides.

Tout comme les formations à alfa, ces steppes à dominance d'armoise offrent de bonnes potentialités pastorales, notamment grâce à la présence d'un riche cortège d'espèces annuelles qui améliorent leur valeur fourragère, estimée à environ 0,5 UF/kg de matière sèche.

Très recherchées par les éleveurs ovins, ces formations constituent des pâturages privilégiés à l'automne, période durant laquelle la production de biomasse verte est maximale.

L'armoise blanche présente en outre une particularité organoleptique : elle confère à la viande ovine une saveur aromatique distinctive, appréciée par les consommateurs et considérée comme un signe de qualité.

#### **I.2.4.3 - Steppes à psamophytes**

Ces formations sont composées d'espèces adaptées aux substrats sableux, capables de stabiliser les dunes et de limiter leur mobilité.

Parmi les espèces les plus caractéristiques figurent le rétam (*Retama retam*) et le drinn (*Aristida pungens*), deux plantes emblématiques des zones arides, dont le système racinaire profond joue un rôle essentiel dans la fixation des sols et la préservation des écosystèmes dunaires.

#### **I.2.4.4 - Steppes à halophytes**

Ces formations végétales se développent dans les dépressions salées et les zones halomorphes, où les conditions de salinité limitent la diversité floristique.

Elles sont principalement composées d'espèces halophiles du genre *Atriplex* (*Atriplex halimus*, *Atriplex nummularia*, *Atriplex canescens*), auxquelles s'ajoutent des formations à Tamarix (*Tamarix gallica*), caractéristiques des bordures de chotts et sebkhas.

Dans certaines stations, ces espèces peuvent être remplacées ou accompagnées par des vivaces à bonne valeur pastorale, telles que le Remth (*Arthrophytum scoparium*), qui contribuent à la productivité des parcours tout en résistant aux contraintes édaphiques et climatiques.

#### **I.2.4.5 - Steppes secondaires**

Également appelées steppes post-culturelles, ces formations se développent sur des parcelles anciennement cultivées, souvent défrichées puis abandonnées.

Elles sont progressivement recolonisées par des espèces spontanées à faible valeur pastorale, telles que l'armoise champêtre (*Artemisia campestris*), l'orge des rats (*Hordeum murinum*) et la mauve sauvage (*Malva sylvestris*).

Ces espèces tendent à remplacer les plantes fourragères de meilleure qualité qui dominaient auparavant, notamment les légumineuses du genre *Medicago* (*M. truncatula*, *M. secundiflora*) ainsi que les hélianthèmes (*Helianthemum virgatum*).

Ce processus illustre la dégradation progressive des parcours sous l'effet de la mise en culture et du surpâturage, entraînant une diminution de la richesse floristique et de la valeur pastorale des écosystèmes steppiques.

#### **I.2.4.6 - Steppes dégradées**

Ces formations résultent de la régression des espèces annuelles et vivaces de bonne valeur pastorale, progressivement remplacées par des plantes moins appréciées, telles que le Harmel (*Peganum harmala*), Zireg (*Noaea mucronata*), Choubrok (*Atractylis serratuloïdes*) et Methnane (*Thymelea microphylla*).

#### **I.2.4.7 - Terres cultivées**

Les zones cultivables steppiques couvrent une superficie estimée à environ 2,7 millions d'hectares.

Parmi elles, près de 1,9 million d'hectares se situent principalement dans les zones d'épandage des crues et le long des lits d'oueds, où les sols profonds bénéficient d'un apport régulier en limons et en eau, favorisant ainsi une bonne capacité de rétention hydrique.

Outre la céréaliculture, ces terres présentent également un potentiel intéressant pour l'arboriculture et les cultures maraîchères (BOUYAHIA, 2010).

En revanche, environ 0,8 million d'hectares correspondent à des terrains de parcours, moins favorables aux cultures en raison de leurs sols pauvres et irrégulièrement alimentés en eau.

### **I.3 - Etat de la steppe**

Le monde steppique demeure profondément influencé par les conditions climatiques rigoureuses et par un niveau de développement encore limité.

La production agricole y est fortement contrainte par la rareté de l'eau, la faible fertilité des sols et la variabilité des précipitations, ce qui en fait un écosystème vulnérable, soumis à de multiples risques d'ordre climatique, structurel et socio-économique.

Au fil du temps, la steppe a subi d'importantes mutations environnementales et sociales, traduites par une dégradation simultanée du milieu naturel et des conditions de vie des populations rurales, notamment marquées par une paupérisation croissante de certains groupes (DOUH, 2011).

La société pastorale traditionnelle a, elle aussi, profondément évolué.

Le nomadisme, autrefois dominant, a régressé de manière significative pour ne subsister que de façon résiduelle et localisée.

Historiquement, le système d'élevage ovin, combiné à la transhumance saisonnière entre les parcours steppiques et les zones céréalières du nord, constituait la base de l'économie pastorale. Cependant, au cours des deux dernières décennies, seules environ 20 % des troupeaux steppiques pratiquent encore cette transhumance traditionnelle (BEDRANI, 1984).

De nombreux chercheurs, tels que NEDJIMI (2012), NEDJRAOUI et al. (2008), HADDOUCHE (2009), BOUCHETATA et BOUCHETATA (2005), BENZAÏD (2006) et BOUAZZA (1995), ont mis en évidence une perturbation profonde de l'équilibre des écosystèmes steppiques, conséquence directe des changements dans les modes d'exploitation et de la pression anthropique accrue.

Selon FLORET (1981), la végétation naturelle de ces milieux subit en permanence un double impact : d'une part, celui des facteurs édaphiques et climatiques (sols légers et arides, faibles précipitations), et d'autre part, celui des interventions humaines (surpâturage, défrichage et mise en culture inadaptée).

#### **I.4 - Occupation des terres et ressources fourragères**

L'évaluation du potentiel fourrager de la steppe demeure une tâche complexe, en raison de l'absence d'études exhaustives et harmonisées à l'échelle nationale.

Plusieurs approches ont été proposées pour tenter d'en estimer la production annuelle :

L'approche bibliographique, fondée sur l'analyse des formations végétales dominantes et de l'état de dégradation des parcours, permet d'évaluer la production fourragère moyenne à environ 3 milliards d'unités fourragères (UF).

De son côté, le Haut-Commissariat au Développement de la Steppe (H.C.D.S.) avance une estimation plus prudente, de l'ordre de 1,5 milliard d'UF, issue de mesures expérimentales de terrain plutôt que de simples extrapolations.

Cette seconde estimation semble la plus réaliste, car elle repose sur des observations directes et des données mesurées.

Elle souligne l'importance de disposer d'outils modernes et fiables d'évaluation de la ressource pastorale, indispensables à toute planification durable de l'élevage dans les zones steppiques.

Dans tous les cas, les besoins alimentaires du cheptel dépassent largement la capacité de production naturelle des parcours, même en considérant les charges pastorales admissibles à l'hectare.

Le recours à la complémentation alimentaire est devenu quasi systématique, souvent en situation d'urgence, et s'accompagne d'une accélération des processus de dégradation et de désertification.

#### **I.5 - Systèmes de production**

Les surfaces exploitées à des fins agricoles dans les zones steppiques demeurent imparfaitement maîtrisées, leur estimation variant entre 1 et 1,5 million d'hectares.

Les cultures destinées à l'alimentation animale, principalement l'orge, l'avoine et les fourrages, occupent environ 70 % des superficies cultivées, tandis que le reste est consacré à des activités maraîchères et à l'arboriculture.

Selon le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (M.A.D.R., 2008), on distingue trois principaux systèmes de production dans la steppe algérienne :

- 1- L'élevage extensif, fondé sur l'exploitation directe des parcours naturels;
- 2- L'agro-élevage, combinant production végétale et élevage dans une logique de complémentarité ;

- 3- Et l'élevage hors-parcours, pratiqué dans des exploitations plus intensives, où l'alimentation animale repose essentiellement sur la complémentation et les ressources fourragères cultivées.

## **I.6 - Cause de déséquilibre**

La surexploitation des parcours steppiques est aujourd'hui une réalité préoccupante, résultant de l'accroissement simultané des populations humaines et animales sur un territoire aux ressources limitées.

Cette pression croissante exerce une contrainte directe sur les écosystèmes pastoraux, dont la capacité de régénération s'en trouve fortement compromise.

Selon NEDJIMI et al. (2012), la dégradation des parcours découle de l'interaction entre deux grands ensembles de facteurs :

- D'une part, les facteurs naturels, liés aux caractéristiques du milieu physique climat aride, sols fragiles, faible disponibilité en eau ;
- Et d'autre part, les facteurs socio-économiques et anthropiques, parmi lesquels figurent la mise en culture inadaptée, le surpâturage et la mauvaise gestion des ressources, qui traduisent une intervention humaine souvent désordonnée et non durable sur l'écosystème steppique.

### ***1.6.1 - Causes naturelles***

Les facteurs naturels à l'origine de la dégradation des parcours steppiques sont intimement liés à la vulnérabilité écologique de ces milieux.

La combinaison des contraintes climatiques et édaphiques rend ces écosystèmes particulièrement sensibles à la dégradation et à l'érosion, phénomène largement observé dans l'ensemble des zones arides et semi-arides (Le HOUEROU, 1995).

Les steppes algériennes présentent un fort potentiel érosif, aussi bien éolien qu'hydrique, du fait de la violence des précipitations orageuses et de la faible couverture végétale qui protège insuffisamment le sol.

Selon BENSOUIAH (2002), le taux de recouvrement végétal constitue à la fois un indicateur de vulnérabilité et une conséquence directe de l'érosion, et son analyse, associée aux indices d'érodibilité des sols, permet d'évaluer le risque global de dégradation.

Par ailleurs, la variabilité interannuelle des précipitations reste l'un des traits majeurs du climat steppique.

Les dernières décennies ont été marquées par une réduction notable des apports pluviométriques, souvent accompagnée de périodes prolongées de sécheresse, accentuant ainsi la dégradation du couvert végétal et la perte de productivité des parcours (NEDJRAOUI et al., 2008).

Dans ces milieux ouverts, où la végétation couvre moins de 30 % de la surface, le vent joue un rôle majeur dans le processus de déflation éolienne, emportant les particules fines (limons et argiles) et laissant des sols grossiers et squelettiques, à faible capacité de rétention en eau et à activité biologique réduite.

Selon Le HOUEROU (1996), ce type d'érosion peut entraîner une perte de sol estimée entre 150 et 300 tonnes par hectare et par an dans les zones steppiques défrichées.

L'érosion hydrique, quant à elle, résulte principalement des pluies intenses et torrentielles, souvent sous forme d'orages localisés, qui désagrègent les sols peu profonds, réduisent leur perméabilité et appauvrissent leur fertilité.

Les éléments fins et organiques sont emportés par le ruissellement, provoquant la formation de rigoles et de ravines qui entaillent la surface du sol.

Selon Le HOUEROU (1995), ce phénomène peut entraîner une perte de terre comprise entre 50 et 250 tonnes par hectare et par an sur les sols dénudés à forte pente, contribuant ainsi à la détérioration accélérée des paysages steppiques.

#### ***1.6.2 - Problème de salinité des sols***

Selon HALITIM (1988), plus de 95 % des sols des régions arides présentent une composition calcaire, gypseuse ou salsodique.

Sous l'effet des températures élevées qui prédominent une grande partie de l'année, les précipitations, bien que faibles, subissent après infiltration une évaporation intense, entraînant la remontée capillaire des sels dissous.

Ce processus provoque la formation de croûtes salines en surface, responsables d'une stérilisation progressive des sols et d'une réduction notable de leur potentiel biologique et agronomique.

Dans ces environnements, on distingue deux principaux types de dépressions salées, connues sous leurs appellations locales de chotts et sebkhas (POUGET, 1980).

Ces deux formations se différencient principalement par leur mode d'alimentation hydrique :

Les sebkhas dépendent essentiellement des apports temporaires d'eaux de crue provenant du ruissellement superficiel ;

Tandis que les chotts sont alimentés à la fois par les eaux de ruissellement et par les nappes phréatiques profondes, souvent artésiennes, qui atteignent la surface par sources ou suintements.

D'après NEDJIMI (2012), les chotts fonctionnent comme de véritables systèmes évaporatoires. Durant les saisons humides (hiver et printemps), une fine nappe d'eau salée (300 à 400 g/L de sels dissous) peut recouvrir leur surface, avant de s'évaporer en été, laissant des dépôts salins, principalement constitués de chlorure de sodium.

Après des épisodes pluvieux exceptionnels, ces dépressions peuvent temporairement se transformer en lacs de plusieurs mètres de profondeur, mais la forte évapotranspiration estivale entraîne rapidement un assèchement total.

Sous l'action du vent, les particules fines et cristaux de sel (notamment le gypse et le chlorure de sodium) sont alors transportés et accumulés en bordure des dépressions, contribuant à la dégradation physique et chimique des sols environnants.

Autour de ces systèmes, la présence d'une nappe phréatique salée, plus ou moins profonde, favorise la formation de sols halomorphes et renforce la salinisation progressive des zones périphériques (POUGET, 1973).

### *1.6.3 - Causes anthropozoïques*

Au cours des dernières décennies, l'équilibre des écosystèmes naturels des zones arides et semi-arides a subi une perturbation profonde, principalement en raison de la transformation

des modes d'exploitation des terres et de l'évolution socio-économique et technologique des sociétés rurales (Le HOUEROU, 2002).

L'accroissement démographique et la sédentarisation progressive des populations nomades ont entraîné une extension rapide de l'agriculture, souvent au détriment des meilleures zones pastorales.

La végétation naturelle y est fréquemment détruite par des moyens mécaniques puissants, accélérant la dégradation du couvert végétal et la perte de biodiversité (HADDOUCHE et al., 2008).

Cette dynamique est aggravée par une pression pastorale excessive sur des surfaces de plus en plus restreintes et par le prélèvement du bois à des fins domestiques, notamment pour le chauffage et la cuisson (FLORET et al., 1992).

L'ensemble de ces pressions a conduit à une fragilisation accrue des écosystèmes, limitant leur capacité de régénération naturelle et réduisant leur potentiel de production biologique.

Dans les zones les plus sensibles, la surexploitation des ressources renouvelables a favorisé divers processus de dégradation se traduisant par une progression rapide de la désertification. L'économie locale reste largement fondée sur l'élevage extensif ovin et sur une céréaliculture pluviale marginale, deux activités fortement dépendantes des conditions climatiques et soumises à de fortes variations interannuelles de productivité (Le HOUEROU, 2001).

La rareté et l'irrégularité des ressources fourragères constituent ainsi une contrainte majeure pour l'élevage, entraînant des crises alimentaires cycliques des troupeaux lors des périodes de sécheresse prolongées (Le HOUEROU, 2006).

Face à la dégradation avancée des milieux naturels et à la pression croissante des activités humaines et pastorales, la régénération spontanée du couvert végétal devient de plus en plus limitée.

La restauration de ces écosystèmes nécessite désormais le recours à des techniques modernes de gestion et d'aménagement des terres, reposant sur la valorisation des eaux pluviales et la mise en place de plantations d'espèces ligneuses adaptées, capables de renforcer la productivité, tout en stabilisant les sols et en réduisant les phénomènes érosifs (Le HOUEROU, 1992).

#### *1.6.4 - Evolution de la population steppique*

Le nomadisme, et plus particulièrement la transhumance (Achaba–Azzaba), constitue historiquement la principale stratégie pastorale développée par les populations steppiques.

Cette pratique découle à la fois de facteurs historiques, économiques et sociaux, et représente une forme d'adaptation aux contraintes environnementales d'un milieu où les ressources fourragères présentent une forte variabilité spatio-temporelle (HADDOUCHE et al., 2008).

Traditionnellement, les mouvements de transhumance s'effectuent vers les zones telliennes en été (Achaba) et vers les parcours présahariens en hiver (Azzaba).

Ce système de mobilité saisonnière permettait de répartir la charge pastorale sur l'ensemble du territoire et de préserver les parcours steppiques en leur offrant des périodes de repos et de régénération naturelle (NEDJIMI et al., 2006).

La croissance démographique enregistrée au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle a profondément transformé cet équilibre.

La population steppique, estimée à environ 900 000 habitants en 1954, dépasse désormais les sept millions en 1999 (H.C.D.S., 2005).

Cette évolution démographique rapide s'est traduite par une sédentarisation progressive et une réduction considérable des déplacements pastoraux traditionnels.

Aujourd'hui, la transhumance de grande amplitude, qui assurait autrefois une utilisation rationnelle et durable des ressources naturelles, ne concerne plus que près de 5 % de la population steppique (NEDJIMI et al., 2008).

La majorité des éleveurs adoptent désormais un mode de vie semi-sédentaire, combinant céréaliculture, élevage ovin et résidence fixe, traduisant ainsi une mutation profonde du système de production pastoral (KHALDOUNI, 2000).

#### *1.6.5 - Surpâturage à revoir et a synthétisé*

Le pastoralisme constitue l'activité économique et culturelle fondamentale des zones steppiques.

Cependant, à côté de cette forme traditionnelle d'élevage, fondée sur la subsistance et la mobilité, s'est développé un pastoralisme moderne, davantage orienté vers la commercialisation des produits animaux et l'optimisation économique des exploitations.

Ces deux formes, bien que distinctes, ont en commun de soumettre les parcours à une pression croissante, sans toujours tenir compte des impératifs de conservation des paysages et des ressources naturelles (HADEID, 2008).

L'élevage traditionnel repose sur une logique d'adaptation et de valorisation raisonnée des ressources naturelles.

Pour les pasteurs nomades ou semi-sédentaires, le cheptel représente avant tout une réserve de valeur et un capital de sécurité, garant de la stabilité sociale et économique des familles.

À l'inverse, le pastoralisme moderne, pratiqué par les grands éleveurs, répond à une logique marchande, où la recherche du profit immédiat prime sur les considérations écologiques.

Dans ce modèle, la pression pastorale devient souvent excessive, conduisant à une surexploitation des parcours et à une diminution du couvert végétal (MONTCHAUSSE, 1977 ; HADEID, 2008).

Ces deux systèmes se distinguent également par leurs moyens techniques et logistiques.

Les éleveurs traditionnels, disposant de moyens de transport limités, tendent à réduire leurs zones de parcours, concentrant ainsi leur bétail à proximité des zones d'habitat.

Cette pratique entraîne la formation d'auréoles de dégradation autour des agglomérations.

À l'inverse, les éleveurs modernes, mieux équipés, peuvent déplacer plus facilement leurs troupeaux, exerçant une pression diffuse mais constante sur l'ensemble du territoire steppique.

Ainsi, malgré leurs différences structurelles et économiques, ces deux formes d'élevage contribuent simultanément au surpâturage, réduisant la capacité de régénération des parcours (HADEID, 2008).

Selon NEDJRAOUI (2012), la structure du cheptel steppique demeure largement dominée par les ovins, qui représentent près de 78 % de l'effectif total, suivis des caprins (14 %) et des bovins (6 %).

Les régions steppiques et présahariennes concentrent à elles seules près de 80 % du cheptel national, témoignant du rôle pastoral majeur de ces zones dans l'économie rurale algérienne.

Tableau n° 1 : Variation des effectifs du cheptel durant la période 1987-1999 (en milliers de tête)

Années	1999	1997	1993	1995	1991	1989	1987
<b>Brebis</b>	11000	10000	10964	11500	9098	10354	9784
<b>Camelins</b>	154	134	125	126	132	123	120
<b>Chèvres</b>	1680	1680	1492	1600	1262	1990	1960
<b>Vaches Bovins laitiers améliorés</b>	752	720	724	731	661	705	705
<b>Vaches Bovins laitiers modernes</b>	248	208	188	206	166	173	146
<b>Autre</b>	12575	10519	11367	9306	11479	9892	9524
<b>Total</b>	24410	21264	22867	21475	20807	21248	20252

Tableau n° 2 : Variation du cheptel de la période 2003-2010 (en milliers de tête)

Années	2003	2004	2005	2006	2007	2009	2010
<b>Brebis</b>	9860	10184	10396	10696	10899	11852	13086
<b>Camelins</b>	253	273	269	286	291	301	314
<b>Chèvres</b>	1904	1940	2027	2151	2200	2298	2492
<b>Vaches Bovins laitiers améliorés</b>	640	645	624	639	643	652	915
<b>Vaches Bovins laitiers modernes</b>	192	199	204	208	216	229	
<b>Autre</b>	9790	10390	10834	11282	2449	12017	12407
<b>Total</b>	<b>22639</b>	<b>23631</b>	<b>24354</b>	<b>25262</b>	<b>16698</b>	<b>27349</b>	<b>29214</b>
M.A.D.R. / Ministère de l'Agriculture : Statistiques agricoles (2000-2010)							

L'analyse des deux tableaux met en évidence une relative stabilité dans la répartition des quatre principaux types d'élevage au cours de la période considérée. Par exemple, la proportion des ovins demeure quasi constante, oscillant entre 77 % et 78 %, une tendance similaire s'observant pour les autres catégories d'animaux.

### ***1.6.6 - Défrichement des parcours et pratiques culturales***

Les cultures annuelles, dominées par la céréaliculture, visent principalement à réduire le déficit alimentaire du cheptel provoqué par les périodes de sécheresse. Cependant, la pratique du labour sur ces terres accentue la vulnérabilité des sols, augmentant les risques de dégradation liés à l'érosion, qu'elle soit éolienne ou hydrique (BENSOUIAH, 2002 ; NEDJIMI et al., 2008 ; HADDOUCHE, 1998).

### ***1.6.7 - Le régime juridique des terres***

Parmi les principaux facteurs de la désertification figure l'insuffisance de cadres juridiques et réglementaires visant à protéger et à valoriser ces terres. L'absence de lois adaptées et de projets de développement durable, appuyés conjointement par l'État et les populations steppiques, ainsi que le manque de suivi régulier, accentuent la vulnérabilité de ces espaces.

Lorsque les agriculteurs et les éleveurs perdent le contrôle ou la sécurité d'exploitation à long terme de leurs terres, leur engagement envers des pratiques environnementales durables tend à diminuer. Les phénomènes de rareté de l'eau, d'épuisement des nappes souterraines, d'érosion et de salinisation des sols résultent largement de lacunes institutionnelles et politiques. La sécurité foncière ne suppose pas nécessairement une propriété privée ; en effet, plusieurs systèmes communautaires traditionnels de gestion collective ont démontré leur efficacité au fil du temps.

Autrefois, dans les steppes algériennes, un équilibre s'était établi entre les ressources pastorales et les effectifs du cheptel, soutenu par des modes de vie adaptés comme le nomadisme et la transhumance. Ces pratiques permettaient une régénération naturelle des parcours après les longues sécheresses. Aujourd'hui, cet équilibre est rompu : la multiplication du cheptel, l'usage inapproprié du labour mécanisé, la désorganisation de la transhumance et la surexploitation des pâturages ont provoqué une dégradation alarmante des écosystèmes steppiques. Cette détérioration se traduit par la régression des pâturages et l'avancée des zones désertiques. Une planification et une gestion raisonnée des parcours, tenant compte des spécificités locales et des contraintes environnementales, s'imposent donc comme une priorité. Il devient indispensable d'adopter une politique cohérente et durable d'utilisation de l'espace steppique (NEDJIMI et al., 2012).

## **Chapitre 2 : OUTILS D'OBSERVATION ET D'ANALYSE SPATIALE « APPOINT DE LA TELEDETECTION ET DES SIG DANS L'ETUDE DES DYNAMIQUES ENVIRONNEMENTALES »**

La télédétection, souvent utilisée en complémentarité avec les Systèmes d'Information Géographique (SIG), représente aujourd'hui un ensemble d'outils technologiques performants pour l'analyse approfondie des phénomènes environnementaux, tant sur le plan spatial que temporel. Ces approches modernes offrent des moyens efficaces et précis pour l'observation, la cartographie et la gestion des dynamiques naturelles et anthropiques, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et à une gestion durable des ressources environnementales.

Parmi les divers champs d'application de la télédétection, l'hydrologie occupe une place de choix. Elle permet notamment de suivre l'évolution des ressources en eau, de détecter les changements dans les bassins versants et d'évaluer les impacts des variations climatiques ou des activités humaines sur le cycle hydrologique (ENNEBATI, 2015).

L'objectif principal de ce travail est de démontrer comment l'intégration des données de télédétection et des outils SIG peut contribuer à la régionalisation et à la caractérisation des potentialités hydrologiques, en offrant une approche spatiale et analytique plus précise pour l'évaluation des ressources en eau.

### **I. Télédétection**

#### **I.1 - Définition**

La télédétection a fait l'objet de nombreuses définitions selon les approches et les disciplines des chercheurs.

Selon SCANVIC (1983), elle correspond à « l'ensemble des techniques mises en œuvre à partir de plateformes aériennes ou spatiales – telles que les avions, les ballons ou les satellites – visant à étudier la surface terrestre, d'autres planètes ou encore l'atmosphère, à travers l'analyse des ondes électromagnétiques émises, réfléchies ou diffractées par les corps observés ».

De leur côté, DESHAYES et MAUREL (1990) considèrent la télédétection comme un moyen d'observer et de caractériser les objets à distance par l'étude de leurs propriétés spectrales. Selon eux, chaque objet absorbe, émet, diffuse et réfléchit un rayonnement électromagnétique

spécifique, qu'il est possible d'enregistrer puis d'analyser afin d'en extraire des informations physiques et biologiques.

HADDOUCHE (1998) définit la télédétection comme « un ensemble de moyens – vecteurs, capteurs, programmes de traitement, etc. – permettant d'appréhender à distance, depuis quelques mètres jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres, les éléments de la surface terrestre à partir de leurs caractéristiques spectrales ».

Enfin, pour TEILLET (1999), la télédétection représente « une source essentielle d'information pour la gestion des couverts végétaux et la cartographie des transformations survenues dans les écosystèmes terrestres à différentes échelles, qu'elles soient régionales, continentales ou globales ». Cette définition met particulièrement en évidence l'intérêt de la télédétection pour les agronomes et les chercheurs en sciences naturelles et environnementales.

## **I.2 - Objectifs de la télédétection**

### ***I.2.1 - La cartographie***

- ⇒ Selon NAERT (1995), la TÉLÉDÉTECTION constitue un outil essentiel d'acquisition et d'analyse de données permettant une meilleure compréhension des composantes physiques et biologiques de la Terre.
- ⇒ Elle fournit un ensemble d'informations continues et fiables, facilitant l'étude, la cartographie et la gestion durable des ressources naturelles.
- ⇒ Ses principales contributions peuvent être résumées comme suit :
- ⇒ La production d'images et de photographies satellitaires, dont l'interprétation autorise de nombreuses applications dans la surveillance environnementale et la planification territoriale ;
- ⇒ La fourniture régulière de données précises, denses et répétitives, permettant une observation systématique des milieux naturels sans en perturber l'équilibre ;
- ⇒ La production d'informations spatiales exploitables pour l'élaboration de cartes thématiques (relief, occupation du sol, suivi des changements, etc.), contribuant à une analyse dynamique et objective des territoires.

### ***1.2.2 - L'agriculture***

La TÉLÉDÉTECTION joue un rôle déterminant dans les études prévisionnelles et le suivi de la dégradation des sols, processus qui constitue l'une des principales causes de détérioration des terres agricoles sous l'effet de l'érosion éolienne ou hydrique.

Elle contribue également à la gestion rationnelle, à la surveillance et à la protection des milieux naturels présentant un intérêt écologique et socioéconomique majeur.

### ***1.2.3 - L'aménagement***

Selon MEGHRAOUI (2007), la réalisation d'un aménagement efficace nécessite la mise en œuvre d'une étude multi-temporelle permettant de réduire les incertitudes cartographiques et de développer des scénarios prospectifs adaptés à la planification et à la gestion durable du territoire.

### ***1.2.4 - L'hydrologie***

Les projets de recherche sur la disponibilité en ressources hydriques qu'il s'agisse des sources, des puits ou des nappes phréatiques représentent un travail considérable dans la perspective d'un développement durable.

L'apport de la TÉLÉDÉTECTION se révèle particulièrement précieux dans ce domaine, car il permet de délimiter avec précision les différentes zones (bassins versants, terres agricoles, zones de recharge, etc.) à partir d'images satellitaires.

Cette approche facilite la prospection et l'analyse spatiale à grande échelle, sans nécessiter de déplacements systématiques sur le terrain, notamment lorsque les zones d'étude s'étendent sur plusieurs kilomètres carrés.

Selon PIEYNS (1999), l'apport de la TÉLÉDÉTECTION dans le domaine de l'hydrologie s'est révélé particulièrement déterminant, puisqu'il a permis la mise en œuvre de six grands axes d'étude :

- L'analyse de la couverture neigeuse, essentielle pour l'évaluation des apports hydriques en zones montagneuses ;
- La cartographie des surfaces en eau et leur évolution dans le temps ;
- L'estimation de l'humidité des sols et le suivi de l'évaporation ;
- La constitution de bases de données d'occupation du sol à des fins de gestion intégrée;
- L'étude de la dynamique et de la qualité des eaux, notamment la turbidité ;

- L'application en météorologie, à travers l'estimation des précipitations à partir des observations satellitaires.

### I.3 - Principes de base de la télédétection

La TÉLÉDÉTECTION repose sur l'interaction entre trois composantes essentielles :

Une source d'énergie, une cible (ou objet observé) et un vecteur de mesure permettant la détection et l'enregistrement du signal réfléchi ou émis (Figure n° 2).

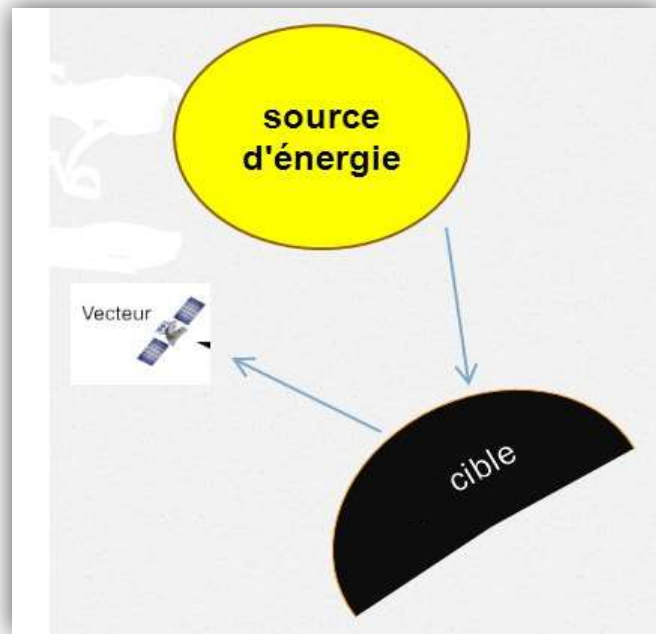


Figure n° 2 : Principe de la télédétection simplifié

#### I.3.1 - La cible

Il s'agit de la portion de la surface terrestre captée par le satellite, dont l'étendue peut varier de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés.

#### I.3.2 - La source d'énergie

La source d'énergie correspond à l'élément qui éclaire la cible en émettant un rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire un flux de photons.

En écologie, cette source d'énergie est généralement le Soleil, qui fournit le rayonnement nécessaire à l'observation. Cependant, dans le cas des systèmes RADAR, un émetteur embarqué sur le satellite joue ce rôle en générant lui-même l'énergie nécessaire à l'acquisition des données. Il est également possible de mesurer la chaleur émise par la surface d'une cible

dans le domaine de l'infrarouge thermique ; dans ce cas, c'est la cible elle-même qui constitue la source d'énergie, bien qu'il s'agisse d'une énergie d'origine solaire, absorbée puis réémise.

### ***1.3.3 - Le vecteur***

Le vecteur, ou plate-forme de télédétection, est l'élément qui permet de mesurer l'énergie solaire c'est-à-dire le rayonnement électromagnétique réfléchi par la surface cible. Ce vecteur peut être constitué d'un satellite ou d'un aéronef, positionné à une altitude variant de quelques centaines de mètres à environ 36 000 kilomètres au-dessus du sol. Les capteurs embarqués sur ces plateformes enregistrent le rayonnement réfléchi, puis les données recueillies sont transmises vers des stations terrestres de réception grâce à un système d'émission intégré.

On distingue deux types principaux de télédétection :

La télédétection passive, lorsque le satellite se limite à capter le rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre ;

La télédétection active, lorsque le satellite émet lui-même une onde électromagnétique vers la cible et mesure l'écho renvoyé, comme c'est le cas des systèmes RADAR et LIDAR.

### **I.4 - Les étapes de réalisation**

La télédétection peut être schématisé en détail comme suit (BONN et ROCHON, 1993) :

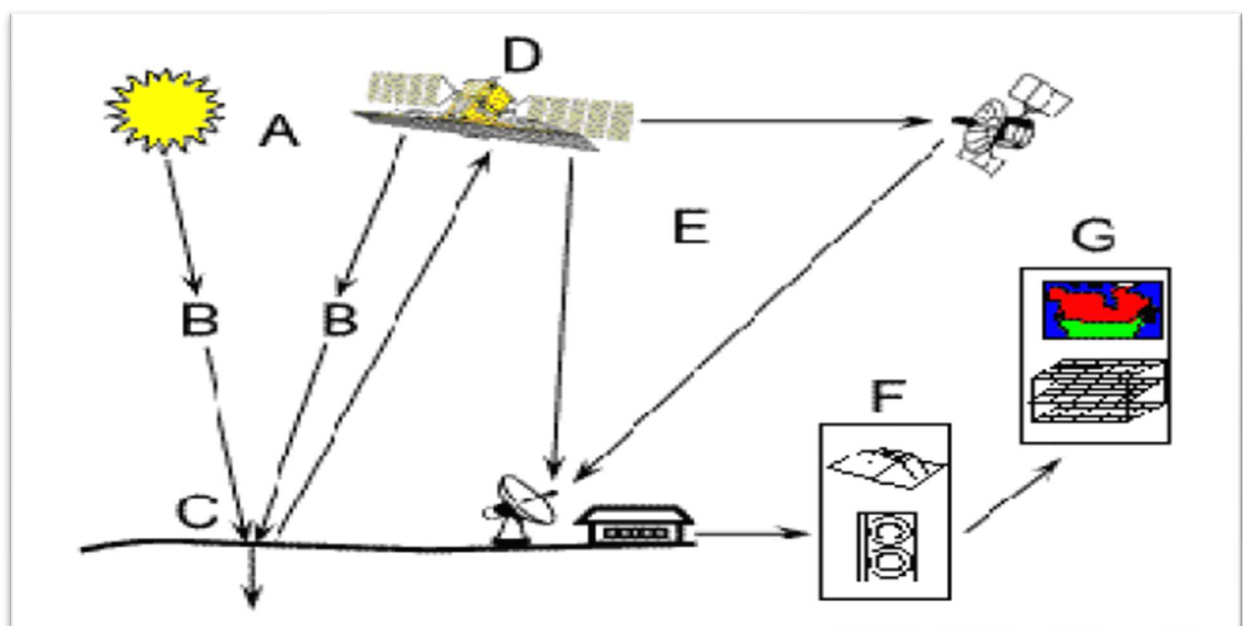


Figure n° 3: Les différentes étapes de télédétection (BONN et ROCHON, 1993)

- A. Production d'énergie ou dispositif d'illumination
- B. Propagation du rayonnement et influence de l'atmosphère
- C. Interaction entre le rayonnement et la cible
- D. Détection de l'énergie par le capteur
- E. Transmission et traitement des signaux reçus
- F. Analyse et interprétation des données obtenues
- G. Exploitation et applications pratiques

### **I.5 - Techniques de la télédétection**

les différentes techniques de télédétection se différencient selon plusieurs paramètres, parmi lesquels :

le type de vecteur employé pour transporter le capteur, qu'il s'agisse d'un avion ou d'un satellite ;

- Le mode d'acquisition des informations, qui peut être analogique ou numérique ;
- La résolution spatiale des données obtenues ;
- La portion du spectre électromagnétique utilisée lors de l'enregistrement ;
- L'étendue de la zone observée par le système.

Actuellement, on distingue principalement quatre grandes catégories de techniques de télédétection :

- La photographie aérienne ou spectrale ;
- La télédétection multispectrale dans le domaine du visible ;
- La télédétection thermique ;
- Et la radargraphie.

Ces techniques se différencient par la nature des capteurs employés (caméra, radiomètre, radar) ainsi que par leur mode d'acquisition, qui peut être actif ou passif selon la source d'énergie utilisée (HADDOUCHE, 1998).

### **I.6 - Bases physiques et technologiques**

#### ***I.6.1 - Le rayonnement électromagnétique***

Le concept de spectre renvoie à la décomposition de la lumière blanche à l'aide d'un prisme, révélant ainsi les différentes composantes du rayonnement visible. Cette notion a ensuite été élargie à l'ensemble des ondes électromagnétiques, dont le domaine visible ne représente

qu'une faible portion (Figure n° 4). Les divers types de rayonnements sont classés en fonction de leur longueur d'onde et de leur fréquence, paramètres fondamentaux pour l'analyse et l'interprétation des données de télédétection.

Les principales zones employées dans les mesures de télédétection sont :

· **Les ondes non-visibles :**

- ✓ 0.35 – 0.40  $\mu\text{m}$  (ultraviolet)
- ✓ 0.70 – 0.90  $\mu\text{m}$  (proche infrarouge)

· **Les ondes visibles :**

- ✓ • La gamme spectrale visible s'étend de 0,40 à 0,70  $\mu\text{m}$ .
- ✓ • L'œil humain ne perçoit que la combinaison de trois bandes principales :
  - 0,40 – 0,50  $\mu\text{m}$  : bleu,
  - 0,50 – 0,60  $\mu\text{m}$  : vert-jaune,
  - 0,60 – 0,70  $\mu\text{m}$  : rouge. (HADDOUCHE, 1998)

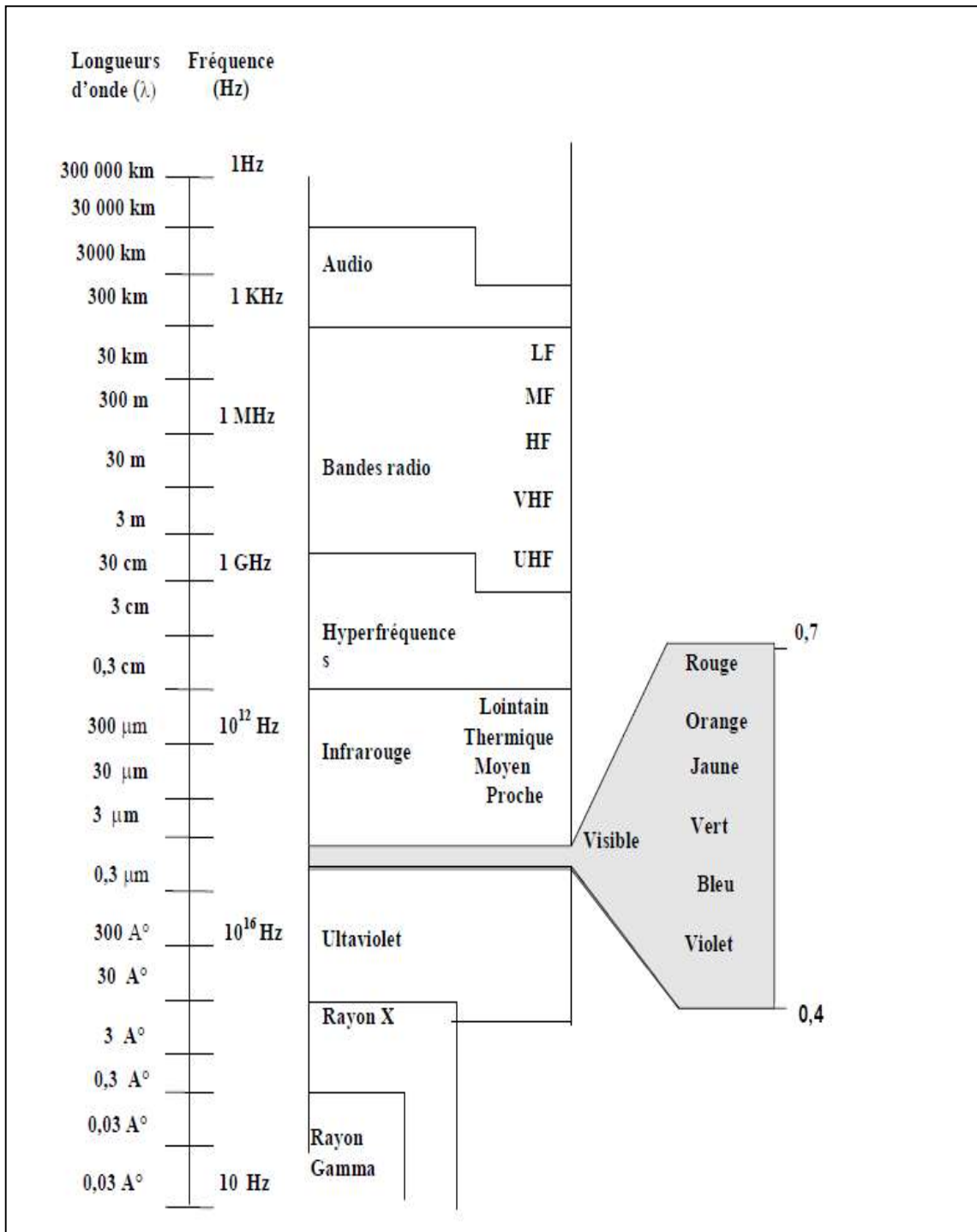


Figure n° 4 : Diagramme du spectre électromagnétique pertinent pour la télédétection par satellite (BONN et ROCHON,1993).

### 1.6.2 - Sources d'énergie électromagnétique

Deux types de sources électromagnétiques interviennent en télédétection :

- ⇒ Naturelles : Soleil, Terre et rayonnement du corps noir ;
- ⇒ Artificielles : systèmes actifs comme les radars et les lasers.

### I.6.2.1 - Sources naturelles

Les sources naturelles, également appelées sources thermiques, correspondent aux émetteurs d'énergie présents dans la nature. Le corps noir représente le modèle idéal de radiateur, car il émet l'intégralité de l'énergie qu'il absorbe. Le rayonnement solaire s'apparente fortement à celui d'un corps noir, tandis que la Terre constitue elle aussi une source d'énergie, émettant principalement dans le domaine de l'infrarouge lointain. En réalité, tout objet situé à la surface terrestre émet un rayonnement dès lors que sa température est supérieure au zéro absolu (-273 °C).

### I.6.2.2 - Les sources artificielles

Les sources artificielles regroupent les dispositifs technologiques tels que les lasers et les radars, conçus pour produire un rayonnement électromagnétique de manière contrôlée. Ces systèmes reposent sur l'émission d'une onde artificielle en direction d'une surface cible, suivie de la détection et de l'enregistrement du signal réfléchi. Ce principe constitue la base de la télédétection active, largement utilisée pour l'observation de la Terre et la mesure de ses caractéristiques physiques.

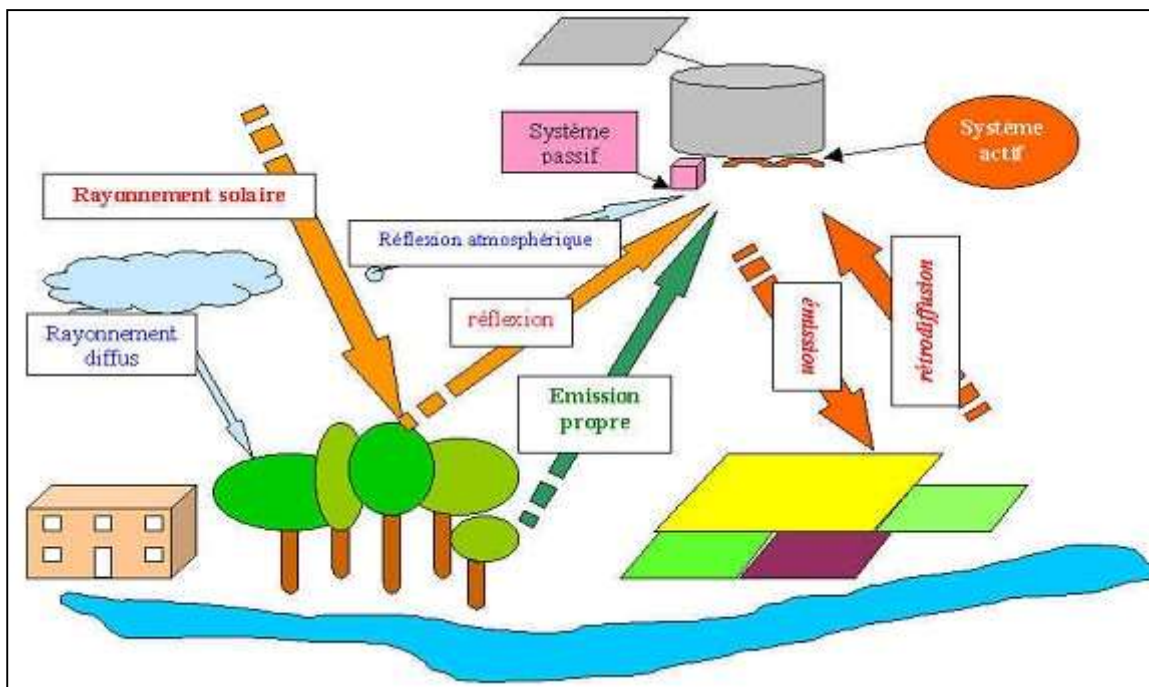


Figure n° 5 : Différence entre capteur Actif et Passif (ZAOUÏ, 2013)

### ***I.6.3 - Notion de réflectance***

#### **I.6.3.1 - Définition de la réflectance**

La réflectance est définie comme le rapport entre l'énergie réfléchiée par un corps et l'énergie incidente. Les informations extraites des images satellitaires, quantifiées sous forme numérique, traduisent l'intensité relative des différentes longueurs d'onde reçues. Ces valeurs, enregistrées simultanément, constituent ce que l'on appelle la signature spectrale des objets (GIRAD, 2010).

Chaque objet possède ainsi une signature spectrale propre, ce qui rend possible sa discrimination sur les images de télédétection (HADDOUCHE, 1998 ; HADDOUCHE, 2017).

La réflectance des sols est étroitement liée à leur composition physique et chimique ainsi qu'à leur coloration. Elle fluctue en fonction de différents paramètres de surface, tels que la teneur en matière organique, la présence d'oxydes de fer ou de carbonate de calcium, et le niveau d'humidité (HADDOUCHE, 1998). Les perceptions de couleur observées résultent des valeurs de réflectance mesurées dans le domaine du spectre visible (GIRAD, 2010).

La mesure de la réflectance s'effectue à l'aide de spectroradiomètres, permettant de tracer des courbes de réflectance en fonction de la longueur d'onde. Selon leur nature, les objets présentent des courbes caractéristiques distinctes. Cette propriété dont la couleur constitue la manifestation la plus connue est à l'origine du développement de systèmes d'acquisition multi-canaux, chacun correspondant à une bande spécifique de longueurs d'onde.

L'expérience montre que, dans des conditions géométriques d'incidence et d'observation identiques, la luminance d'un objet varie en fonction de la longueur d'onde du rayonnement reçu (SCANVIC, 1983).

#### **I.6.3.2 - La compréhension du phénomène**

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique atteint la surface d'un objet, il obéit à la loi de conservation de l'énergie, qui s'exprime par la relation suivante :

$$R+T+A= 1.$$

Où : R: énergie Réfléchiée;

T: énergie Transmise;

A: énergie Absorbée.

Les capteurs des systèmes de télédétection enregistrent que les ondes réfléchies par les objets. Ce sont donc ces ondes réfléchies qui revêtent un intérêt particulier pour l'analyse et l'interprétation des images satellitaires.

Cependant, il convient de rappeler que tous les objets émettent également un rayonnement à différentes longueurs d'onde, en fonction de leur température et de leur nature physique. Cette énergie émise peut elle aussi être captée par des instruments de télédétection et exploitée à des fins d'observation ou de mesure.

En résumé, les capteurs enregistrent principalement l'énergie issue soit d'un rayonnement incident réfléchi, soit d'une émission propre de l'objet observé, selon le type de système utilisé (passif ou actif).

## **I.7 - Méthodes de traitement d'image**

### **I.7.1 - L'image numérique de la télédétection**

Seuls les rayonnements renvoyés par les objets sont captés et enregistrés par les capteurs utilisés en télédétection. Ce sont donc ces ondes réfléchies qui revêtent un intérêt particulier pour l'analyse et l'interprétation des images satellitaires.

Cependant, il convient de rappeler que tous les objets émettent également un rayonnement à différentes longueurs d'onde, en fonction de leur température et de leur nature physique. Cette énergie émise peut elle aussi être captée par des instruments de télédétection et exploitée à des fins d'observation ou de mesure.

En résumé, les capteurs enregistrent principalement l'énergie issue soit d'un rayonnement incident réfléchi, soit d'une émission propre de l'objet observé, selon le type de système utilisé (passif ou actif).

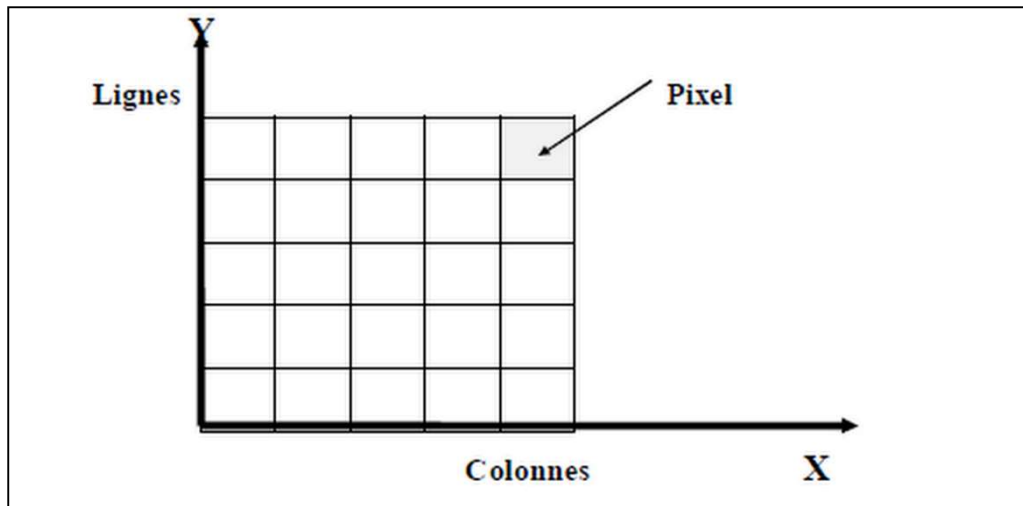


Figure n° 6 : Représentation de pixel d'une image (HADDOUCHE, 1998)

Ces images sont généralement acquises à l'aide de capteurs électroniques embarqués sur des vecteurs (satellites ou avions), qui captent l'énergie issue de la surface terrestre. Le signal reçu est ensuite converti en signaux électriques par les détecteurs, avant d'être numérisé et stocké sous forme d'image.

Chaque image satellite est constituée d'une multitude de pixels (éléments d'image). Le pixel représente la plus petite unité spatiale figurant sur une image et revêt une importance capitale : l'ensemble des pixels forme l'image complète et fournit les informations spatiales nécessaires à son interprétation.

La résolution spatiale d'une image est un paramètre fondamental : elle correspond à la plus petite distance séparant deux objets adjacents que le capteur est capable de distinguer. Plus la résolution est fine, plus les détails observables sont nombreux et précis.

### ***1.7.2 - Signification thématique des canaux***

La cible thématique possède une signature spectrale spécifique, c'est-à-dire une réponse différente selon les bandes spectrales observées. L'analyse de ces signatures permet d'identifier, de caractériser et de cartographier les différents types de surfaces.

Selon ESCADAFAL (1989), « l'analyse des réflectances moyennes des divers thèmes individualisés dans chacun des canaux permet le choix des bandes spectrales les plus

appropriées pour la cartographie des sols ». Ainsi, la compréhension de la réponse spectrale des objets étudiés est une étape essentielle du traitement des images satellitaires.

#### **I.7.2.1 - Indice de brillance**

L'indice de brillance reflète les variations observées sur les surfaces de sols nus. Le passage de tonalités sombres vers des tonalités plus claires se traduit généralement par une augmentation simultanée des valeurs radiométriques dans plusieurs bandes spectrales. Cette évolution, souvent désignée sous le nom de « droite des sols », permet de distinguer divers paramètres de surface, notamment l'humidité, la rugosité ou encore la couleur du sol (HINSE, 1989 ; BIALOUZ, 1977 ; GIRAD, 2010 ; ARROUAYS, 1987).

Cet indice prend toute son importance au niveau du sol, notamment en raison de la corrélation observée entre les canaux rouge et infrarouge, relation mise en évidence par KING (1994). Il peut d'ailleurs être comparé à l'indice de végétation, les deux reposant sur des réponses spectrales similaires mais appliquées à des cibles différentes.

#### **I.7.2.2 - Indice de végétation**

L'indice de végétation constitue une simplification de l'information radiométrique issue des capteurs. Ces indices sont d'excellents indicateurs de la densité et de l'état du couvert végétal, mais leur utilisation requiert une interprétation prudente, accompagnée d'une vérification par des données de terrain (DESHAYES et MAUREL, 1990).

Issus d'une combinaison linéaire de diverses bandes spectrales, ces indices visent essentiellement :

- A mettre en évidence la corrélation entre l'indice de végétation et la densité du couvert, en vue d'extraire des paramètres liés à la croissance ;
- A exploiter ces paramètres pour estimer les rendements agricoles.

Le pigment chlorophyllien, indispensable au fonctionnement des feuilles, présente une forte capacité à absorber les radiations bleues et rouges, tout en réfléchissant majoritairement la lumière verte, ce qui confère à la végétation sa couleur caractéristique. Cependant, les feuilles renvoient également une part significative du rayonnement dans le proche infrarouge (PIR), correspondant aux longueurs d'onde comprises entre 0,7 et 1,3  $\mu\text{m}$ . Dans cette portion du spectre, la réflexion n'est plus régie par les pigments, mais par l'architecture interne des feuilles, en particulier le parenchyme lacuneux, qui diffuse intensément le rayonnement PIR.

Si l'œil humain pouvait percevoir le proche infrarouge, la végétation apparaîtrait extrêmement lumineuse dans ce domaine spectral. En télédétection, l'analyse de la végétation nécessite donc des capteurs sensibles au proche infrarouge.

Une végétation saine se caractérise par une réflectance élevée dans le PIR, tandis qu'une végétation stressée ou dégradée (par la sécheresse, la maladie ou le vieillissement) présente une faible réflexion. L'étude du taux de lumière infrarouge réfléchi permet ainsi d'évaluer la vigueur et la santé du couvert végétal, ainsi que le degré de maturité d'une culture telle que le maïs ou le blé. Une culture arrivée à maturité, réalisant peu ou plus de photosynthèse, apparaîtra donc faiblement lumineuse dans le domaine du PIR.

### **I.7.3 - Traitement des données**

Avant que les données numériques ne puissent être interprétées, elles doivent subir une série d'opérations de prétraitement et d'amélioration visant à corriger les défauts inhérents à l'acquisition et à optimiser la qualité visuelle et radiométrique des images (BONN et ROCHON, 1993).

Cette chaîne de traitement comprend deux grandes étapes :

#### **I.7.3.1 - Les prétraitements**

##### **a- Les corrections radiométriques**

Les images brutes issues des capteurs présentent souvent des anomalies radiométriques, ponctuelles ou linéaires, dues à des défauts de calibration ou de fonctionnement du capteur embarqué.

Selon BARIOU (1978), « une correction radiométrique vise à éliminer ces défauts et à reformatter les données, notamment par une calibration relative des canaux et la suppression du lignage présent dans les images ».

##### **b- Les corrections géométriques**

Les données télédéteçtées peuvent également comporter des distorsions géométriques causées par les instruments d'enregistrement, les conditions de vol, ou encore la courbure terrestre. Ces distorsions sont corrigées par rectification géométrique, de manière à rendre l'image superposable à une carte topographique servant de référence (BARIOU, 1978).

### I.7.3.2 - Les traitements d'améliorations

Les capteurs satellitaires disposent d'une sensibilité radiométrique de 256 niveaux de gris, mais l'enregistrement sur film ou support visuel réduit cette sensibilité d'un facteur d'environ seize, entraînant une perte d'information. Pour limiter cette perte, un ajustement de la densité est effectué afin de restituer les contrastes de manière plus représentative.

#### La composition colorée

L'information contenue dans un seul canal ne permet pas toujours de mettre en évidence les caractéristiques recherchées. Pour pallier cette limite, on réalise une composition colorée en combinant trois canaux distincts, chacun associé à l'une des trois couleurs primaires : bleu, vert et rouge.

Cette combinaison, souvent désignée par l'acronyme RGB, correspond à une superposition de bandes spectrales (généralement le vert, le rouge et le proche infrarouge), permettant une restitution visuelle plus détaillée et une interprétation thématique plus fiable des images de télédétection.

Tableau n° 3: Association entre couleurs primaires et leurs longueurs d'onde (HADDOUCHE, 1998)

Couleur Afféctée	Longueur d'onde
Bleu	Vert
Rouge	Proche infrarouge
Vert	Rouge

Le produit final du traitement colorimétrique se présente sous la forme d'une image trichrome, désignée comme composition colorée, où les divers éléments se distinguent par des nuances résultant de la combinaison des trois couleurs primaires : rouge, vert et bleu.

#### Conversion RVB – ITS.

Tout comme une couleur peut être représentée par la combinaison de proportions de rouge, vert et bleu dans le système RVB, elle peut également être caractérisée à l'aide de trois autres composantes : l'Intensité (I), la Teinte (T) et la Saturation (S).

#### Intensité (I)

L'intensité traduit le degré d'éclaircissement ou d'assombrissement d'une couleur. Elle correspond à la quantité d'énergie réfléchiée par l'objet observé.

#### Teinte (T)

La teinte représente la dominante de couleur perçue, déterminée par la longueur d'onde du rayonnement (exemples : rouge, vert, bleu, jaune).

Remarque : les couleurs neutres (noir, gris, blanc) ne possèdent pas de teinte propre.

Saturation (S)

La saturation varie de manière inverse avec la proportion de lumière blanche qui dilue l'intensité d'une couleur. Elle reflète ainsi la pureté d'une teinte : plus celle-ci est saturée, plus elle apparaît vive et bien définie.

Ces trois paramètres I, T, S forment donc un triplet de propriétés fondamentales nécessaires à la définition d'une couleur.

Le principe de ce traitement consiste à générer, à partir des canaux bruts du système RVB, de nouveaux canaux transformés représentant les composantes Intensité, Teinte et Saturation (ITS).

Ce procédé présente un grand intérêt car il améliore la perception visuelle des images et facilite la différenciation géomorphologique et végétale des paysages.

En général :

- I varie de 0 à 1, exprimant le passage du noir au blanc (souvent en pourcentage) ;
- T varie de 0 à 360°, décrivant l'ensemble des teintes du spectre visible ;
- S varie de 0 à 100 %, traduisant la pureté ou l'intensité de la couleur.

#### I.7.3.3 - Les traitements d'optimisations

##### ✓ **Optimisation de la densité**

Ce traitement vise à améliorer la perception géomorphologique d'une image en mettant en évidence les détails dissimulés dans les zones trop sombres ou trop claires. L'optimisation de la densité permet ainsi une meilleure lecture visuelle des contrastes et facilite la distinction des structures de surface.

##### ✓ **Analyse en Composantes Principales (ACP)**

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a pour objectif de décorrélérer et de compresser l'information en réduisant la redondance entre les canaux d'une image. Cette méthode statistique, purement descriptive, extrait des composantes principales à partir des données initiales :

La première composante regroupe la majeure partie de l'information, notamment celle relative à la géomorphologie et à la végétation ;

Les composantes suivantes contiennent une information complémentaire, souvent associée aux zones à forte brillance, comme certains types de sols.

L'ACP permet ainsi de réduire la dimension du fichier de données tout en conservant l'essentiel de l'information utile à l'analyse thématique.

#### I.7.3.4 - Les traitements spécifiques

##### ✓ **Filtrage**

- ✓ Le filtrage consiste à isoler, au moyen de filtres adaptés, les objets présentant des signatures spectrales distinctes, afin de les mettre en évidence.
- ✓ Parmi les méthodes les plus courantes :
- ✓ Le filtrage de Sobel et celui de Kirsh, qui appliquent une matrice (3×3) destinée à rehausser les différences de niveaux de gris selon une ou plusieurs directions précises ;
- ✓ Le rapport entre bandes spectrales, qui repose sur la comparaison des valeurs de réflectance d'un objet dans différentes gammes de longueurs d'onde : la différence obtenue constitue sa signature spectrale caractéristique.

##### ✓ **Rehaussement d'image**

Le rehaussement d'image vise à accentuer les transitions entre les objets thématiques d'une scène, améliorant ainsi la délimitation des contours et la netteté des nuances de couleurs. Ce procédé accroît la lisibilité des structures géographiques et facilite leur interprétation.

##### ✓ **Classification multi spectrale**

- La classification multispectrale consiste à attribuer chaque pixel (ou groupe de pixels) à une classe thématique donnée, selon ses caractéristiques spectrales. Cette opération s'effectue à l'aide de méthodes automatiques de classification, qui fonctionnent selon deux modes :
- le mode supervisé, qui exploite les connaissances préalables de l'utilisateur pour guider la classification ;
- le mode non supervisé, qui repose uniquement sur des algorithmes informatiques, sans intervention directe de l'opérateur.
- Les traitements spécifiques regroupent donc l'ensemble des méthodes destinées à discriminer les différents thèmes d'une image en fonction de leurs signatures spectrales.

Ces thèmes sont identifiés, regroupés en classes, puis analysés ; toutefois, cette classification automatique ne reflète pas toujours fidèlement la réalité du terrain.

- **classification supervisée**

La classification supervisée consiste à regrouper les thèmes d'une image selon leurs signatures spectrales, en intégrant au préalable des informations issues du terrain dans le processus de calcul.

L'attribution des pixels aux différentes classes est ensuite généralisée à l'ensemble de l'image. Les données de référence proviennent d'un échantillonnage effectué sur le terrain, dont les zones sont repérées sur une carte topographique utilisée comme support d'étalonnage.

- **classification non supervisée**

La classification non supervisée se distingue par l'absence de données de terrain dans son traitement.

L'algorithme regroupe automatiquement les pixels en classes selon la similarité de leurs réponses spectrales.

Cependant, ce type de classification requiert une très bonne connaissance du terrain pour interpréter correctement les classes générées. En pratique, les écologues et géomaticiens privilégient généralement la classification supervisée, plus fiable et mieux adaptée aux études environnementales.

Tableau n° 4 : Comparaison des points forts et limites des classifications supervisée et non supervisée (ZAOUI, 2013)

<b>Méthodes</b>	<b>Points forts</b>	<b>Limites</b>
<b>Classifications non Supervisée</b>	Permet une première segmentation automatique des images satellitaires en grands thèmes d'occupation du sol. Cette étape préliminaire est utile pour effectuer un masquage des zones non pertinentes ou exclues de l'analyse.	Le regroupement statistique des valeurs de pixels aboutit à la formation de classes spectrales dont la signification thématique est parfois difficile à interpréter ou à valider sans référence au terrain.
<b>Classifications Supervisée</b>	Produit des classes thématiques clairement identifiées, correspondant à des catégories d'occupation du sol définies à partir d'échantillons de référence.	La mise en œuvre est plus longue et exigeante, notamment en raison de la sélection et de la délimitation précises des zones d'apprentissage, qui nécessitent une bonne connaissance du terrain.

### I.7.3.5 - L'interprétation

À l'issue des différentes étapes de traitement appliquées aux données numériques, on obtient une image optimisée, corrigée et prête pour l'interprétation thématique. Cette phase vise à extraire, à partir des informations radiométriques et spectrales, les éléments pertinents pour l'analyse du territoire étudié.

#### ❖ *La mosaïque*

Pour disposer d'une vue d'ensemble sur une vaste zone d'étude, il est souvent nécessaire de regrouper plusieurs images satellitaires en une seule composition appelée mosaïque.

Cette opération s'effectue généralement en deux étapes :

- a. Amélioration du rendu visuel : elle consiste à obtenir un raccord colorimétrique homogène entre les différentes images, en maintenant des paramètres de seuillage identiques pour tous les canaux de la mosaïque, afin d'assurer une continuité visuelle.
- b. Correction géométrique : elle vise à éliminer les distorsions géométriques dues aux instruments d'enregistrement ou à la courbure terrestre, garantissant ainsi une superposition précise entre les différentes scènes.

#### ❖ *L'interprétation proprement dite*

L'étude des images satellitaires repose sur des principes analogues à ceux employés pour l'interprétation des photographies aériennes. Elle consiste en une analyse visuelle intégrant plusieurs paramètres descriptifs tels que la texture, la structure, la forme et la teinte.

- ✓ Interprétation globale : une vue d'ensemble de l'image permet d'identifier les grandes unités paysagères, les variations de teintes et leur répartition spatiale.
- ✓ Interprétation détaillée : elle consiste à délimiter des zones homogènes, appelées zones isophènes, correspondant à des surfaces présentant des caractéristiques spectrales similaires. Ces zones sont ensuite comparées à des documents de référence (cartes topographiques, données de terrain, rapports, etc.) afin d'attribuer à chaque zone un thème précis.

La légende finale ne peut toutefois être établie qu'après une vérification sur le terrain, qui permet de valider l'interprétation et d'ajuster les limites thématiques si nécessaire.

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

L'association d'informations thématiques à leur localisation géographique constitue un processus fondamental dans de nombreux domaines d'activité : choix de sites, gestion des ressources naturelles, planification urbaine, déploiement d'infrastructures, ou encore cartographie environnementale. Tous ces champs d'application impliquent la manipulation et l'analyse de données spatialisées (FERAH, 2010).

Contrairement à une idée répandue, un logiciel SIG ne se limite pas à un simple outil de cartographie assistée par ordinateur. Il s'agit d'un système informatique intégré permettant de collecter, stocker, gérer, analyser et représenter des données géographiques sous diverses formes (GAMBLIN, 1995).

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) se distinguent par leur flexibilité et leur puissance analytique, offrant des réponses rapides et fiables aux problématiques spatiales. Ils jouent un rôle essentiel dans la gestion des ressources naturelles, la planification territoriale et l'hydrologie appliquée, en facilitant l'intégration et la modélisation de données complexes. Dans le domaine de la gestion des ressources en eau, les SIG permettent une exploitation optimale des modèles de simulation, ainsi que la conception de modèles hydrologiques plus performants et mieux adaptés aux réalités du terrain.

### II.1 - Historique des SIG

La notion de Système d'Information Géographique (SIG) est apparue au cours des années 1960, à la suite de l'extension des systèmes de bases de données à la gestion de l'information géographique. L'objectif initial était de permettre le stockage, la manipulation et l'analyse de données spatialisées dans un cadre informatique unifié.

Au fil des décennies, les SIG ont connu un développement progressif, mais c'est surtout durant les dernières années que leur évolution s'est accélérée de manière significative. Cette expansion rapide répond à un besoin croissant de raisonner sur des phénomènes spatiaux, que ce soit pour la gestion territoriale, l'analyse écologique, ou encore la compréhension des dynamiques environnementales et socio-économiques.

La gestion et la surveillance de l'environnement exigent aujourd'hui la prise en compte de multiples sources d'information afin de faciliter la prise de décision en matière d'aménagement du territoire, de prévention de la dégradation des sols et de lutte contre la désertification. Les SIG offrent ainsi un cadre puissant pour intégrer, croiser et visualiser ces données de manière cohérente et opérationnelle.

L'une des premières applications de l'analyse spatiale remonte à 1854, lorsque le docteur John SNOW mena une étude pionnière durant l'épidémie de choléra à Londres. En représentant sur une carte la localisation des malades et des points d'approvisionnement en eau, il parvint à identifier un puits contaminé comme source principale de l'épidémie. Cet exemple constitue l'une des bases historiques de la pensée géospatiale appliquée à la santé publique.

Dans les années 1960, la nécessité de traiter un grand volume de cartes topographiques en Afrique de l'Est, afin d'identifier les zones favorables à la reforestation, a conduit à envisager l'utilisation de l'informatique pour la gestion et l'analyse des données géographiques (ZAOUI, 2013). Cette initiative marque l'une des étapes fondatrices du développement des SIG modernes.

L'essor de ces technologies a été fortement favorisé par les progrès informatiques et par la prise de conscience environnementale mondiale. Aujourd'hui, les SIG s'imposent comme un outil indispensable dans la planification territoriale, la conservation de la biodiversité et la gestion durable des ressources naturelles. Leur utilisation croissante a encouragé l'émergence d'approches scientifiques transdisciplinaires, combinant la géomatique, l'écologie, l'urbanisme et les sciences sociales, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle génération de méthodes collaboratives et intégrées.

Depuis les années 1970, l'évolution des Systèmes d'Information Géographique (SIG) peut être divisée en trois grandes périodes historiques (ZAOUI, 2013) :

Fin des années 1950 – milieu des années 1970 : période marquée par les débuts de l'informatique et les premières expérimentations de cartographie automatique. Les premiers systèmes de traitement numérique de cartes voient alors le jour, ouvrant la voie à la géomatique moderne.

Milieu des années 1970 – début des années 1980 : diffusion progressive des outils de cartographie automatique et des premiers SIG au sein des organismes d'État, notamment dans

les domaines de la défense, du cadastre, de la géodésie et de la planification territoriale. Ces applications institutionnelles posent les bases d'une utilisation opérationnelle des données géographiques.

Depuis les années 1980 : période de forte expansion marquée par la croissance du marché des logiciels SIG, la démocratisation des ordinateurs personnels (PC) et la mise en réseau des données.

À partir des années 1990, l'apparition des bases de données distribuées et des applications Internet favorise une banalisation de l'usage de l'information géographique, notamment à travers :

- La cartographie en ligne,
- Le calcul d'itinéraires routiers,
- L'utilisation d'outils embarqués liés au GPS,
- Et l'émergence de logiciels libres et de plateformes collaboratives facilitant la diffusion et le partage des données spatiales.

## **II.2 - Définition d SIG**

Le Système d'Information Géographique (SIG) est une abréviation issue de trois notions fondamentales :

- Notion de système : un système est un ensemble cohérent d'éléments interconnectés, entretenant des relations dynamiques et formant un tout fonctionnel.
- Système d'information : il s'agit d'un dispositif organisé regroupant à la fois des équipements, des procédures, des ressources humaines et surtout des données destinées à être traitées et exploitées afin de produire des informations utiles à la décision.
- Système d'Information Géographique (SIG) : cette notion, bien que formulée différemment selon les auteurs, converge vers la même idée essentielle.

Selon l'UNION GÉOGRAPHIQUE INTERNATIONALE (I.G.N.), un SIG représente le point de rencontre entre le traitement de l'information et les disciplines utilisant les techniques d'analyse spatiale (TOMLINSON, 1988).

D'autres définitions complètent cette approche.

Ainsi, pour BURROUGH (1986), un SIG est « un ensemble d'outils puissants permettant de rassembler, stocker, manipuler, extraire et visualiser des données spatiales du monde réel, en fonction d'objectifs spécifiques ».

Lors du colloque de Strasbourg (1990), DIDON (1990) a proposé une définition institutionnelle selon laquelle un SIG est « un système d'information permettant, à partir de sources diverses, de rassembler, organiser, gérer, analyser et combiner des données géographiquement localisées, contribuant à la gestion et à la planification de l'espace ».

De même, COWEN (1988), cité par l'I.N.R.A. (1991), considère le SIG comme un outil d'aide à la décision, facilitant l'intégration des données spatiales dans l'analyse et la résolution des problèmes environnementaux.

En synthèse, ces définitions soulignent que le module de données constitue le cœur fonctionnel d'un SIG.

Les SIG modernes résultent de la convergence de plusieurs disciplines scientifiques, combinant les sciences de l'information, la géographie, la cartographie numérique, l'informatique et la télédétection (HADDOUCHE, 1998).

### **II.3 - Le concept du système d'information géographique (SIG)**

À l'origine, le Système d'Information Géographique (SIG) a été conçu comme un outil de stockage et de restitution cartographique des données spatiales.

Progressivement, l'évolution des besoins en analyse et gestion de l'information géographique a conduit à l'intégration de ces données dans des systèmes d'information globaux, donnant ainsi toute sa dimension au concept moderne du SIG.

Il convient toutefois de dissiper une confusion fréquente : un logiciel SIG ne se limite pas à un simple outil de cartographie assistée par ordinateur.

Il s'agit d'un ensemble intégré d'outils informatiques permettant la collecte, la structuration, la gestion et l'analyse de données localisées dans l'espace (GAMBLIN, 1995).

Un SIG combine des composantes matérielles et logicielles qui autorisent :

- Le recueil et la saisie des données géographiques,
- Leur codification et leur correction,
- La manipulation, l'analyse spatiale et la représentation graphique des entités du territoire sous forme de points, lignes, polygones ou pixels associés à des valeurs attributaires.

La gestion des données constitue l'un des piliers du système, car la base de données spatiales doit impérativement rester à jour pour garantir la fiabilité des analyses et des représentations.

Cette fonction est assurée par un Système de Gestion de Base de Données (SGBD), chargé de plusieurs opérations essentielles :

- Les tâches de gestion courante, telles que la saisie, la correction, la suppression, l'extraction et la mise en relation des données ;
- Les opérations topologiques, permettant la recherche par localisation, inclusion ou proximité spatiale ;
- Ainsi que la gestion des droits d'accès, garantissant la sécurité et la cohérence des informations.

#### **II.4 - Fonctionnement d'un SIG**

Un Système d'Information Géographique (SIG) ne se réduit pas à un simple modèle de données.

Il intègre en réalité divers types de structures et de traitements d'information spatiale, organisés de manière cohérente au sein d'un ensemble fonctionnel intégré.

De façon générale, un SIG est structuré autour de quatre modules principaux qui assurent la continuité du flux d'information :

- A. Acquisition
- B. Gestion des données
- C. Analyse
- D. Restitution.

Ces modules interagissent entre eux pour permettre le passage progressif de la donnée brute à l'information géographique analysée, puis à sa représentation cartographique et thématique.

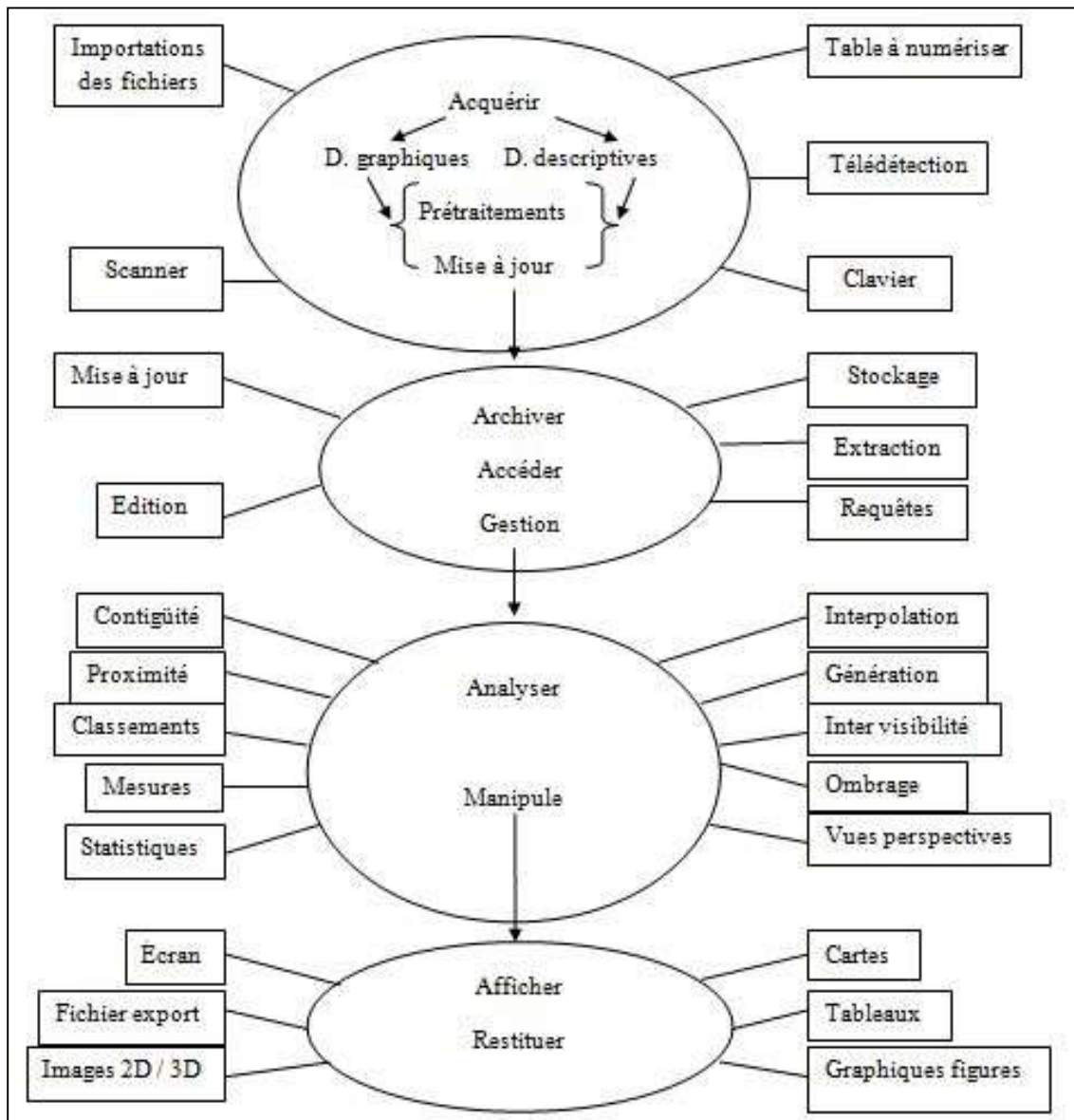


Figure n° 7 : Les principales fonctionnalités d'un système d'information géographique (EASTMAN, 1993)

Un SIG (Système d'Information Géographique) est capable de traiter simultanément deux types d'informations complémentaires :

- Les informations géographiques, correspondant aux entités spatiales (par exemple les contours des unités de sols, les limites administratives, les réseaux hydrographiques, etc.) ;
- Et les informations sémantiques ou descriptives, associées à ces entités (telles que la classe de sol, l'occupation du sol ou la catégorie de pente).

La saisie de l'information graphique (Figure n° 7) est assurée par des périphériques spécialisés, tels que les tablettes de numérisation (digitaliseurs) ou les scanners permettant une acquisition manuelle ou semi-automatique des données cartographiques.

Les données sémantiques sont intégrées grâce à une connexion avec un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD), lequel est lui-même connecté à un logiciel SIG assurant la gestion, la mise à jour et l'exploitation de ces informations.

#### ***II.4.1 - Acquisition de la base de données***

Véritable noyau du Système d'Information Géographique, la Base de Données Géographiques (BDG) se compose d'un ensemble numérique de cartes et d'informations associées.

Cette base représente les objets situés à la surface terrestre à travers deux composantes complémentaires :

- Une base spatiale, décrivant la localisation et la forme géométrique des objets ;
- Et une base thématique, définissant leurs caractéristiques descriptives ou attributaires.

Ainsi, un puits, par exemple, sera représenté spatialement par un point géoréférencé, auquel sont associés des attributs thématiques tels que la profondeur, le débit ou le niveau statique (EASTMAN, 1993).

La collecte des données pouvant alimenter cette base s'effectue à partir de plusieurs sources :

##### **1) A partir des documents existants**

Les données cartographiques peuvent être converties du format papier au format numérique par numérisation sur tablette ou par scannage direct.

Cette opération permet de transformer les objets dessinés sur un plan en entités vectorielles.

Cependant, cette méthode peut introduire des erreurs de retranscription, liées notamment aux déformations du support papier ou à l'épaisseur du trait.

Lorsque les documents sont scannés et géoréférencés, ils constituent des données raster.

##### **2) A partir de photos**

Les photographies aériennes ortho-rectifiées représentent une source majeure pour la numérisation précise de vastes territoires.

La donnée topographique produite par l'I.G.N. pour l'ensemble du territoire national repose d'ailleurs sur la photogrammétrie.

La précision des informations obtenues dépend directement de celle des clichés utilisés.

Ce type d'acquisition nécessite souvent des vérifications de terrain ou des recoupements avec d'autres sources afin d'assurer la fiabilité thématique des données, les photos n'étant qu'une collection de pixels sans signification directe (ZAOUI, 2013).

### **3) A partir d'image satellite**

Les images issues de la TÉLÉDÉTECTION spatiale constituent une source essentielle d'information pour l'analyse de l'occupation du sol.

Elles permettent d'obtenir une vision synoptique et multi-temporelle du territoire, facilitant le suivi des dynamiques environnementales à différentes échelles.

### **4) A partir de donnée alphanumérique**

Les données textuelles ou statistiques peuvent être intégrées ou géocodées afin d'enrichir la base de données spatiales.

Elles contribuent à relier les informations descriptives aux objets géographiques, améliorant ainsi la dimension analytique du SIG.

### **5) A partir du terrain**

Les données de terrain complètent les autres sources, notamment pour les projets localisés ou les zones à faible couverture cartographique.

Elles sont recueillies à l'aide de divers instruments de mesure :

- GPS (Global Positioning System), système de positionnement global par satellite ;
- Planchette topographique, utilisée pour les levés manuels ;
- Théodolite ou télémètre, destinés aux mesures angulaires et de distance.

#### ***II.4.2 - Système de gestion de la BDG***

Le Système de Gestion de Base de Données (SGBD) représente le deuxième élément fonctionnel essentiel d'un Système d'Information Géographique (SIG).

En réalité, un SIG intègre non seulement un SGBD classique, mais également un ensemble d'outils spécialisés capables de gérer simultanément les dimensions thématiques et spatiales de l'information.

Le recours au SGBD permet d'insérer des informations thématiques sous forme de tableaux de données ou de statistiques, puis d'en extraire des éléments particuliers en fonction des exigences analytiques.

Plus encore, le SGBD offre la possibilité de procéder à une analyse approfondie du contenu thématique de la base (DIDON, 1990).

Cependant, il convient de noter que de nombreuses analyses de données spatiales ne possèdent pas nécessairement une composante géographique explicite.

Dans ce cas, un SGBD conventionnel suffit à la gestion et au traitement des données.

À titre d'exemple, si l'on interroge le système afin d'identifier toutes les zones contenant des espèces indicatrices de la dégradation des sols, le résultat final pourra être représenté sous forme cartographique.

Bien que la carte obtenue soit de nature spatiale, l'analyse effectuée ne comporte pas, en elle-même, de dimension spatiale directe.

Ainsi, le lien entre le SGBD et la composante thématique de la BDG reflète l'interaction continue entre l'information descriptive et sa représentation géographique, illustrant le caractère spatial intégré du système d'analyse.

#### *II.4.3 - Système d'analyse spatiale*

Les systèmes précédemment évoqués permettent de numériser l'information spatiale, d'y associer un contenu thématique, de procéder à son analyse en fonction de ses attributs descriptifs, et d'en produire une représentation cartographique.

Toutefois, bien que ces fonctions répondent à des besoins essentiels, elles demeurent insuffisantes pour constituer à elles seules un Système d'Information Géographique (SIG) complet.

La véritable spécificité du SIG réside dans sa capacité d'analyse fondée sur les relations spatiales entre les données.

L'analyse spatiale représente une extension des fonctionnalités classiques d'un système de gestion de base de données, en intégrant la dimension géographique des observations.

Elle permet, par exemple, d'établir des requêtes combinées prenant en compte simultanément deux caractéristiques propres à des ensembles d'objets spatiaux distincts, tels que la topographie et le type de sol.

Au-delà du rôle du SGBD, le module d'analyse spatiale entretient une interaction bidimensionnelle avec la Base de Données Géographiques (BDG), assurant ainsi un traitement analytique complexe.

Ce mécanisme permet de croiser et dériver des informations nouvelles à partir de données existantes.

Par exemple, en identifiant les zones caractérisées par une faible pente, des sols squelettiques et une forte fragilité, il devient possible de définir des secteurs moyennement désertifiés et hautement sensibles à la dégradation.

Ces informations ne figurent pas initialement dans la base de données, mais sont produites par corrélation et analyse spatiale selon un ensemble de règles relationnelles précises (HADDOUCHE, 1998).

La superposition de couches thématiques constitue l'un des principes fondamentaux du SIG, et c'est à travers cette approche que l'analyse spatiale assistée par ordinateur a connu, au cours des dernières décennies, un développement considérable, permettant désormais des opérations de traitement plus complexes et plus riches (IDRISSA, 2004).

#### **II.4.4 - Système de restitution cartographique**

La restitution cartographique constitue l'étape finale du processus de traitement dans un Système d'Information Géographique (SIG).

Elle correspond à l'opération de représentation et de mise en forme des résultats issus des analyses ou des extensions de données, sous un format interprétable par l'utilisateur ou exploitable par d'autres systèmes informatiques.

Autour de la Base de Données Géographiques (BDG) s'articule un ensemble de modules fonctionnels, dont le plus fondamental est celui de la représentation cartographique.

Ce dernier permet de sélectionner, organiser et visualiser des éléments extraits de la base de données, que ce soit à l'écran, sur imprimante ou sur tout autre support numérique.

Dans la majorité des logiciels SIG, les outils internes de restitution restent relativement simples et limités en termes de mise en page et de qualité graphique.

Pour la production finale de documents cartographiques de haute qualité, notamment sur film ou support papier, il est souvent nécessaire de recourir à des logiciels spécialisés de cartographie assistée ou de conception graphique (HADDOUCHE, 1998).

## **II.5 - Mode de représentation des données géographiques**

Dans un Système d'Information Géographique (SIG), tout objet spatial est défini par trois catégories fondamentales de propriétés :

- Sa localisation à la surface terrestre ;
- Les relations spatiales qu'il entretient avec les autres objets du territoire ;
- Et ses attributs thématiques, c'est-à-dire les informations descriptives non graphiques qui lui sont associées.

Indépendamment de la structure de données choisie dans le SIG, elle doit permettre de représenter simultanément ces trois dimensions de façon cohérente.

Il est donc nécessaire de dissocier le codage graphique (forme, position) du codage thématique (caractéristiques descriptives), puisque l'un peut évoluer sans affecter l'autre.

Par exemple, une limite administrative ou écologique peut être redessinée sans que les attributs des unités qu'elle sépare soient modifiés, et inversement, les attributs d'un objet peuvent changer sans que sa géométrie ne soit altérée.

Les sources de données spatiales exploitées dans un SIG proviennent généralement de deux grands types :

- Les images numériques, ou données en mode raster, issues notamment de la télédétection ;
- Et les structures vectorielles cartographiques, représentant les entités sous forme de points, lignes ou polygones.

De cette distinction naissent deux approches complémentaires : les SIG raster et les SIG vectoriels.

La coexistence de ces deux modes de représentation dans un même système exige une bonne maîtrise de leurs caractéristiques respectives ainsi que de leurs avantages et limites d'utilisation.

En pratique, tout SIG gère donc simultanément deux composantes essentielles : la géométrie des objets spatiaux et leur contenu thématique.

Selon les objectifs du projet ou la nature des données, la gestion peut s'appuyer sur l'approche en mode objet (structure vectorielle) ou sur l'approche en mode image (structure raster ou matricielle), chacune offrant des performances spécifiques dans l'analyse spatiale et la représentation cartographique.

### **II.5.1 - Mode de représentation raster**

En mode raster (ou à mailles), les entités géographiques ne constituent pas de véritables objets spatiaux distincts, mais représentent des unités d'observation uniformes, issues du découpage systématique de la zone d'étude en un réseau de cellules rectangulaires.

Ce modèle repose sur une structure matricielle bidimensionnelle, où chaque cellule appelée pixel constitue l'unité élémentaire de l'information spatiale.

La taille du pixel, également appelée pas de la maille, détermine le niveau de résolution spatiale du jeu de données. Par exemple, les images issues du capteur SPOT HRV présentent une résolution de 20 × 20 mètres, tandis que celles du capteur LANDSAT TM offrent une résolution de 30 × 30 mètres.

Dans ce type de structure, l'espace géographique est discrétisé en lignes et en colonnes, et à chaque position (ligne/colonne) est associée une ou plusieurs valeurs numériques représentant les caractéristiques physiques ou thématiques du territoire observé (altitude, occupation du sol, réflectance, humidité, etc.).

Ainsi, le mode raster permet une représentation continue et homogène des phénomènes spatiaux, particulièrement adaptée à l'analyse de variables environnementales observées par télédétection ou mesurées sur de vastes surfaces.

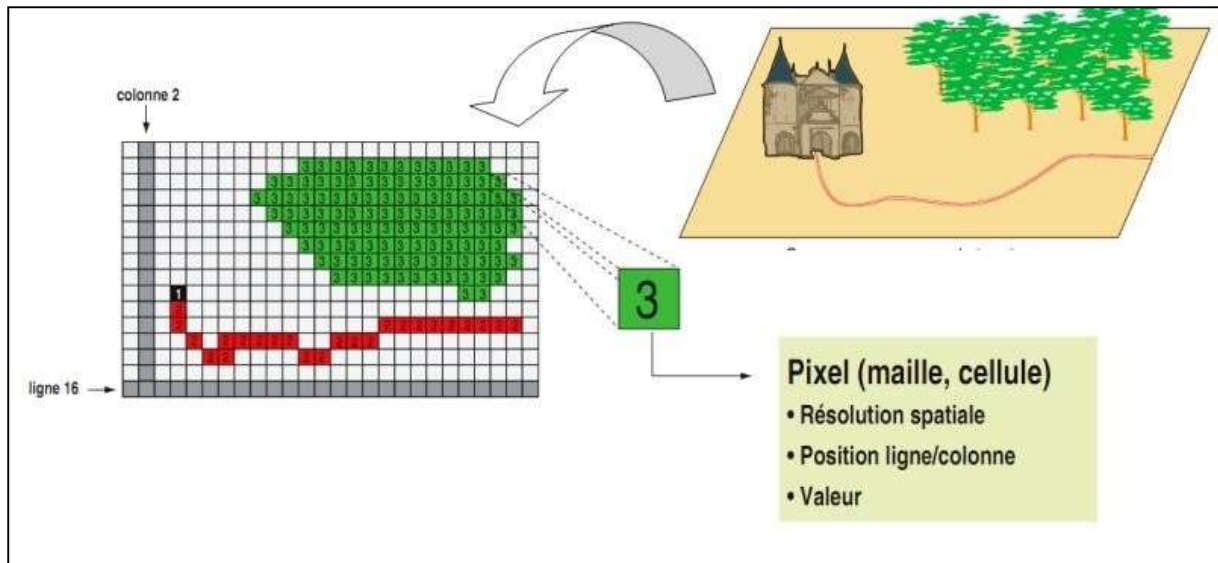


Figure n° 8 : Le modèle de données en mode raster

### ⇒ Le Model Numérique du Terrain d'altitude (MNT)

Il représente une application typique du mode raster.

Dans ce modèle, à chaque couple de coordonnées (X, Y) est associée une valeur d'altitude (Z), permettant de reconstituer une surface continue du relief sous forme d'un maillage régulier.

Cette structure tridimensionnelle constitue une véritable ossature topographique sur laquelle il est possible de superposer ou draper différentes sources d'images, telles que les photographies aériennes ou les images satellites, afin de visualiser plus fidèlement les éléments du sursol (bâtiments, arbres, infrastructures, etc.).

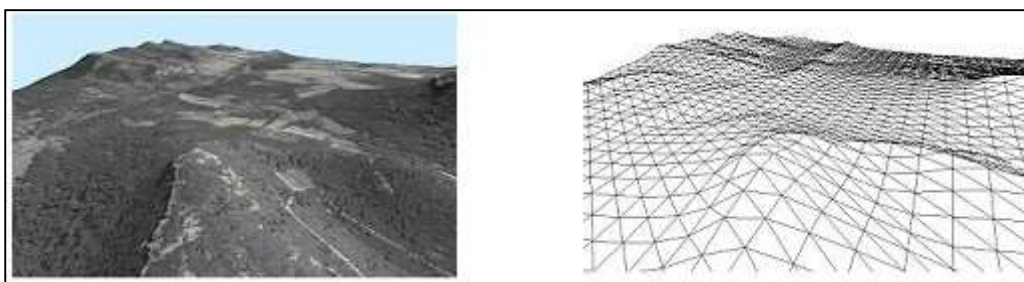


Figure n° 9: Représentation Model Numérique de Terrain (MNT)

Les MNT servent également de base à la génération de produits dérivés indispensables à l'analyse géomorphologique, tels que :

- Les courbes de niveau ;
- Les cartes de classes d'altitude ;
- Et les cartes de pente ou d'exposition.

Ces produits facilitent l'étude du relief, la modélisation hydrologique, ainsi que la planification de l'aménagement du territoire à différentes échelles d'analyse.

### II.5.2 - Mode de représentation vecteur

Le mode de représentation vectoriel vise à modéliser les objets géographiques de la manière la plus fidèle et précise possible.

Dans ce modèle, chaque entité spatiale est définie par sa géométrie (forme et position) et par ses attributs thématiques associés.

Les objets sont généralement représentés par trois types de primitives géométriques : le point, la ligne et la surface.

- **Le point** : Il s'agit de l'élément géométrique le plus simple.

À grande échelle, il peut symboliser des éléments ponctuels précis tels que des arbres isolés, bornes d'incendie, points d'eau ou poubelles collectives.

À plus petite échelle, comme sur une carte routière au 1:1 000 000, un point peut représenter une ville importante ou une capitale régionale.

- **La ligne** : Elle sert à représenter les objets linéaires ou allongés, tels que les réseaux routiers, hydrographiques, d'énergie ou d'assainissement.

Dans certains cas, la ligne peut être purement figurative, par exemple pour représenter l'axe d'une route, ou bien virtuelle lorsqu'elle illustre des flux d'information ou des connexions entre entités.

- **La surface** : En ce qui concerne la surface, elle peut représenter une entité abstraite, comme la superficie d'une commune, ou désigner des entités géographiques concrètes telles qu'une forêt, un lac, un barrage ou une zone bâtie.

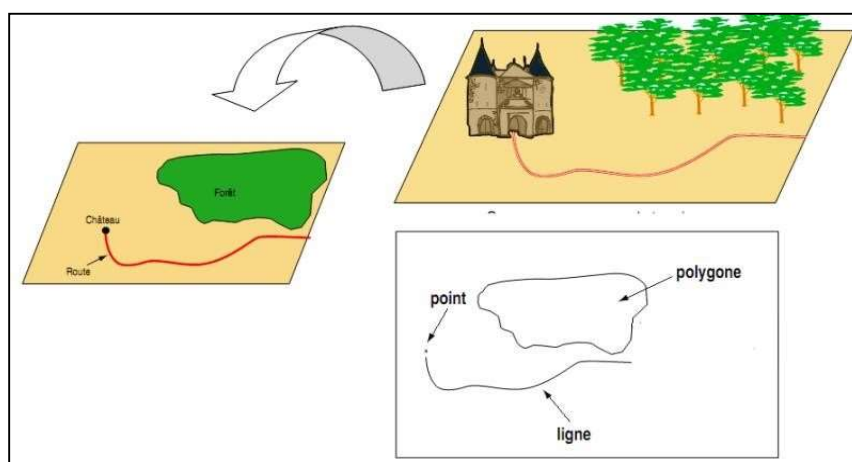


Figure 10 : Représentation géographique selon le modèle vectoriel

Le mode vectoriel se distingue ainsi par sa grande précision géométrique et sa capacité à décrire les relations topologiques entre les objets (contiguïté, inclusion, voisinage).

Il est donc particulièrement adapté aux applications nécessitant une représentation détaillée et rigoureuse de l'espace, telles que la cartographie urbaine, la gestion des réseaux, ou encore les analyses de planification territoriale.

En géomatique, les deux principaux modes de représentation des données spatiales, à savoir le mode vecteur et le mode raster, se différencient par leurs principes de modélisation, leurs méthodes de traitement et leurs champs d'application.

Chacun présente des avantages et des limites propres à sa manière de stocker, gérer et analyser l'information géographique.

Ainsi, le choix entre ces deux approches dépend généralement de la nature des phénomènes étudiés, du niveau de précision recherché et des objectifs de l'analyse spatiale.

Une comparaison synthétique de leurs caractéristiques respectives est présentée dans le tableau n°5 ci-dessous.

Tableau n° 5 : Points forts et limites des représentations vectorielle et raster

Mode	vecteur	Raster
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Offre une grande précision géométrique dans la représentation des entités spatiales.</li> <li>· Assure un stockage plus compact et efficace des données.</li> <li>· Permet une description complète de la topologie à travers les relations spatiales entre objets (voisinage, inclusion, contiguïté).</li> <li>· Produit une représentation graphique fine et détaillée adaptée aux cartes thématiques.</li> <li>· Facilite les opérations de mise à jour, d'extraction et de généralisation des données géographiques et de leurs attributs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Présente une structure de données simple et facile à manipuler.</li> <li>· Permet la superposition et la combinaison rapide de plusieurs couches d'informations spatiales.</li> <li>· Facilite les opérations de croisement thématique grâce à une organisation homogène des cellules.</li> <li>· Repose sur une technologie accessible et en constante évolution, notamment dans le domaine de la télédétection.</li> <li>· Mieux adapté à la représentation de phénomènes continus ou à variation graduelle (température, humidité, altitude, concentration, etc.).</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Les opérations de croisement thématique et d'analyse spatiale sont plus complexes et plus longues à exécuter.</li> <li>· Présente une structure de données plus complexe à gérer et à manipuler.</li> <li>· La superposition et la combinaison des couches sont plus difficiles, car chaque entité possède une géométrie distincte.</li> <li>· Nécessite souvent des outils technologiques coûteux en raison de la haute précision graphique exigée.</li> <li>· Les calculs spatiaux peuvent être plus exigeants en temps de traitement pour les grandes bases de données.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· La précision spatiale dépend directement de la taille des cellules (résolution) : plus les mailles sont grandes, plus le détail est faible.</li> <li>· La dimension de la maille doit être choisie en fonction de la nature du phénomène étudié, ce qui peut limiter la finesse d'analyse.</li> <li>· Génère un volume de stockage important, surtout pour les zones étendues ou les résolutions fines.</li> <li>· La topologie spatiale (relations entre entités) est difficile à implémenter dans ce mode.</li> <li>· Produit souvent un rendu graphique moins précis et moins esthétique que le mode vectoriel.</li> </ul>

Aucune des deux structures de représentation raster ou vecteur ne peut être considérée comme universellement adaptée à l'ensemble des applications.

Le choix du mode dépend avant tout de la nature des phénomènes étudiés, du type d'analyse envisagée et des traitements que les données devront subir.

L'examen comparatif des deux approches montre clairement que les faiblesses du mode raster constituent souvent les points forts du mode vectoriel, et inversement.

En pratique, la plupart des systèmes modernes intègrent ces deux modèles, tirant parti de leurs complémentarités.

De plus, l'existence d'algorithmes de conversion permettant de passer aisément du vecteur au raster (et réciproquement) rend cette distinction beaucoup moins contraignante.

Ainsi, la combinaison des deux modes dans un même SIG offre aujourd'hui la souplesse nécessaire pour répondre à la diversité des besoins en analyse, modélisation et cartographie spatiale.

#### **Conversion des données : (Figure n° 11)**

- **Rastérisation**

La rastérisation correspond à la conversion des données vectorielles en données raster.

Cette opération est généralement simple à réaliser, car elle repose sur des algorithmes de transformation directs qui transposent les objets géométriques (points, lignes, polygones) dans une grille régulière de pixels.

Cependant, cette conversion peut entraîner une altération des contours des entités notamment des polygones ce qui se traduit parfois par une perte partielle d'information géométrique ou une diminution de la précision spatiale.

- **Vectorisation**

La vectorisation désigne l'opération inverse, consistant à transformer une image raster en données vectorielles.

Ce processus est plus complexe et plus exigeant en temps de calcul, car il nécessite la détection et la reconstruction des contours des objets représentés dans la grille matricielle.

Les algorithmes de vectorisation produisent souvent des contours crénelés ou irréguliers, reflet de la résolution initiale de l'image raster.

Malgré ces limites, la vectorisation reste une étape essentielle pour intégrer des données issues de la télédétection dans des bases géographiques vectorielles utilisées en aménagement du territoire, en cartographie ou en analyse environnementale.

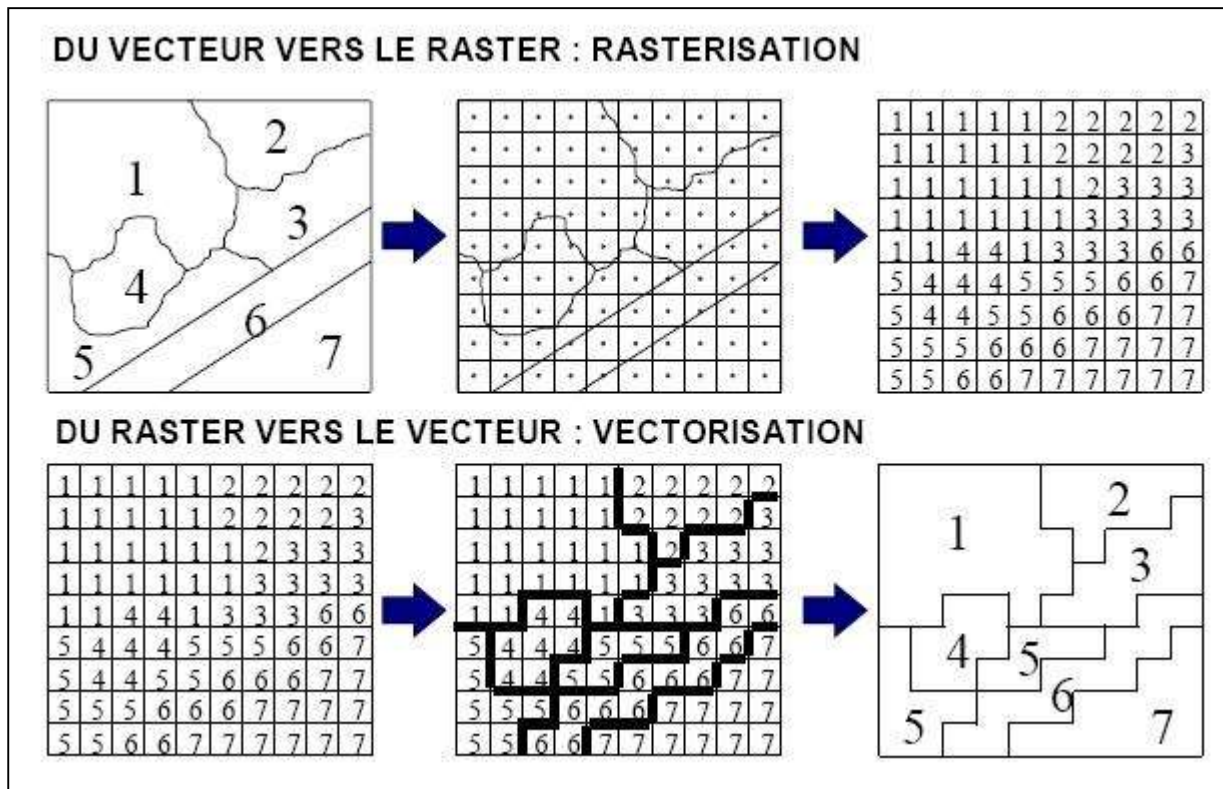


Figure n° 11 : Méthodes de transformation des données spatiales : de vecteur à raster et inversement

L'utilisateur d'un SIG doit sélectionner, en fonction des données disponibles et de ses objectifs, les méthodes les plus adaptées. Certaines analyses peuvent tirer parti des deux types de données, vecteur et raster, par exemple :

- Superposition d'une couche vectorielle sur un modèle numérique de terrain afin de produire un drapage 3D.
- Actualisation d'une carte vectorielle à partir de l'intégration d'images raster.
- Appui à la classification des images satellitaires en s'appuyant sur une couche vectorielle de référence.

La nature complémentaire des données vectorielles et raster permet d'élargir considérablement le champ d'investigation, offrant à l'utilisateur un éventail plus vaste de traitements et d'analyses possibles.

## **II.6 - Les Avantages et les inconvénients d'un SIG**

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) offrent à l'utilisateur de multiples avantages, en particulier comme outils d'aide à la décision pour l'aménagement du territoire, la gestion des ressources naturelles et la planification environnementale. Leur capacité à intégrer, analyser et visualiser de vastes ensembles de données spatiales et thématiques en fait aujourd'hui des instruments incontournables pour comprendre et gérer efficacement les territoires.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les SIG présentent également certaines limites techniques et méthodologiques, qu'il convient de souligner.

La liste ci-dessous, issue d'une synthèse de plusieurs travaux (I.N.R.A., 1991), met en évidence les principaux avantages et inconvénients liés à leur utilisation.

### ***II.6.1 - Les avantages***

- ✓ Les SIG offrent de nombreux atouts qui expliquent leur large adoption dans les domaines de la gestion territoriale, de l'environnement et de la planification :
- ✓ Le SIG intègre à la fois une base de données et une base de connaissances, permettant une meilleure structuration et interprétation de l'information spatiale.
- ✓ L'accès aux informations est simplifié et partagé entre les différents utilisateurs, favorisant la diffusion et la collaboration.
- ✓ Les capacités de description des organisations spatiales sont considérablement élargies, permettant une représentation fine et multi-échelle des phénomènes.
- ✓ Les modèles spatiaux peuvent évoluer avec les progrès des connaissances et les mises à jour régulières des données, assurant une information actualisée.
- ✓ Les sorties cartographiques demeurent un support privilégié pour la communication des résultats : la carte reste l'outil le plus expressif pour illustrer un phénomène spatial.
- ✓ La liberté graphique offerte lors de la conception d'un Modèle d'Organisation Spatiale (MOS) facilite les changements d'échelle et l'adaptation des représentations cartographiques.
- ✓ Les cartes thématiques peuvent être produites rapidement, selon les besoins de l'analyse finale.
- ✓ À partir des mêmes données ponctuelles, il est possible de générer plusieurs cartes en modifiant simplement les paramètres ou les classes thématiques.

- ✓ Le SIG permet de croiser un grand nombre de données hétérogènes, par exemple des informations pédologiques avec des données géomorphologiques, climatiques ou socio-économiques.
- ✓ Enfin, les SIG offrent la possibilité de réaliser des simulations à l'aide de modèles dynamiques, produisant des scénarios prospectifs et des représentations évolutives du territoire.

### ***II.6.2 - Les inconvénients***

- ✗ Malgré leurs nombreux atouts, les SIG présentent certaines limites et contraintes d'utilisation :
- ✗ Les systèmes sont souvent complexes à gérer et nécessitent une expertise technique importante. La saisie des données est parfois fastidieuse, notamment lors de la numérisation de données anciennes.
- ✗ L'accès à l'information peut être difficile pour les utilisateurs non formés, limitant ainsi l'autonomie opérationnelle.
- ✗ Le caractère quantitatif et modélisé des informations peut donner une illusion de précision absolue, conduisant à des interprétations erronées ou à un usage abusif des résultats.
- ✗ Il est indispensable de prévoir des codifications adaptées aux données incomplètes ou imprécises, afin d'éviter les biais d'analyse.
- ✗ Les données intégrées dans un SIG sont souvent hétérogènes, tant sur le plan sémantique que géométrique ; leur cohérence dépend donc de la rigueur de sélection et de traitement.

Ainsi, le choix des données doit être guidé par l'objectif de l'étude et fondé sur la pertinence des variables à intégrer, en tenant compte des points suivant :

L'échelle de représentation --Thème cartographique abordé -- La date de collecte ou de création des données -- Système de projection utilisé

### III. SIG et télédétection

Les SIG et la télédétection sont deux technologies qui, bien qu'ayant évolué séparément à leurs débuts, sont aujourd'hui étroitement liées et utilisées de manière complémentaire. Leur intégration permet une analyse spatiale plus complète et une meilleure exploitation des données environnementales.

#### 1). Rapport SIG-télédétection

Les interactions entre les SIG et la télédétection sont étroites et s'avèrent mutuellement avantageuses.

La télédétection constitue avant tout une source majeure de données géographiques, fournissant des informations actualisées et homogènes sur de vastes territoires.

Elle joue ainsi un rôle essentiel dans :

- La mise à jour des bases de données géographiques,
- La réalisation d'inventaires spatiaux,
- L'uniformisation des informations environnementales existantes.

Les SIG, quant à eux, offrent un cadre d'analyse et de gestion pour intégrer, stocker et exploiter ces données issues de la télédétection.

Ainsi, la télédétection peut être considérée comme une porte d'entrée privilégiée pour l'alimentation des systèmes SIG.

#### 2). Intégration SIG-STI

L'intégration entre SIG et Systèmes de Traitement d'Images (STI) peut se présenter selon trois schémas organisationnels principaux :

Systèmes séparés : les deux entités fonctionnent indépendamment et communiquent uniquement par échange de données via des formats de transfert standards.

Interface commune : une passerelle logicielle permet la communication directe et le partage d'informations entre les deux systèmes.

Intégration complète : la fusion des fonctions SIG et STI au sein d'un même environnement logiciel. Cette intégration, encore en développement, permet de traiter simultanément données vectorielles (cartographiques) et images raster (télédétection).

L'intérêt principal de cette intégration réside dans la possibilité d'interaction dynamique entre les deux types de données.

Par exemple :

- Un fichier vectoriel (base SIG) peut être mis à jour à partir de l'interprétation d'une image satellitaire ;
- L'inverse, des données topographiques ou thématiques provenant du SIG peuvent aider à l'interprétation et à la segmentation des images de télédétection.

Ainsi, les données issues des SIG qu'elles proviennent de cartes existantes ou de mesures de terrain constituent une aide précieuse pour l'analyse et la validation des résultats de télédétection.

La synergie entre les deux systèmes favorise une utilisation plus cohérente, plus régulière et plus rationnelle de l'information spatiale.

À terme, cette intégration SIG-télédétection représente un axe de développement majeur, car l'amélioration des bases de données géographiques issues des SIG stimule l'exploitation de la télédétection, laquelle, en retour, enrichit et renforce les capacités analytiques des SIG.

### 3). Apport de la télédétection

La télédétection satellitaire apporte une contribution considérable à la mise à jour et à la création de cartes intégrées aux bases de données géographiques.

Grâce à ses caractéristiques techniques large couverture spatiale, stéréoscopie, haute résolution au sol, précision géométrique et périodicité des observations elle permet un suivi continu et fiable des phénomènes environnementaux.

La télédétection fournit notamment des informations essentielles sur :

- L'occupation et l'utilisation du sol ;
- La prévision de la nature et du rendement des cultures agricoles ;
- La détection et la surveillance des phénomènes périodiques ou exceptionnels, tels que la pollution, les glissements de terrain, les crues, les incendies ou encore les inondations.

En combinant la puissance analytique des SIG avec la richesse d'observation de la télédétection, il devient possible de disposer d'un outil intégré d'analyse spatiale, capable d'appuyer efficacement la gestion des ressources naturelles, la planification environnementale et la prise de décision territoriale.

## Chapitre 3 : Les Outils d'analyse (Machine Learning)

### 1- Introduction

Le Machine Learning (apprentissage automatique) est une discipline de l'intelligence artificielle qui permet aux systèmes informatiques d'extraire des connaissances à partir des données, sans instruction programmée préalable. Grâce à sa capacité à découvrir des patterns complexes dans des ensembles de données volumineux, le MACHINE LEARNING est aujourd'hui un outil incontournable dans divers domaines, notamment la gestion de l'eau, la modélisation environnementale, la détection de pollution, la prévision climatique et la classification de l'occupation des sols

### 2- Historique et définition

L'apprentissage automatique remonte aux années 1950, avec les premiers travaux d'Alan Turing et la formalisation du test de Turing. Dans les années 1980, l'essor des ordinateurs a permis de développer des algorithmes plus sophistiqués comme les réseaux de neurones. Depuis les années 2000, grâce à l'explosion des données (big data) et à l'augmentation de la puissance de calcul, le MACHINE LEARNING connaît un développement exponentiel.

**Définition :** Le Machine Learning constitue un domaine de recherche consacré à la conception d'algorithmes capables d'extraire des connaissances à partir de données, afin de réaliser des prédictions ou de prendre des décisions. Différentes approches d'apprentissage existent, notamment supervisé, non supervisé et par renforcement (RUSSELL & NORVIG, 2010).

### 3- Utilisation en environnement et gestion de l'eau

Dans le domaine de la gestion de l'eau, le MACHINE LEARNING permet de :

Modéliser la qualité de l'eau en prédisant les concentrations de polluants (ZOUNEMAT et al., 2020),

Détecter les anomalies dans les capteurs de réseaux d'eau (WU et al., 2017),

Classer les zones hydro-agricoles selon leur potentiel de développement (SHAHABI et al., 2021),

Optimiser la consommation d'eau dans l'agriculture de précision (WANG et al., 2022).

Détecter et classer les zones à haut potentielles pour cibler l'investissement agricole (ENNEBATI,2025).

Ces approches permettent des décisions plus précises, rapides et durables en matière de gestion des ressources hydriques.

#### 4- Points forts et limites

Avantages :

- Capacité à traiter de grandes quantités de données,
- Apprentissage adaptatif : amélioration continue avec plus de données,
- Prédiction plus rapides et plus précises que les méthodes classiques.

Limites :

- Sensibilité à la qualité des données (données manquantes ou bruitées),
- Problème d'interprétabilité des modèles complexes (ex. : DEEP LEARNING),
- Risques de biais si les données d'apprentissage sont déséquilibrées.

#### 5- Problèmes typiques du MACHINE LEARNING et solutions

Selon Kubat et al. (1998), deux défis majeurs sont la présence de jeux de données déséquilibrés et les ensembles batchés. Pour remédier à cela, des algorithmes comme SHRINK et la sélection unilatérale (one-sided selection) ont été proposés pour améliorer la détection des événements rares, notamment les marées noires.

#### 6- Exemple de méthode : le Support Vector Clustering (SVC)

Ben-Hur et al. (2001) ont proposé une méthode de clustering basée sur les machines à vecteurs de support. Leur algorithme, appelé SVC (Support Vector Clustering), permet de former des clusters de forme arbitraire, en projetant les données dans un espace de grande dimension via un noyau gaussien. Deux paramètres clés sont utilisés : le paramètre  $p$  pour contrôler les outliers, et  $q$  pour régler la finesse de séparation des clusters.

Ce type de méthode est particulièrement utile en environnement pour segmenter des zones d'intérêt hydrologique ou identifier des zones à risque sans préjuger de la forme ou du nombre de classes.

#### 7- Application à la gestion durable

Dans le cadre des Objectifs de Développement Durable (ODD) définis par l'ONU, notamment l'ODD 6 (eau propre et assainissement) et l'ODD 13 (lutte contre le changement climatique),

et comme le montre l'article scientifique publiée en 2025 (ENNEBATI,2025), le MACHINE LEARNING représente un outil puissant pour :

- Prévoir les périodes de sécheresse et d'inondation,
- Réduire les pertes en eau potable par détection précoce de fuites,
- Renforcer les capacités de suivi environnemental via l'analyse automatique d'images satellites ou de données de capteurs.

Le Machine Learning s'impose comme une approche incontournable pour relever les défis de la gestion environnementale et de l'eau. Malgré ses limites, son intégration dans les politiques et les outils de planification représente une opportunité majeure pour une transition vers une gestion plus résiliente, efficiente et durable des ressources naturelles, pour cela et mettre la lumière pour notre étude le k-means reste une voie incontournable.

## 8- L'algorithme K-means : Principe, mise en œuvre et applications environnementales

### 1- Introduction à K-means

L'algorithme K-means est l'un des algorithmes de classification non supervisée les plus utilisés pour le regroupement (clustering) de données. Son objectif est de partitionner un ensemble de données en K groupes (ou clusters) homogènes, en minimisant la distance intra-cluster. Il est largement utilisé dans les sciences de l'environnement pour segmenter les zones géographiques, classer les types d'utilisation des sols, ou identifier les zones de potentiel agricole ou hydrologique (ENNEBATI, 2025).

### 2- Origine et développement

Proposé à l'origine par MACQUEEN (1967), l'algorithme a été largement popularisé grâce à sa simplicité, sa rapidité d'exécution et son efficacité dans des contextes variés. Depuis, de nombreuses variantes ont été développées pour améliorer sa robustesse et sa précision (Lloyd, 1982).

### 3- Principe de fonctionnement

L'algorithme suit une procédure itérative en quatre étapes :

1. **Initialisation** : Choix aléatoire de K centroïdes.
2. **Affectation** : Chaque point de données est affecté au cluster dont le centroïde est le plus proche.
3. **Mise à jour** : Recalcul des centroïdes en prenant la moyenne des points de chaque cluster.
4. **Répétition** : Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à convergence (stabilité des centroïdes ou nombre maximal d'itérations atteint).

#### 1.1.1 - 4. Formulation mathématique

Soit un ensemble de données :

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \text{ avec } x_i \in \mathbb{R}^d, 1$$

l'objectif est de minimiser la fonction de coût suivante :

$$J = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2$$

$K$  : nombre de clusters

$C_i$  : ensemble de points appartenant au cluster  $i$

$\mu_i$  : centroïde du cluster  $i$

$\|x - \mu_i\|$  : distance euclidienne entre un point et le centroïde

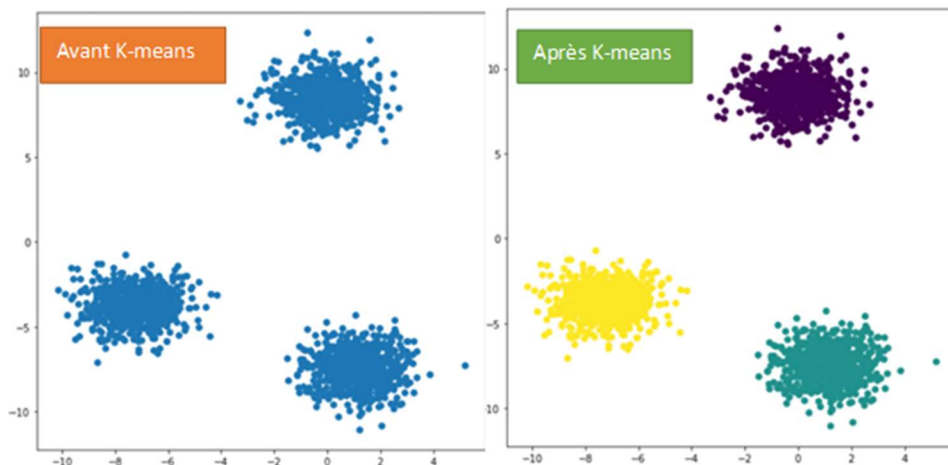


Figure n° 12 : Classification des données par K-means

#### 4- Applications environnementales

K-means est largement utilisé dans les domaines de l'environnement et de la gestion de l'eau.

Quelques exemples d'application :

- Délimitation des zones agro-écologiques : segmentation des sols en fonction de critères climatiques, topographiques et pédologiques (SHAHABI et al., 2021).
- Classification des zones humides à partir d'imagerie satellitaire (Belgiu & Drăguț, 2016).
- Évaluation du potentiel hydro-agricole par regroupement des données hydrologiques, pluviométriques et pédologiques (MAHDAVI et al., 2019).
- Gestion des ressources en eau : identification de zones critiques de consommation ou de stress hydrique.

#### 5- Avantages

- Simplicité de mise en œuvre et rapidité de calcul,
- Applicable à de grands ensembles de données,
- Interprétation facile des clusters.

#### 6- Limites de l'algorithme

- Choix arbitraire de K : le nombre de clusters doit être fixé à l'avance.
- Sensibilité à l'initialisation : les résultats peuvent varier selon le choix initial des centroïdes.
- Clusters sphériques uniquement : K-means suppose que les clusters sont convexes et de taille similaire.
- Sensibilité aux valeurs aberrantes : la présence d'outliers peut fausser les résultats.

Des améliorations comme **K-means++**, **Fuzzy C-means**,

Exemple d'étude scientifique

Dans une étude de Mahdavi et al. (2019), l'algorithme K-means a été utilisé pour identifier des zones de potentiel agricole dans une région semi-aride d'Iran. Les variables prises en compte incluaient l'humidité du sol, la température, la pente et la couverture végétale. Cette classification a permis aux autorités locales de mieux cibler les investissements agricoles.

L'algorithme K-means, bien que simple, constitue un outil puissant pour analyser des données spatiales et environnementales complexes. Son utilisation dans la gestion durable de l'eau permet de gagner en efficacité, d'améliorer la précision des diagnostics territoriaux et de soutenir les processus décisionnels.

## Chapitre 4 : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

### I. Situation géographique

La zone d'étude correspond à un espace steppique situé dans la partie sud de la wilaya de Tlemcen. Elle englobe cinq communes : El Bouihi, Sidi El Djilali, Sebdou, El Gor, et El Abed, pour une superficie totale de 3 268,4 km<sup>2</sup> et un périmètre de 606,76 km. (Figure n° 13).

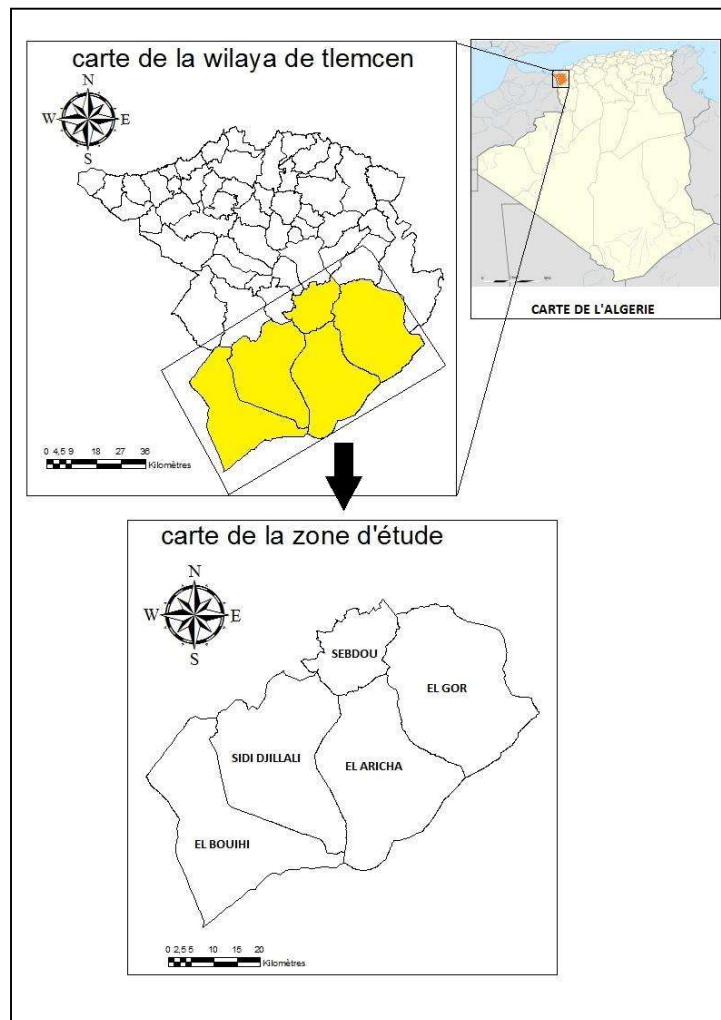


Figure n° 13 : Carte de situation de la zone d'étude (ENNEBATI, 2015)

La surface et le périmètre de chaque commune sont présentés dans le Tableau n° 6.

Tableau n° 6 : Superficie et périmètre des différentes communes étudiées

Commune	Contour administratif (Km)	Surface (Km <sup>2</sup> )
El-Aricha	122,9	747,3
El-Bouihi	149,1	734
El-Gor	121,8	803,9
Sebdou	83,96	249,8
Sidi Djilali	129	733,4

Ces cinq communes regroupées sont délimitées au nord par les monts de Tlemcen, au sud par la wilaya de Naâma, à l'est par la wilaya de Sidi Bel-Abbès et à l'ouest par la frontière algéro-marocaine.

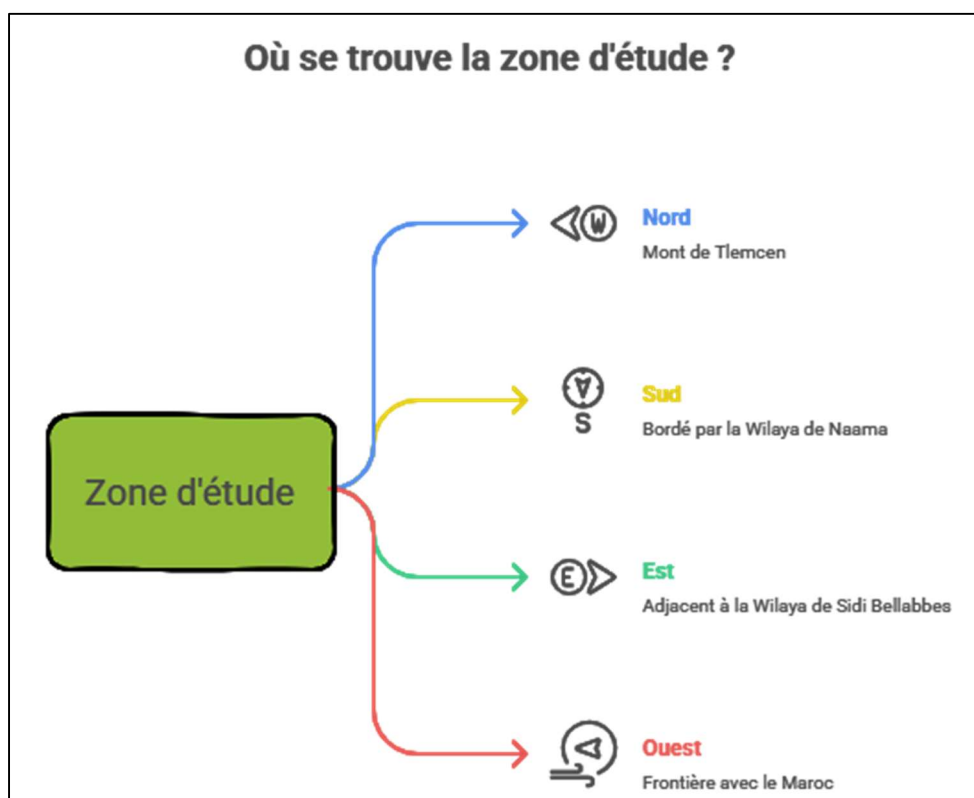


Figure n° 14 : Schéma simplifié de la zone de d'étude (ENNEBATI, 2015)

## **II. Présentation du relief et du réseau hydrographique**

### **II.1 - Morphologie et topographie de la zone d'étude**

Le secteur d'étude se caractérise par une organisation du relief en trois ensembles géographiques majeurs, nettement différenciés.

Dans sa partie nord, la région est structurée par une chaîne montagneuse orientée sud-ouest/nord-est, plus abrupte vers l'ouest et s'adoucissant progressivement en direction de l'est. L'altitude y passe d'environ 1 300 m à 900 m, traduisant une dénivellation d'environ 400 m.

Au centre, le relief devient plus modéré et irrégulier, formé de collines basses, de creux fermés et de cuvettes endoréiques (dayas ou dayats). Ces formes résultent d'un drainage discontinu, donnant au paysage un modelé ondulé dont l'altitude moyenne se situe autour de 1 000 m.

Vers le sud, au-delà des monts de Tlemcen, s'ouvre une plaine steppique où émergent quelques reliefs isolés : le Djebel Sidi El Abed, le Djebel Makaïdou et le Djebel En Necheb, qui atteignent près de 1 200 m. Les versants septentrionaux de ces hauteurs notamment les Djebels Ouark, Kerbaya et Taerziza montrent des pentes marquées et un couvert végétal dense en amont, alors que la déclivité s'adoucit en allant vers l'aval.

Le réseau hydrographique, dominé par des écoulements de direction générale sud-nord, demeure néanmoins intermittent. Dans les zones de dayats, le ruissellement est fréquemment interrompu en raison du caractère fermé et irrégulier du drainage, ce qui renforce le fonctionnement endoréique du secteur.

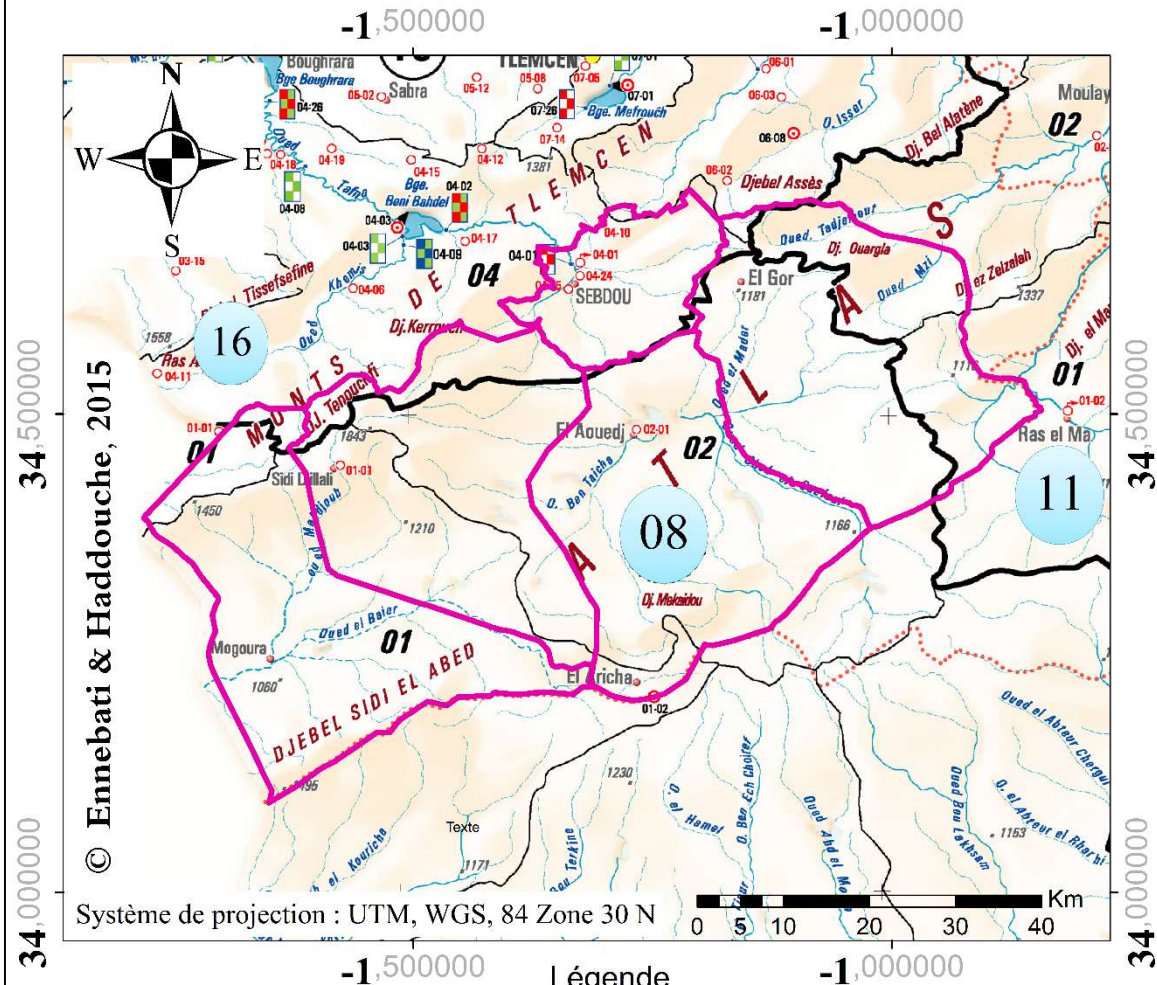
### **II.2 - Hydrologie**

Selon la structuration hydrologique nationale établie par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), la zone d'étude est alimentée par trois grands bassins versants :

- Chott Ech Chergui,
- La Tafna
- La Macta.

Ces trois ensembles constituent les principales unités hydrologiques régionales influençant la dynamique des eaux de surface et souterraines dans la zone steppique étudiée (Figure n°15 et Figure n° 16).

# Carte du réseau hydroclimatologique de la zone d'étude



- 08 Bassin versant du Chott Echergui
- 11 Bassin versant de la Macta
- 16 Bassin versant de la Tafna

Extrait de la carte du réseau hydroclimatologique et de surveillance de la qualité de l'eau du nord Algérien.  
Source : ANRH, (2005)

	06 Limite de bassin avec code		06-15 Station hydrométrique classique
	27 Limite de sous bassin avec code		03-08 Station hydrométrique automatisée
	Limite de wilaya		15-01 Station de surveillance de la qualité de l'eau
	Réseau hydrographique		06-01 Station hydrométrique classique et site de surveillance de la qualité de l'eau
	Barrage		05-09 Station hydrométrique automatisée et site de surveillance de la qualité de l'eau
	Plan d'eau (Chott, Sabkha)		Soumaa Antenne régionale de l'ANRH
	Station pluviométrique		Fouka Secteur rattaché à l'antenne régionale
	Station pluviographique		JIJEL Chef lieu de Wilaya
	Station climatique		AIN M'LILA Localité

Figure n°15 : Carte illustrant le réseau hydroclimatologique de la zone d'étude (A.N.R.H., 2005)

La commune de Sebdou, intégrée au bassin versant de la Tafna, relève du sous-bassin n°4, correspondant à l'Oued Sebdou.

Les communes de Sidi Djilali, El Bouihi et El Aricha se trouvent entièrement à l'intérieur du bassin versant du Chott Ech Chergui, auquel sont rattachés les sous-bassins n°1 et n°2. En revanche, la commune d'El Gor se trouve à la convergence de deux bassins versants distincts : celui du Chott Ech Chergui et celui de Ras El Ma, ce dernier étant lui-même composé de deux sous-bassins principaux, l'Oued Berbor et l'Oued El Hammam. Cette position géographique confère à El Gor un rôle particulier dans le drainage et la gestion hydrologique de la région.

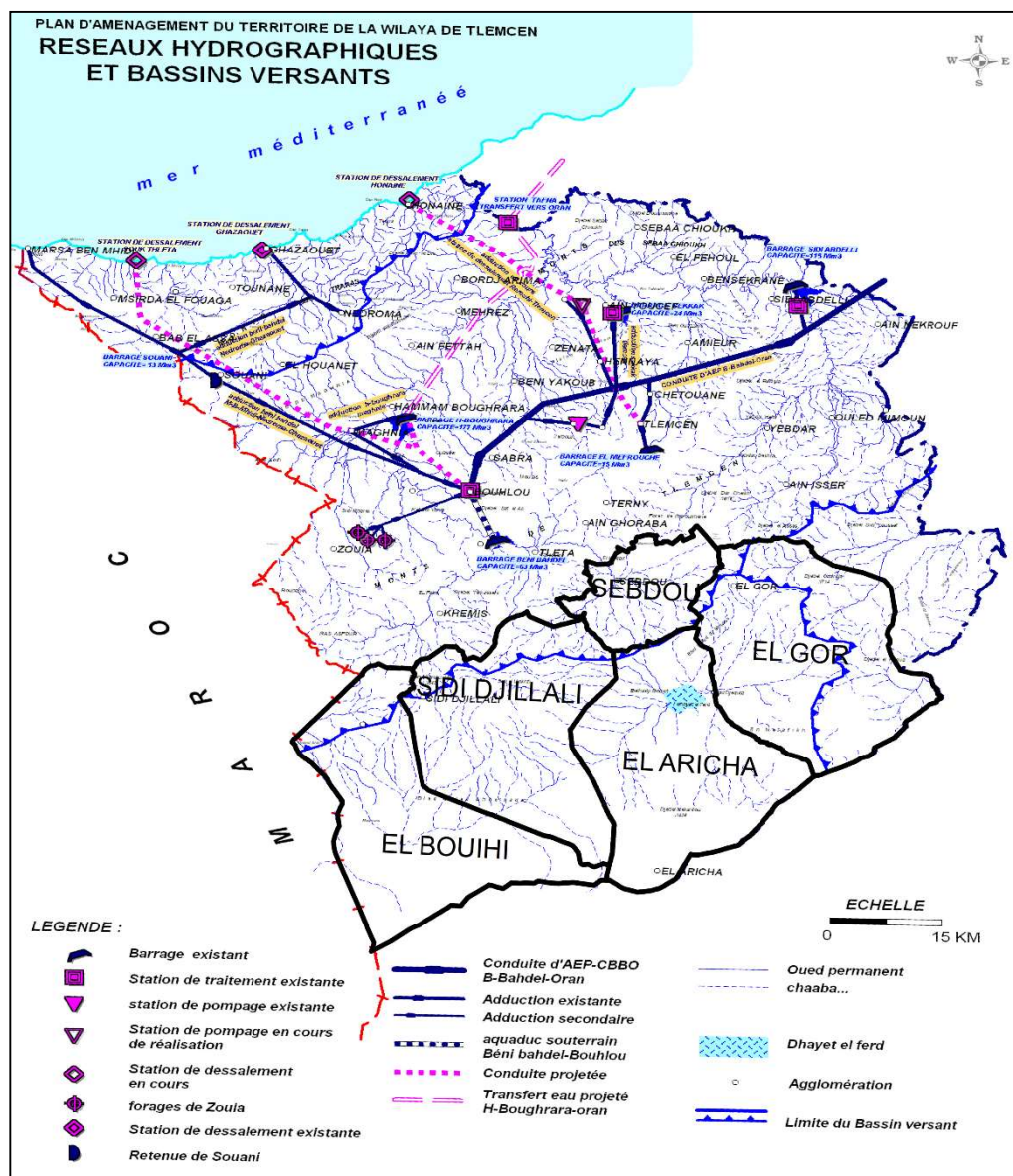


Figure n° 16: Carte représentant les réseaux hydrographiques ainsi que les bassins versants de la zone d'étude (P.D.A.U., 2014)

## II.3 - Géomorphologie

D'après TRICART et al. (1965), la géomorphologie représente un élément fondamental pour l'analyse cartographique dans le cadre des études de reconnaissance. Elle influence de nombreux processus physiques, notamment la morphologie des pentes, la pédogenèse, et, par conséquent, le développement et l'évolution des sols.

L'analyse géomorphologique de la zone d'étude fait ressortir trois grandes unités physiographiques principales :

- Les Djebels :

Il s'agit des reliefs montagneux tels que La montagne de Sidi El Abed, Makaïdou et Chenoufi, , culminant respectivement à 1 791 m, 1 500 m et 1 434 m d'altitude.

Les versants nord de ces massifs présentent des pentes abruptes, une topographie accidentée et une végétation relativement dense, liée à des conditions d'humidité et d'exposition plus favorables.

- Les surfaces planes ou faiblement inclinées (glacis) :

Ces surfaces correspondent à des zones d'accumulation formées par des dépôts alluviaux d'âges et d'origines variés.

Elles se raccordent localement à des terrasses fluviales et parfois lacustres, témoignant d'anciens niveaux d'écoulement ou de sédimentation.

- Les dépressions (dayas) :

Ces zones basses, comme la Dayet El Ferd, se caractérisent par un drainage imparfait et une accumulation de sels, favorisant le développement d'une végétation halophile adaptée aux conditions salines du milieu.

## II.4 - La géologie

La géologie joue un rôle fondamental dans la compréhension de la structure lithologique d'un territoire. Elle constitue l'un des principaux facteurs de formation des sols et de modelage du relief.

Dans le cadre de cette étude, elle revêt une importance particulière, car elle permet également d'évaluer la qualité physique et chimique des formations géologiques, ainsi que la répartition spatiale des points d'eau à l'intérieur de la zone d'étude.

## II.5 - Pédologie

Le sol constitue un milieu cohérent et vivant, dont les propriétés découlent à la fois de son histoire géologique, des conditions de son environnement actuel et souvent de l'influence des activités humaines (HADDOUCHE, 1998).

Sa formation résulte de l'interaction de plusieurs facteurs pédogénétiques essentiels, parmi lesquels :

- La nature de la roche mère, qui détermine la composition minérale du sol ;
- La topographie du milieu, influençant le drainage et l'érosion ;
- Les conditions climatiques, notamment la température et la pluviométrie ;
- L'action de l'homme, à travers les pratiques agricoles ou pastorales ;
- Le type de couvert végétal, qui contribue à la stabilisation et à l'enrichissement organique du sol.

Dans les régions steppiques, les sols soumis à un climat aride présentent généralement un faible degré d'évolution, une profondeur limitée, et peuvent parfois être quasiment absents.

Leur répartition spatiale se présente sous forme d'une mosaïque complexe, où alternent sols anciens et récents, sols dégradés et plus stables, selon les dynamiques naturelles et anthropiques (HADDOUCHE, 2009).

Les sols steppiques se distinguent par deux caractéristiques principales :

- 1- Leur pauvreté et leur fragilité : dominés par des horizons minces et grisâtres, pauvres en humus, ils constituent les formations les plus vulnérables à la dégradation et à l'érosion.
- 2- La présence de sols fertiles mais rares, dont la répartition spatiale reste très limitée à certaines zones privilégiées.

Ces sols fertiles se rencontrent essentiellement dans deux types de contextes géomorphologiques :

- Les sols de dépressions :

Qu'elles soient linéaires (dans les lits d'oueds) ou fermées (chotts et dayas), ces dépressions renferment les meilleurs sols steppiques.

Ils résultent de l'accumulation d'éléments fins transportés par le ruissellement, formant ainsi un horizon pédologique riche et stable, à fort potentiel agricole.

- Les sols de piémont :

Situés en bas des versants, ces sols sont moins homogènes, plus grossiers et moins épais que ceux des dépressions.

Leur stabilité physique réduite limite leur exploitation, mais ils jouent un rôle important dans la transition hydrologique entre les zones d'érosion et les zones d'accumulation.

## II.6 - Paramètres biologiques

### II.6.1 - La végétation

Dans les étendues steppiques, de nombreuses recherches phytosociologiques et écologiques se sont attachées à étudier la végétation, afin de déterminer sa composition, sa structure et son évolution au fil du temps. Ces travaux ont mis en lumière un déclin inquiétant de la végétation steppique, résultant de l'interaction entre les contraintes climatiques (sécheresse, irrégularité des précipitations) et les pressions anthropiques (surpâturage, défrichement, mise en culture inappropriée) (NEDJRAOUI, 1990 ; DJEBAILI et al., 1982 ; BOUAZZA, 1995 ; LE HOUEROU, 1995 ; BEDRANI et al., 1991 ; HADDOUCHE, 2009 ; BENSAID, 2006 ;).

La flore steppique se caractérise par une biodiversité réduite, dominée par des espèces xérophiiles et pérennes, adaptées aux conditions de stress hydrique.

Les formations végétales rencontrées dans ces milieux peuvent être regroupées en deux grands ensembles :

1. Les groupements forestiers
  - Forêts claires à *Pinus halepensis*, localisées sur les sommets des djebels et les zones d'altitude moyenne.
  - Steppes arborées dominées par *Juniperus oxycedrus*, associées à *Stipa parviflora* et *Stipa tenacissima*.
2. Les groupements steppiques
  - *Artemisia herba alba* ;
  - *Stipa tenacissima*
  - *Lygeum spartum*.

Les formations à Alfa, souvent dégradées, présentent une faible exigence édaphique.

Elles se développent préférentiellement sur des sols bien drainés, généralement secs et peu profonds, et ne tolèrent pas les terrains temporairement inondables (MANIÈRE et al., 2009).

La composition floristique des steppes à *Stipa tenacissima* varie sensiblement selon les conditions climatiques annuelles.

En période de bonnes années pluvieuses, ces formations présentent une végétation dense et diversifiée, dominée par l'Alfa, qui s'associe à plusieurs espèces caractéristiques des milieux arides.

Ainsi, l'Alfa se trouve fréquemment en association avec :

- Des graminées, représentées principalement par *Lygeum spartum*, espèce typique des zones sèches à substrat calcaire ;
- Des chaméphytes, dont *Hammada scoparia* et *Helianthemum hirtum*, qui colonisent les sols pierreux et peu profonds ;
- Des psammophytes, telles que *Thymelaea microphylla* et *Noaea mucronata*, localisées sur des sols sableux à épaisseur variable et de texture légère.

Ces associations traduisent la forte adaptation écologique de la flore steppique aux conditions édaphiques et climatiques contraignantes, tout en soulignant le rôle structurant de l'Alfa dans la stabilité de ces écosystèmes.

#### II.6.2 - La faune

La zone d'étude se caractérise à la fois par sa richesse spécifique et par une perturbation notable de ses équilibres naturels.

Elle regroupe à la fois une faune sauvage diversifiée adaptée aux conditions arides et une faune domestique numériquement dominante.

Les ovins, caprins et bovins représentent les principales espèces d'élevage, constituant une ressource vitale pour la majorité des habitants des cinq communes concernées.

Cependant, la pression pastorale accrue exercée par ces cheptels contribue souvent à la dégradation du couvert végétal et à la fragilisation de l'écosystème steppique.

#### II.6.3 - Le Climat

Le climat représente un facteur écologique déterminant, exerçant une influence directe sur l'ensemble des composantes du milieu naturel.

Classé parmi les facteurs abiotiques majeurs, il regroupe plusieurs paramètres étroitement interconnectés, tels que la température, la pluviométrie, l'humidité atmosphérique et le régime des vents.

La vie floristique et faunistique dépend étroitement de la disponibilité en eau, elle-même conditionnée par la quantité et la répartition des précipitations au cours de l'année.

Ainsi, l'analyse du contexte bioclimatique s'avère essentielle pour comprendre la dynamique écologique de la région d'étude et les contraintes naturelles qui pèsent sur son équilibre environnemental.

## II.7 - Environnement bioclimatique de la région d'étude

De nombreux chercheurs se sont intéressés à l'étude du climat général de l'Algérie, en proposant des classifications et des analyses régionales approfondies.

Parmi les travaux de référence figurent ceux de SAUVAGE (1961, 1962–1963, 1995), QUÉZEL (1957), SELTZER (1946), CHAUMONT et PAQUIN (1971), STEWART (1969–1975), BAGNOULS et GAUSSEN (1953–1957), GOUNOT (1959), ainsi que les contributions plus récentes de KADIK (1987), HIRCHE et al. (2007), DJEBAILI (1984), LE HOUÉROU (1995), DAHMANI (1984).

Ces études convergent pour situer le climat de l'Algérie dans le domaine méditerranéen., se situant dans une zone de transition entre :

- la région tropicale, caractérisée par des étés chauds et très secs, et
- la zone saharienne, marquée par des hivers froids et des amplitudes thermiques élevées.

Ce climat, typiquement contrasté, confère au territoire algérien une forte variabilité saisonnière et spatiale, qui se répercute directement sur les conditions écologiques et biogéographiques du pays.

Dans le cadre de la présente étude, deux paramètres climatiques essentiels ont été retenus : la pluviométrie et la température.

Ces deux facteurs jouent un rôle déterminant dans la disponibilité en eau (écoulement de surface, infiltration, alimentation des nappes phréatiques, etc.), mais également dans la répartition des êtres vivants et le fonctionnement des écosystèmes.

Leur choix s'explique aussi par la disponibilité et la fiabilité des données climatiques associées.

Pour caractériser le contexte climatique de la zone d'étude, deux types de diagrammes bioclimatiques ont été utilisés :

- 1- Le diagramme d'EMBERGER (1955), permettant de déterminer l'ambiance climatique générale de la région à partir de l'indice pluviothermique ;
- 2- Le diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1963), servant à identifier les périodes de sécheresse au cours de l'année.

L'analyse climatique repose sur les données météorologiques recueillies auprès des stations d'El Aricha, de Sidi Djilali et de Ras El-Ma dans le tableau ci-après.

**Tableau n° 7 : Situation géographique des stations météo : X, Y, altitude, commune et wilaya**

<b>Stations</b>	<b>Commune</b>	<b>Coordonnées GPS</b>	<b>Altitudes (m)</b>	<b>Wilayas</b>
<b>El Aricha</b>	El Aricha	34°12'00''N 01°60'00''W	1255	Tlemcen
<b>Ras El-Ma</b>	Ras El-Ma	34°30' N 0°49'W	1085	Belabbes
<b>Sidi Djilali</b>	Sidi Djilali	34° 27'56 ''N 1°34'17''W	1275	Tlemcen

Les trois stations météorologiques de Ras El-Ma, de Sidi Djilali et d'El Aricha constituent les principales sources de données climatiques fiables et représentatives pour la zone d'étude.

Bien que la station de Ras El-Ma soit administrativement rattachée à la wilaya de Sidi Bel Abbès, elle a été intégrée à l'analyse en raison de sa proximité géographique immédiate avec la commune d'El-Gor, ce qui lui confère une forte représentativité spatiale des conditions climatiques locales.

De plus, la disposition géographique de ces trois stations, réparties sous forme de ceinture autour de la zone d'étude, permet une meilleure couverture spatiale des variations climatiques régionales, assurant ainsi une analyse plus homogène et précise des paramètres pluviométriques et thermiques(ENNEBATI, 2015) (Figure n° 17).

Les précipitations de la steppe de Tlemcen varient fortement d'une année sur l'autre, rendant leur étude complexe. Pour obtenir une analyse fiable des fluctuations climatiques, il a été nécessaire de considérer des périodes prolongées : Ras El-Ma (1984-2009), 25 ans pour les stations d'El-Aricha et 38 ans pour la station de Sidi Djilali (1970-2008). Cette approche permet de mieux appréhender les tendances et les anomalies climatiques sur le long terme.

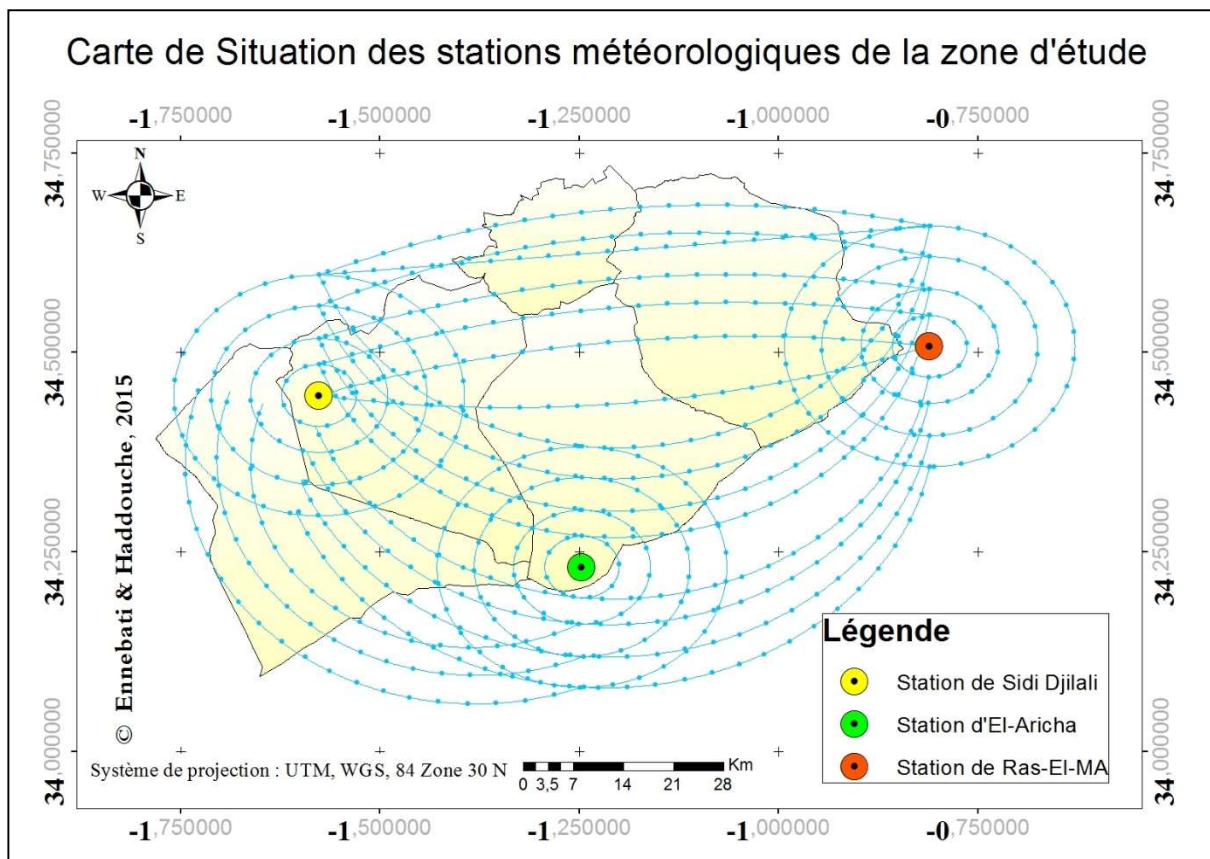


Figure n° 17 Carte illustrant la position des trois stations météorologiques dans la zone d'étude (Ennebati, 2015)

### II.7.1 - Précipitations

La pluviométrie de la région est soumise à l'influence de deux grands groupes de facteurs (HALIMI, 1980) :

- Géographiques, tels que l'altitude, la latitude, la distance à la mer ;
- Météorologiques, notamment les masses d'air, les centres d'action et la trajectoire des dépressions.

Fluctuations des paramètres climatiques, tels que la durée de la saison sèche et l'évapotranspiration, dépend principalement de la pluviosité moyenne annuelle, qui conditionne en grande partie la disponibilité en eau et la dynamique écologique des milieux steppiques.

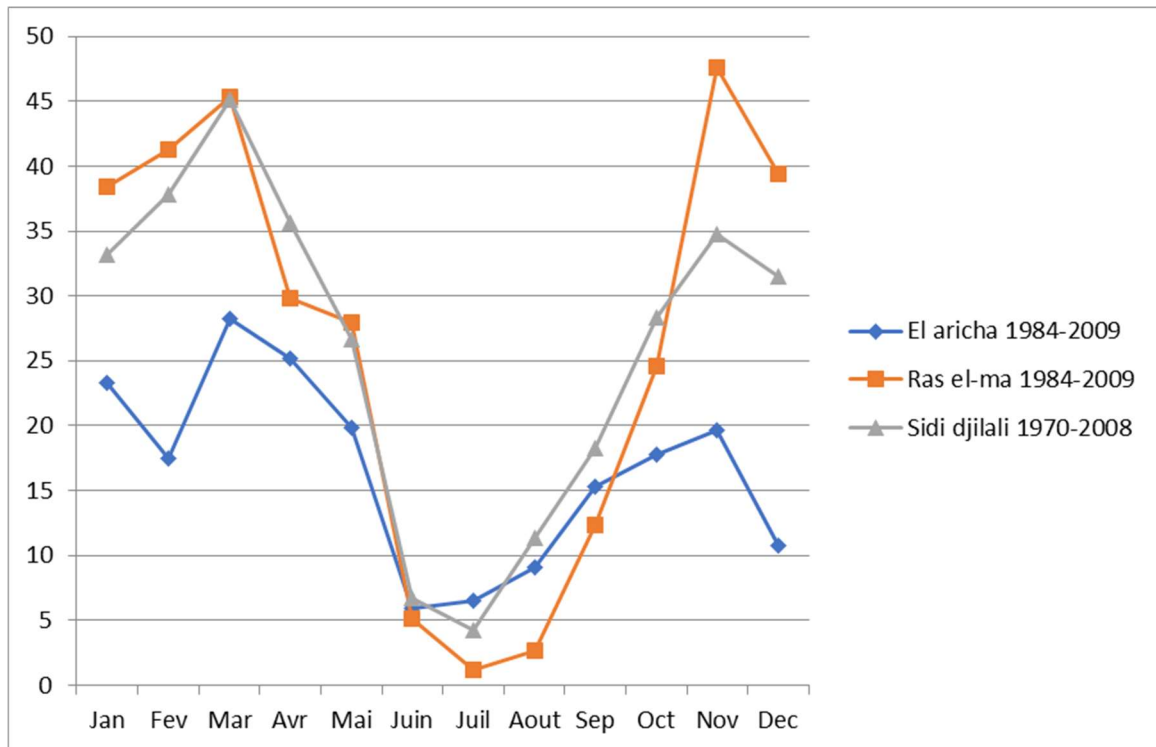


Figure 18: Précipitations mensuelles moyennes observées aux stations d'observation météorologiques d'El-Aricha, de Sidi Djilali et de Ras El-Ma (Ennebati, 2015)

### II.7.1.1 - Précipitations moyennes mensuelles et annuelles

#### - Régime mensuel

D'après la collecte des données par ENNEBATI, 2015, les moyennes mensuelles des trois stations (El Ariche – Sebdu-Sidi El Djilali ) sont représentées dans la figure n°19.

L'examen des données pluviométriques révèle un faible taux de précipitations ainsi qu'une irrégularité interannuelle marquée, caractéristiques typiques du climat steppique. Cette variabilité traduit la forte influence des conditions atmosphériques régionales et des perturbations méditerranéennes sur le régime des pluies.

Les mois les plus pluvieux enregistrés dans chaque station météorologique sont les suivants :

- Mars, avec une moyenne de 28,2 mm à la station d'El Aricha ;
- Mars, avec une moyenne de 45,1 mm à la station de Sidi Djilali ;
- Novembre, avec une moyenne de 47,6 mm à la station de Ras El-Ma.

Ces valeurs confirment que la pluviométrie se concentre principalement en hiver et au début du printemps, période au cours de laquelle les précipitations assurent la régénération du couvert végétal et la recharge partielle des nappes superficielles.

À l'inverse, les mois les plus secs sont observés en été, période marquée par une quasi-absence de précipitations. Ainsi, le mois de juillet constitue le mois le moins pluvieux dans les stations de Sidi Djilali et de Ras El-Ma, avec des moyennes respectives de 4,2 mm et 1,2 mm. En revanche, à la station d'El Aricha, c'est le mois de juin qui enregistre la plus faible pluviométrie, avec une moyenne de 5,9 mm.

La valeur maximale de précipitations relevée pour l'ensemble des stations a été observée à Ras El-Ma, avec 47,6 mm durant le mois de mars, sur la période 1970-2008.

Cette forte disparité saisonnière illustre la dominance du régime méditerranéen aride, caractérisé par des hivers relativement humides et des étés chauds et secs, typiques des zones steppiques du sud-ouest algérien.

#### II.7.1.2 - Régime saisonnier

La compréhension des périodes les plus humides présente un intérêt majeur. Selon AIDDOUD et al. (2006), les pluies hivernales participent au maintien de l'humidité du sol, tandis que les précipitations printanières interviennent durant la phase de croissance des cultures. Même les pluies d'automne jouent un rôle significatif dans le déroulement du cycle biologique annuel.

Le régime pluviométrique saisonnier observé pour les stations étudiées est le suivant :

- El Aricha : HP AE ;
- Sidi Djilali : PH AE ;
- Ras El-Ma : HA PE.

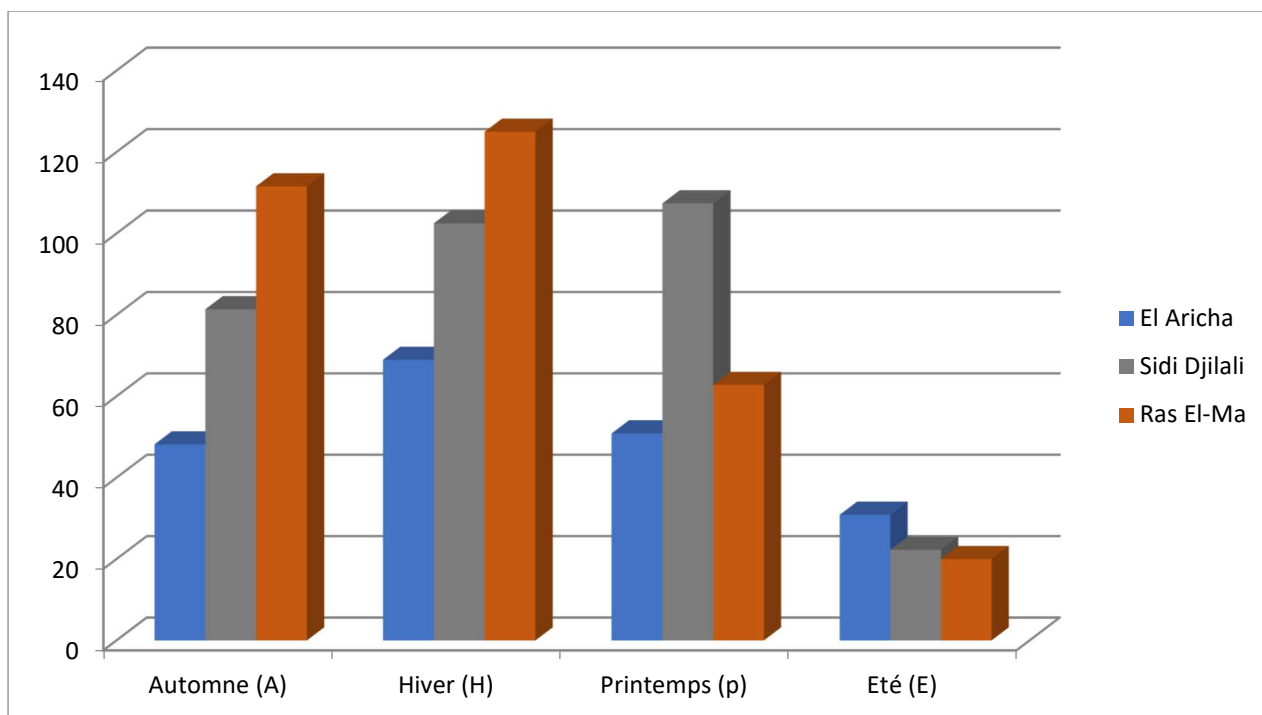


Figure n° 19 : Variation saisonnière des régimes climatiques observés dans les trois stations

### II.7.2 - Température

Le second facteur climatique fondamental après la pluviosité est la température . Une importance primordiale en raison de son influence directe sur les êtres vivants, notamment sur la croissance des végétaux et le comportement des animaux. Selon son intensité et sa répartition annuelle, la température joue un rôle déterminant dans la définition du climat régional et dans la dynamique des écosystèmes steppiques.

Le tableau n°8 présente les moyennes mensuelles des températures enregistrées dans les trois stations météorologiques de la zone d'étude :

- El Aricha et Ras El-Ma pour la période 1984 – 2009 ;
- Sidi Djilali pour la période 1970 – 2008.

Tableau n°8 : Températures moyennes mensuelles et annuelles

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	T_moy
<b>Sidi Djilali</b>	5.3	6.9	9.9	12.5	18.8	23.4	27.8	27.2	21	16.1	10.5	7	15.53
<b>Ras El-Ma</b>	9.7	10.8	12.9	15.1	18.2	20.9	24.1	24.1	21.5	18.6	14.6	10.4	16.74
<b>El Aricha</b>	4.8	6.2	9.4	10.9	17.6	21.9	27.7	27	20.7	14.6	8.65	5.5	14.57

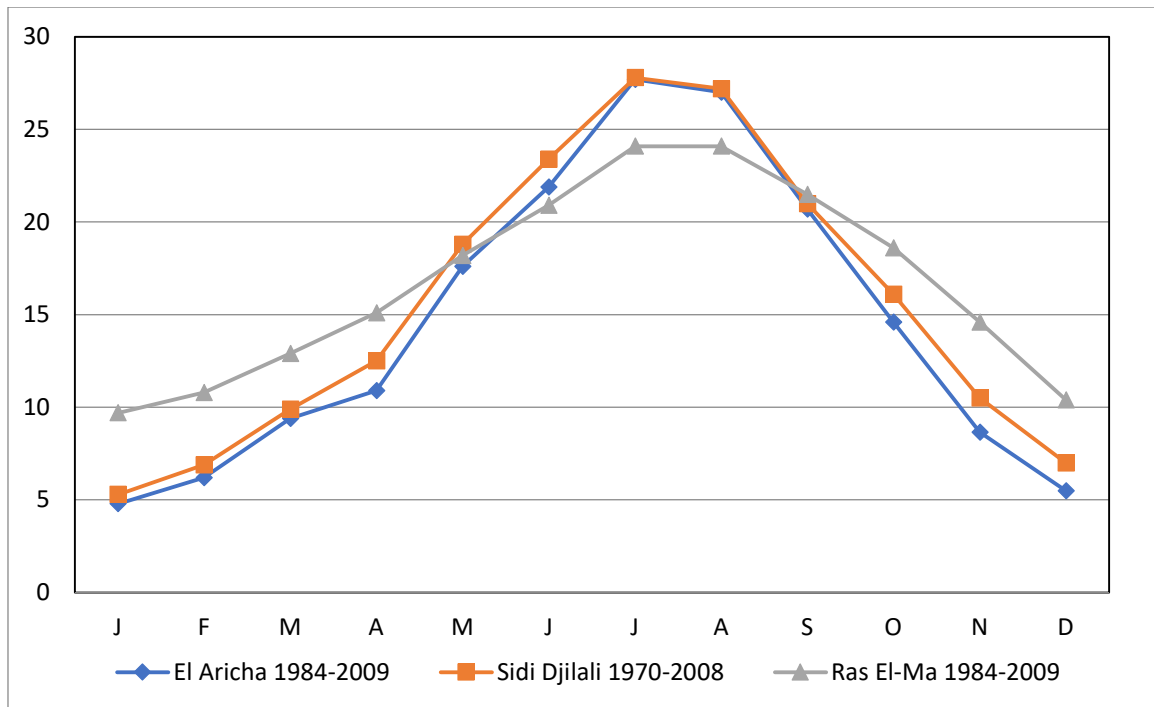


Figure n°20 : Évolution mensuelle des températures moyennes des trois stations

L'analyse des données climatiques indique que le mois de juillet correspond à la période la plus chaude de l'année, tandis que le mois de janvier enregistre les températures les plus basses pour l'ensemble des trois stations météorologiques étudiées.

### II.7.3 - Autres facteurs Climatiques

#### II.7.3.1 - Le Vent

En l'absence de données météorologiques précises, l'étude du régime des vents repose sur des observations empiriques et des constatations de terrain permettant d'en dégager les tendances générales (BENABADJI et BOUAZZA, 2000).

Les vents qui traversent la zone d'étude présentent des origines variées selon leur direction dominante :

#### \* Vents du Nord

En hiver, ces vents secs et froids pénètrent dans la zone par les monts de Tlemcen, provoquant parfois des chutes de neige au-delà de 1 400 mètres d'altitude, notamment dans la région de Sidi Djilali.

Durant la période mars et octobre, ces mêmes vents deviennent plus chauds et parfois humides après leur passage au-dessus de la mer, ce qui contribue à modérer la chaleur estivale, en particulier dans la région de Sebdou.

#### **\* Vents d'Ouest**

Ce sont les vents dominants de la région, soufflant principalement du sud-ouest vers le nord-ouest.

Ils jouent un rôle déterminant dans la formation des précipitations, grâce à l'ascendance forcée des masses d'air humides sur les monts de Tlemcen, ce qui explique le taux de pluviométrie relativement élevé observé à Sidi Djilali.

Ces vents sont surtout fréquents durant les mois de novembre à février.

#### **\* Vents du Sud**

Ce sont des vents secs et chauds, soufflant principalement au printemps et à l'automne, parfois même en été.

Ils transportent d'importantes quantités de sables et de limons, contribuant ainsi à la déflation éolienne et à la dégradation des sols dans le milieu steppique.

### **II.7.3.2 - Les gelées**

LOUDREC (1974) définit la gelée blanche comme l'apparition de cristaux de glace sur une surface refroidie par le rayonnement nocturne.

Dans la zone d'étude, la température moyenne du sol, à 25 cm de profondeur, varie entre 7 °C et 9 °C durant la saison froide, tandis qu'à 1 mètre de profondeur, elle dépasse 11 °C, offrant ainsi une relative protection aux racines.

Selon le même auteur, la région d'El Aricha a présenté plus de 50 jours de gel par an entre 1968 et 1988. Le gel devient possible dès que la température minimale descend sous 10 °C et se produit régulièrement lorsque la température moyenne minimale du mois le plus froid est inférieure à 3 °C.

Ainsi, El Aricha se situe dans la zone à forte occurrence de gelées, dépassant souvent les 50 jours par an, ce qui influence directement la végétation et les pratiques agricoles locales.

### **II.7.3.3 - La neige**

Les chutes de neige constituent un apport hydrique ponctuel mais précieux pour la végétation.

Bien que leur contribution aux précipitations totales soit relativement faible, elles ne sont pas rares sur les hauteurs, notamment dans la partie nord montagneuse du territoire, en particulier au niveau du Djebel Tchenoufi, situé au nord-ouest de Sidi Djilali.

Dans cette zone, la neige peut persister au sol jusqu'à deux semaines par an, apportant une recharge en eau par fusion bénéfique pour les sols et les parcours naturels.

#### ***II.7.4 - Synthèse Climatique***

L'analyse climatique repose sur la combinaison de plusieurs paramètres météorologiques étudiés sur de longues périodes. De nombreux chercheurs ont élaboré des approches numériques et graphiques pour classer les types de climat et mesurer leur impact sur la distribution de la végétation. En s'appuyant sur les deux variables clés précipitations et températures il est possible de caractériser avec précision le climat de la zone étudiée et de situer sa position bioclimatique au sein de l'espace steppique du sud de la wilaya de Tlemcen.

##### **II.7.4.1 - Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN**

D'après BAGNOULS et GAUSSEN (1953), l'utilisation conjointe des précipitations et des températures dans un diagramme ombrothermique permet de suivre leurs variations simultanées au cours de l'année, et ainsi de déterminer la période sèche.

Les auteurs ont proposé une échelle de correspondance définissant la saison sèche par la relation  $P \leq 2T$ , où P représente les précipitations mensuelles (en mm) et T la température moyenne mensuelle (en °C).

Ainsi, chaque fois que les valeurs de précipitations deviennent inférieures ou égales au double de la température, le mois concerné est considéré comme sec.

**T** : Températures moyennes mensuelles exprimées en degré Celsius.

**P** : Précipitations moyennes mensuelles exprimées en (mm).

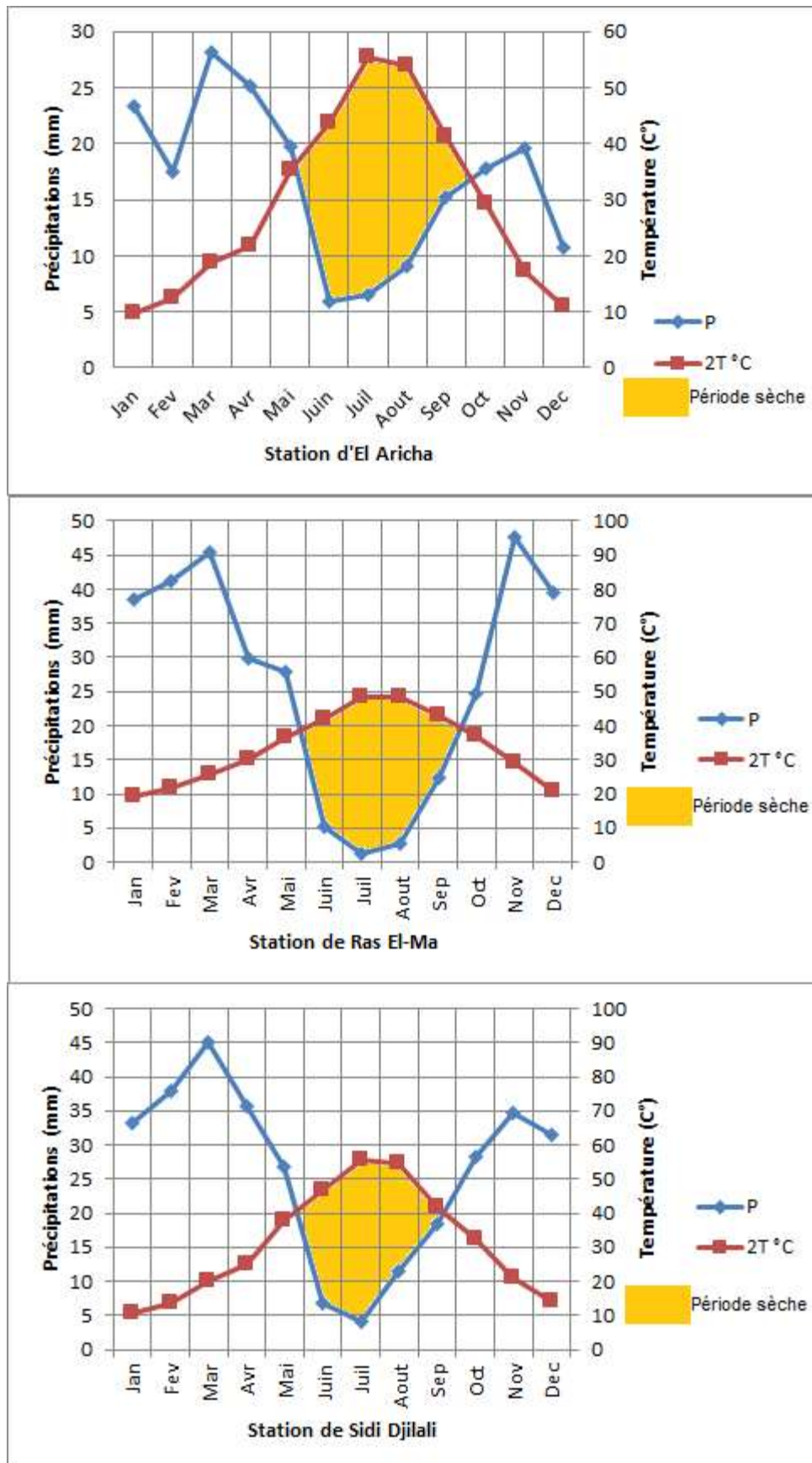


Figure n°21 : Représentation ombrothermique des trois stations d'après la

L'étude conjointe des courbes de température et de précipitations permet d'estimer avec précision la durée de la saison sèche. Selon les diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gaussen (Figure n°21), cette période sèche s'étend sur environ quatre mois, du Juin à septembre, d'après les observations relevées dans les trois stations météorologiques analysées. Cette phase se distingue par un important déficit hydrique, durant lequel les températures mensuelles demeurent nettement supérieures aux précipitations, traduisant ainsi le caractère semi-aride du climat steppique de la région.

#### **II.7.4.2 - Indice d'EMBERGER**

La classification climatique proposée par EMBERGER (1955) demeure l'un des outils les plus utilisés pour la caractérisation des climats méditerranéens.

Elle repose sur un diagramme bi-dimensionnel dans lequel la valeur du quotient pluviothermique ( $Q_2$ ) est portée sur l'axe des ordonnées, tandis que la température moyenne du mois le plus froid de l'année figure sur l'axe des abscisses.

Selon DAJOZ (1985), le climagramme D'EMBERGER permet de situer chaque station d'étude dans l'étage bioclimatique qui lui correspond, en fonction des relations établies entre la pluviométrie et le régime thermique.

L'application de cette méthode à différentes stations méditerranéennes a permis de distinguer quatre grands types de climats :

- Saharien aride,
- Semi-aride,
- Subhumide,
- Humide.

Le quotient pluviothermique ( $Q_2$ ), élément central de cette classification, met en relation les précipitations annuelles avec les températures extrêmes (maximales et minimales).

Il est exprimé selon la formule suivante :

$$Q_2 = 2000P / (M^2 - m^2)$$

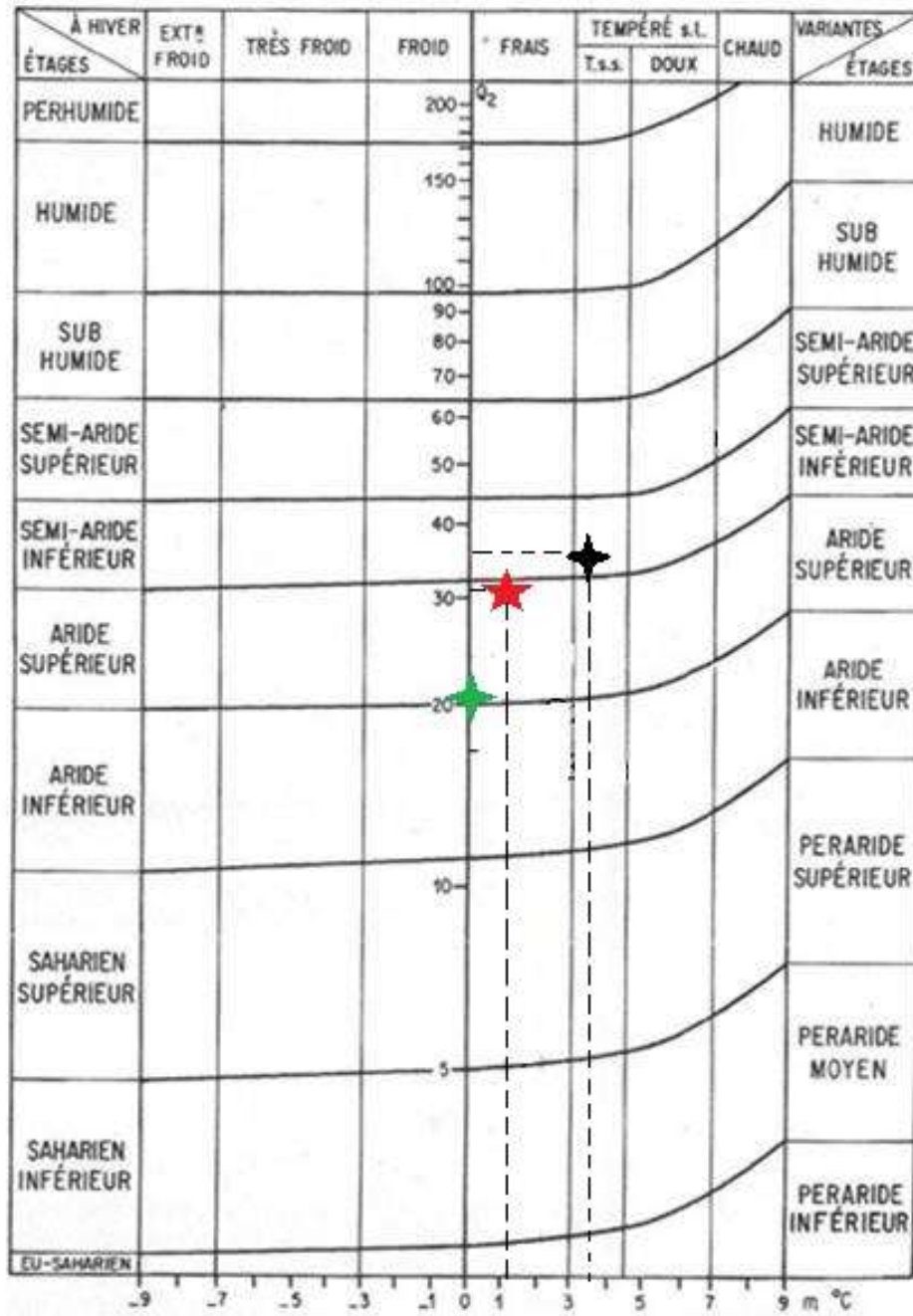
où :

M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (en Kelvin ou en °C),

P : moyenne annuelle des précipitations (en millimètres),

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid (en Kelvin ou en °C).

Ce quotient permet ainsi de définir le type bioclimatique d'une région en fonction du rapport entre chaleur et humidité, et constitue un outil synthétique de diagnostic climatique largement employé dans les études environnementales et écologiques du milieu méditerranéen.



- ★ Sidi Djilali (1970-2008)      ✦ Ras El-Ma (1984-2009)
- ★ El Aricha (1984-2009)

Figure n° 22 : Représentation pluviométrique des trois stations d'après Emberger

Tableau n° 9 : Étages bioclimatiques et valeurs du Q2 pour chaque station

Station	El Aricha	Ras El-Ma	Sidi Djilali
Période	1984-2009	1984-2009	1970-2008
M (°K)	306.1	305.4	309
m (°K)	273.2	276.7	274.3
P (mm)	198	315.6	313.61
Q <sub>2</sub>	20.77	37.78	30.98
Ambiance bioclimatique	Aride supérieur à hiver frais	Semi-aride à hiver tempéré	Aride supérieur à hiver frais

## II.8 - Aspect socioéconomiques

Le milieu steppique du sud de la wilaya de Tlemcen évolue sous l'effet combiné des changements climatiques et des mutations socio-économiques qui modifient progressivement les modes de vie et les pratiques locales.

Comme le souligne HADDOUCHE (2009), « viser un développement durable revient à concilier les exigences de l'activité économique, le progrès social et la préservation de l'environnement ».

Dans le cadre de cette étude, l'analyse de la population repose sur les données issues des Recensements Généraux de la Population et de l'Habitat (RGPH), enrichies par une enquête de terrain réalisée par le bureau d'études au niveau du chef-lieu de la zone.

Par ailleurs, les documents de planification territoriale, tels que le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU) et le Document de Plan d'Aménagement du Territoire (DPAT), ont été mobilisés afin de collecter des informations démographiques, économiques et sociales spécifiques à chacune des communes étudiées.

### II.8.1 - Population

L'étude de la population représente une étape essentielle pour comprendre les dynamiques territoriales et urbaines.

En réalité, une commune ou une zone d'étude ne peut être considérée exclusivement sous l'aspect spatial ou administratif; elle doit également être envisagée comme un espace habité et fonctionnel, façonné par les interactions humaines et les activités socio-économiques qui s'y développent.

Ainsi, la caractérisation de la population à travers sa taille, sa densité, sa répartition spatiale et son évolution temporelle constitue un indicateur majeur permettant d'évaluer les pressions exercées sur le milieu naturel et d'orienter les stratégies locales de développement durable.

### *II.8.2 - Evolution de la population*

L'analyse de l'évolution démographique au niveau communal constitue un indicateur essentiel pour comprendre les transformations sociales et économiques d'un territoire.

L'évaluation quantitative et qualitative de la population permet d'appréhender ses caractéristiques principales, sa répartition spatiale, ainsi que les tendances d'évolution au fil du temps (ENNEBATI, 2015).

Cette approche offre également la possibilité d'établir des corrélations entre la dynamique démographique et le niveau de satisfaction des besoins fondamentaux, notamment dans le domaine de l'activité agricole, qui demeure une composante majeure de l'économie locale.

Les statistiques qui ont été faites en 2008 ont révélé que le nombre d'habitant de notre zone d'étude est de 73041 habitants (Tableau n° 10).

**Tableau n° 10 : Variation démographique au cours des trois derniers recensements généraux de la population et de l'habitat**

	<b>El Aricha</b>	<b>El Bouihi</b>	<b>El Ghor</b>	<b>Sebdou</b>	<b>Sidi Djilali</b>
<b>RGPH 1987</b>	5820	7833	7268	25 203	7118
<b>RGPH 1998</b>	5100	7618	7754	35 836	5229
<b>RGPH 2008</b>	7171	9021	8762	40 932	7155

(D.P.A.T, 2014)

Le tableau précédent a servi de base pour la réalisation de l'histogramme suivant :

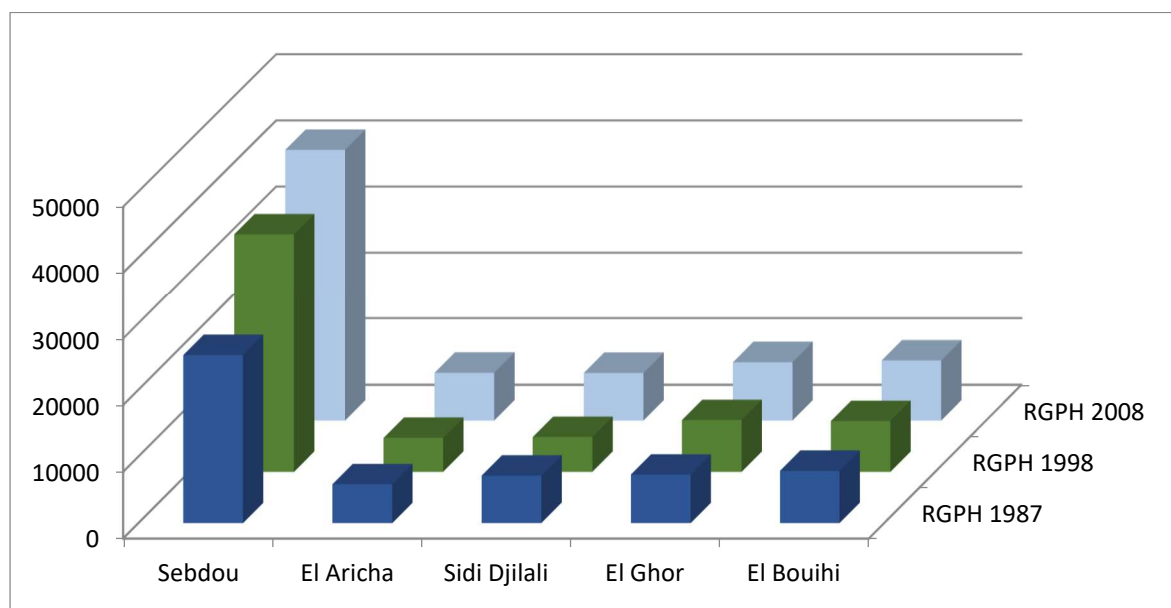


Figure n° 23 : Histogramme de l'évolution démographique de la zone d'étude

L'examen de l'évolution démographique révèle une baisse sensible de la population au cours de la première décennie (1987–1998), notamment dans les communes de El Aricha, Sidi Djilali et El Bouihi (Figure n° 23 ). Cette régression s'explique principalement par un mouvement migratoire important vers les régions nord de la wilaya, motivé par le manque d'infrastructures et d'équipements de base dans le sud steppique, mais également par les conditions socio-politiques difficiles vécues durant cette période, souvent désignée comme la décennie noire (ENNEBATI,2015).

En revanche, la deuxième décennie se caractérise par un taux d'accroissement démographique positif dans l'ensemble des communes. Cette reprise est liée à l'amélioration des conditions de vie, à la revalorisation des zones rurales et à l'émergence de nouvelles opportunités économiques, ayant favorisé la stabilisation et le retour progressif de la population (ENNEBATI,2015).

### ***II.8.3 - Densité de la population***

La densité de population représente le rapport entre le nombre d'habitants et la superficie occupée. Elle constitue un indicateur essentiel pour évaluer la répartition spatiale de la population et les pressions exercées sur le territoire.

Le tableau suivant présente la densité moyenne observée dans chacune des communes étudiées, permettant ainsi de comparer le degré d'occupation humaine au sein de la zone steppique du sud de la wilaya de Tlemcen.

**Tableau n° 11 : Répartition de la population par unité de surface dans chaque commune en 2008**

Communes	El Aricha	El Bouihi	El Gor	Sebou	Sidi Djilali	Total
Superficie (Km <sup>2</sup> )	747	734	804	250	733	3,268
Population(RGPH,2008)	7,171	9,021	8,762	40,932	7,155	73,041
Densité hab/Km <sup>2</sup>	10	12	11	164	10	206

(D.P.A.T, 2014)

L'analyse des données démographiques montre que la commune de Sebdoou présente la densité la plus élevée, atteignant environ 164 habitants par km<sup>2</sup>. À l'inverse, les autres communes affichent des densités nettement plus faibles, ne dépassant pas 12 habitants par km<sup>2</sup>.

Cette disparité spatiale traduit une concentration de la population dans le centre urbain de Sebdoou, où se regroupent les principales activités économiques et les infrastructures, tandis que les communes voisines conservent un caractère rural et faiblement peuplé.

Les données issues du tableau précédent ont servi à la réalisation d'une carte thématique illustrant la densité de population dans l'ensemble de la zone d'étude.

Dans cette représentation (Figure n° 24), chaque point correspond à 100 habitants, répartis de manière aléatoire afin de visualiser la distribution spatiale et de mieux apprécier les contrastes démographiques entre les différentes communes.

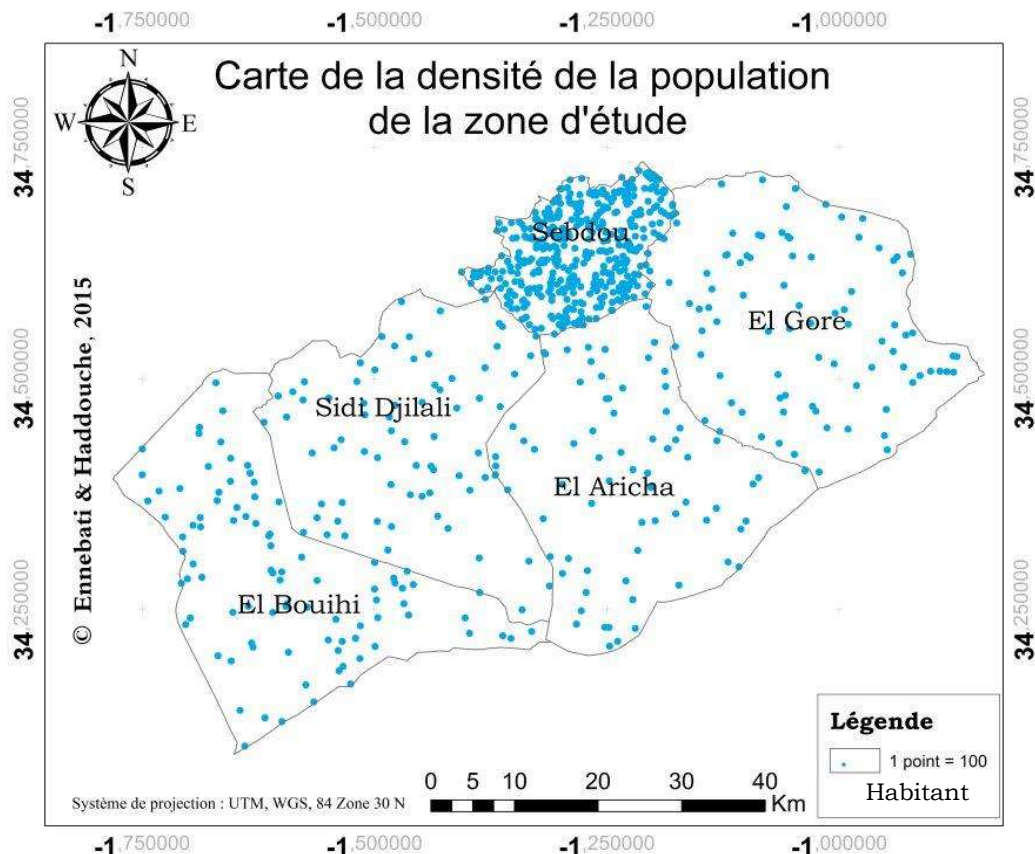


Figure n° 24 : Carte illustrant la densité démographique de la zone d'étude pour l'année 2008 (ENNEBATI, 2015).

#### II.8.4 - Agriculture et l'agro-pastoralisme

HADDOUCHE (2009) souligne que, dans les régions arides et semi-arides, le passage du pastoralisme mobile à des pratiques agro-pastorales mixtes s'est fortement intensifié au cours des dernières décennies.

Cette transformation s'explique en grande partie par la mise en œuvre de politiques nationales de lutte contre la sécheresse, destinées à stabiliser les systèmes d'élevage et à préserver un cheptel significatif, même durant les périodes critiques.

Ces politiques ont favorisé le développement d'une agriculture complémentaire, notamment par le transfert de fourrages en provenance des zones les plus favorables vers les régions steppiques et arides, contribuant ainsi à renforcer la résilience du secteur pastoral et à assurer une meilleure sécurité alimentaire pour les populations locales.

### II.8.4.1 - La répartition générale des terres

D'après les statistiques publiées par la Direction des Services Agricoles (D.S.A.) de la wilaya de Tlemcen au 31 décembre 2014, la distribution des terres agricoles selon les communes de la zone étudiée est illustrée dans le tableau suivant :

Tableau n° 12 : Distribution des superficies des terres de la zone d'étude (ha)

COMMUNES	Superficie	Surface agricole total	SUPERFICIE AGRICOLE UTILE (S.A.U.)					AUTRES TERRES UTILISEES PAR L'AGRICULTURE.		
			TOTAL	D	O	N	T	IRRIGUEE	TERRES IMPRODUCT.	PARCOURS PACAGES
				TERRES LABOUR.	CULTURES S/SERRES	CULTURES PERMAN.				
BOUHI	73,400	44,100	19,500	19,292	-	208	209	200	24,400	
EL-ARICHA	74,730	25,000	15,700	15,665	-	35	45	300	9,000	
EL-GOR	80,390	46,000	17,000	16,961	-	39	41	35	28,965	
SEBDOU	24,980	17,758	9,406	8,503	-	903	369	200	8,152	
SIDI DJILLALI	73,340	41,300	10,000	9,880	-	120	98	300	31,000	
<b>TOTAL</b>	<b>326,840</b>	<b>174,158</b>	<b>71,606</b>	<b>70,301</b>	<b>-</b>	<b>1,305</b>	<b>762</b>	<b>1,035</b>	<b>101,517</b>	

Source : D.S.A. (2015)

L'analyse du tableau permet d'extraire un ensemble d'informations pertinentes, parmi lesquelles seules les données les plus significatives ont été retenues et seront présentées progressivement au cours de cette étude.

La Surface Agricole Utile (S.A.U.) des cinq communes représente environ 22 % de la superficie totale de la zone d'étude, ce qui constitue une proportion non négligeable.

Elle correspond par ailleurs à près de 41 % de la Surface Agricole Totale (S.A.T.), traduisant ainsi l'importance du potentiel agricole exploitable dans cette région steppique du sud de la wilaya de Tlemcen.

#### 1.1 - Répartition de la S.A.T

L'examen de la répartition de la Surface Agricole Totale (S.A.T.) montre que les parcours pastoraux constituent la part la plus importante des terres dans l'ensemble des communes étudiées.

En comparaison, la Surface Agricole Utile (S.A.U.) reste relativement limitée et ne dépasse pas les 20 000 hectares.

Les terres improductives, quant à elles, occupent des superficies réduites, notamment dans la commune d'El Gor, où leur proportion demeure marginale.

Cette distribution traduit la vocation essentiellement pastorale du milieu steppique, où les activités agricoles demeurent secondaires par rapport à l'exploitation des parcours naturels.

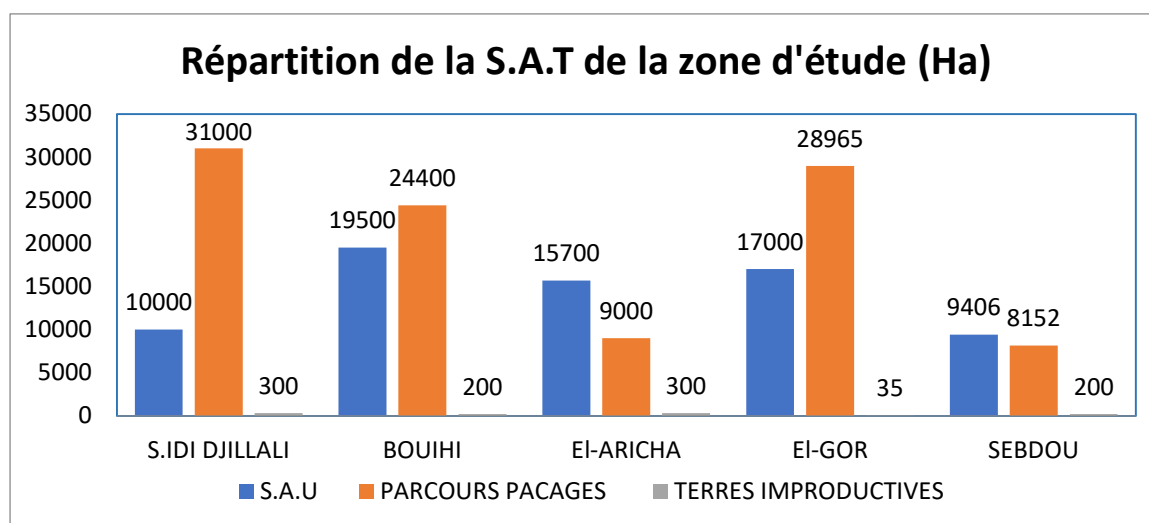


Figure n° 25 : Distribution de la Surface Agricole Totale (S.A.T.) de la zone d'étude représentée par un histogramme (D.S.A., 2015)

### 1.2 - Répartition de la Surface Agricole Utile (S.A.U)

La Surface Agricole Utile (S.A.U) de la zone d'étude se compose de trois types de terres présentant des superficies différentes. Les terres labourées représentent la majorité avec 70 301 ha, tandis que les terres irriguées couvrent 762 ha. Les terres consacrées aux cultures permanentes s'étendent sur 1 305 ha.

L'étude de la répartition des terres agricoles met en évidence que les surfaces irriguées ainsi que les terres de cultures permanentes sont très limitées, totalisant au maximum 905 hectares pour toutes les communes.

À l'inverse, les terres labourées représentent la part la plus importante, atteignant jusqu'à 19 300 hectares (Figure n° 26).

Par ailleurs, on note l'absence totale de cultures sous serres dans l'ensemble de la zone d'étude, traduisant une faible diversification agricole et une dépendance marquée aux cultures pluviales et aux conditions climatiques locales.

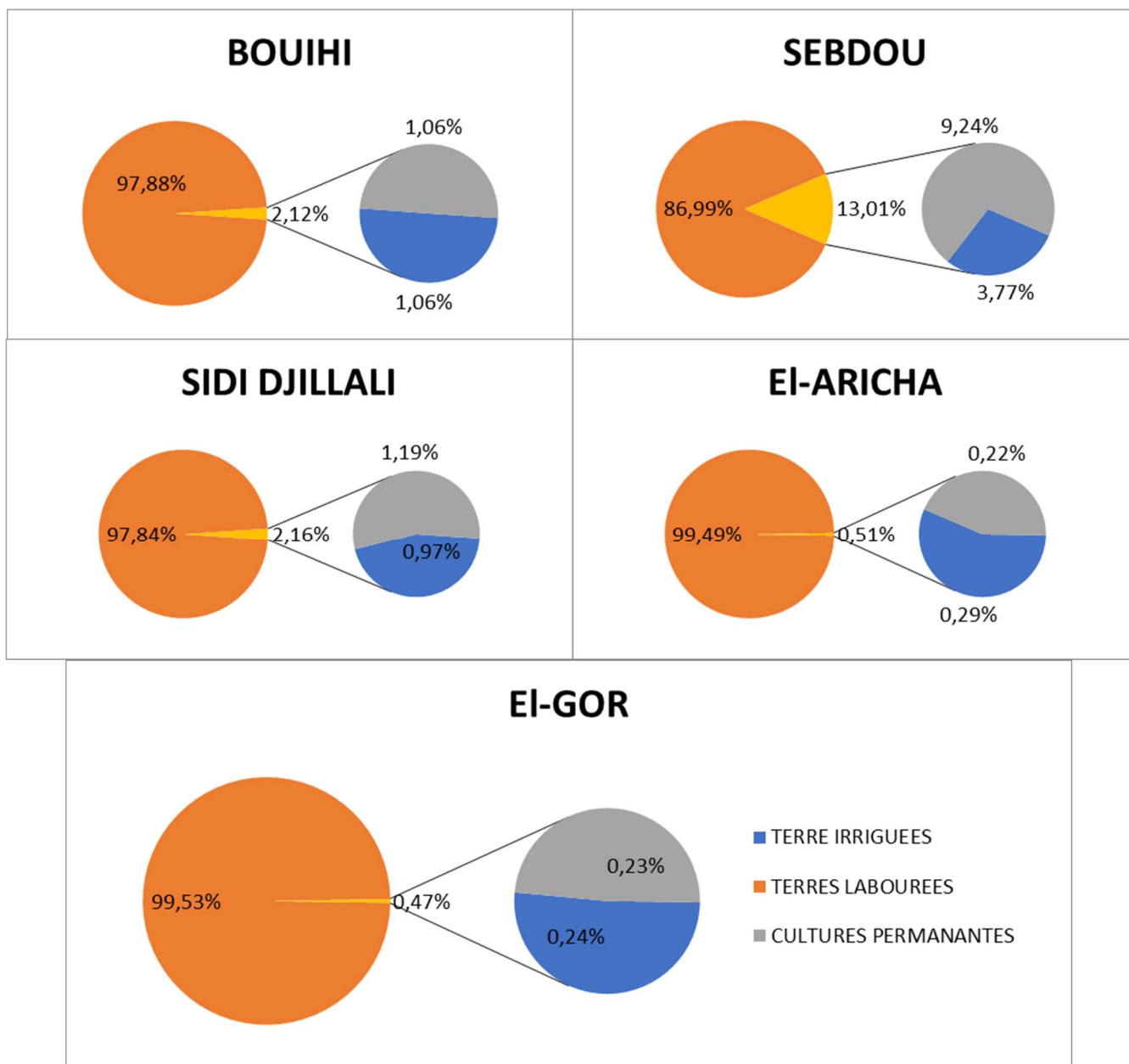


Figure n° 26 : Diagramme circulaire représentant la part de la S.A.U. pour chaque commune

#### II.8.4.2 - Production Agricole

Compte tenu de la vocation essentiellement pastorale de la zone d'étude, l'activité agricole y demeure limitée et étroitement liée à l'élevage extensif.

Seule la commune de Sebdoou se distingue par une orientation agropastorale plus marquée, combinant à la fois la production végétale et l'élevage.

Le tableau suivant présente la répartition des types de cultures observés dans chaque commune, en distinguant les cultures pérennes (arbres fruitiers, oliveraies, etc.) et les cultures herbacées (céréales, légumineuses, fourrages, etc.).

Cette différenciation permet de mieux apprécier la structure agricole locale et de comprendre les spécificités productives propres à chaque territoire communal.

**Tableau n°13 : Rendements des cultures herbacées au cours de l'année agricole 2013/2014**

COMMUNES	FOURRAGES ARTIFICIELS		CULTURES MARAICHERES		CEREALES		LEGUMES SECS	
	Sup.(Ha)	Prod.(Qx)	Sup.(Ha) Réelle	Prod.(Qx)	Superficie ensemencée (Ha)	Prod.(Qx)	Sup.(Ha)	Prod.(Qx)
BOUIHI	50	2,000	5	180	6,700	17,720	-	-
EL-ARICHA	10	400	-	-	9,000	31,790	-	-
EL-GOR	100	4,000	34	5,400	8,850	11,250	-	-
SEBDOU	200	7,000	110	26,690	4,200	15,060	10	40
Sidi DJILLALI	20	800	6	710	7,000	20,190	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>380</b>	<b>14,200</b>	<b>155</b>	<b>32,980</b>	<b>35,750</b>	<b>96,010</b>	<b>10</b>	<b>40</b>

Source : D.S.A. (2015)

L'analyse des données de production révèle que la commune d'El Aricha occupe la première place en matière de production céréalière, avec un rendement estimé à 31 790 quintaux, tandis qu'elle enregistre la plus faible production en fourrages artificiels, évaluée à 400 quintaux.

Elle est suivie par la commune d'El Gor, qui se distingue par de bons résultats dans la production de céréales, de fourrages artificiels ainsi que de cultures maraîchères.

Quant à la commune de Sebdoou, elle demeure la seule localité de la zone d'étude où l'on cultive des légumineuses sèches, témoignant d'une plus grande diversification agricole liée à sa vocation agropastorale.

**Tableau n°14 : Rendements des cultures pérennes au cours de l'année agricole 2013/2014**

COMMUNES	Agrumes		Viticulture		Figuiers		Oliviers			Arb. Fruitières diverses	
	Sup.							Nbre total		Sup	
	Compl	Prod	Sup	Prod	Sup	Prod	Sup.	Oliviers	Prod	(Ha)	Prod
	(Ha)	(Qx)	(Ha)	(Qx)	(Ha)	(Qx)	(Ha)	Cultivés	(Qx)	Compl	(Qx)
BOUIHI	-	-	-	-	-	-	145	52,500	260	63	1,320
EL-ARICHA	-	-	-	-	-	-	9	1,800	5	26	940
EL-GOR	-	-	-	-	-	-	11	2,200	15	28	590
S./ DJILLALI	-	-	-	-	-	-	50	9,900	35	70	650
SEBDOU	-	-	-	-	-	170	507	54,200	2,790	396	10,580
<b>TOTAL</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>170</b>	<b>722</b>	<b>120,600</b>	<b>3,105</b>	<b>583</b>	<b>14,080</b>

Source : D.S.A. (2015)

Dans le cadre du programme national de développement de l'oléiculture initié par l'État algérien (ENNEBATI, 2015), l'ensemble des communes de la zone d'étude participent activement à ce projet.

La commune de Sebdou se distingue par sa position dominante, avec une production oléicole estimée à 2 790 quintaux, à laquelle s'ajoute une production fruitière diversifiée dépassant 1 500 quintaux, hors vignes, agrumes, oliviers et figuiers.

Cette performance témoigne de la vocation agropastorale affirmée de Sebdou et de son potentiel agricole supérieur comparativement aux autres communes steppiques de la région.

#### - Potentiel productivité - superficie

À partir des données disponibles, un tableau récapitulatif a été élaboré afin de comparer la production agricole exprimée en quintaux par rapport à la superficie cultivée en hectares.

Cette approche permet de mieux évaluer le rendement moyen à l'hectare et d'identifier les disparités de productivité entre les différentes communes de la zone d'étude.

Tableau n°15 Productivité des cultures dans la zone d'étude exprimée en Qx par hectare

COMMUNES	Arb . Fruitières diverses	Céréales	Oliviers	Cultures maraichères	Fourrages artificiels
BOUIHI	736.15	2,645.00	1,793.00	36	40
SEBDOU	1,922.60	3,586.00	5,503.00	242.64	35
EI-GOR	432.67	1,271.00	1,364.00	158.82	40
Sidi Djilali	928.57	2,884.00	0.7	118.33	40
EI-ARICHA	1,692.00	3,532.00	0.56	0	40
<b>TOTAL</b>	<b>3,274.00</b>	<b>2,686.00</b>	<b>4,301.00</b>	<b>212.77</b>	<b>37.37</b>

L'analyse des rendements agricoles met en évidence que la commune de Sebdou présente un potentiel productif globalement élevé, couvrant l'ensemble des principales filières : céréaliculture, oléiculture, cultures maraichères et arbres fruitiers divers.

Cependant, la production en fourrages artificiels y demeure relativement faible, avec un rendement moyen de 35 q/ha, contre environ 40 q/ha enregistrés dans les autres communes de la zone d'étude.

Cette différence traduit une moindre orientation fourragère à Sebdou, probablement liée à la priorité donnée aux cultures à plus forte valeur économique.

### II.8.4.3 - Les systèmes d'élevage et répartition du cheptel

Dans la zone d'étude, l'activité pastorale constitue la principale composante du secteur agricole.

Le cheptel ovin, avec un effectif estimé à 182 670 têtes, représente à lui seul plus de 88 % du cheptel total recensé dans la région (Figure n° 27).

Cette prédominance des ovins traduit la vocation pastorale traditionnelle du milieu steppique, où l'élevage extensif demeure une source essentielle de revenus et un élément central de l'économie rurale locale.

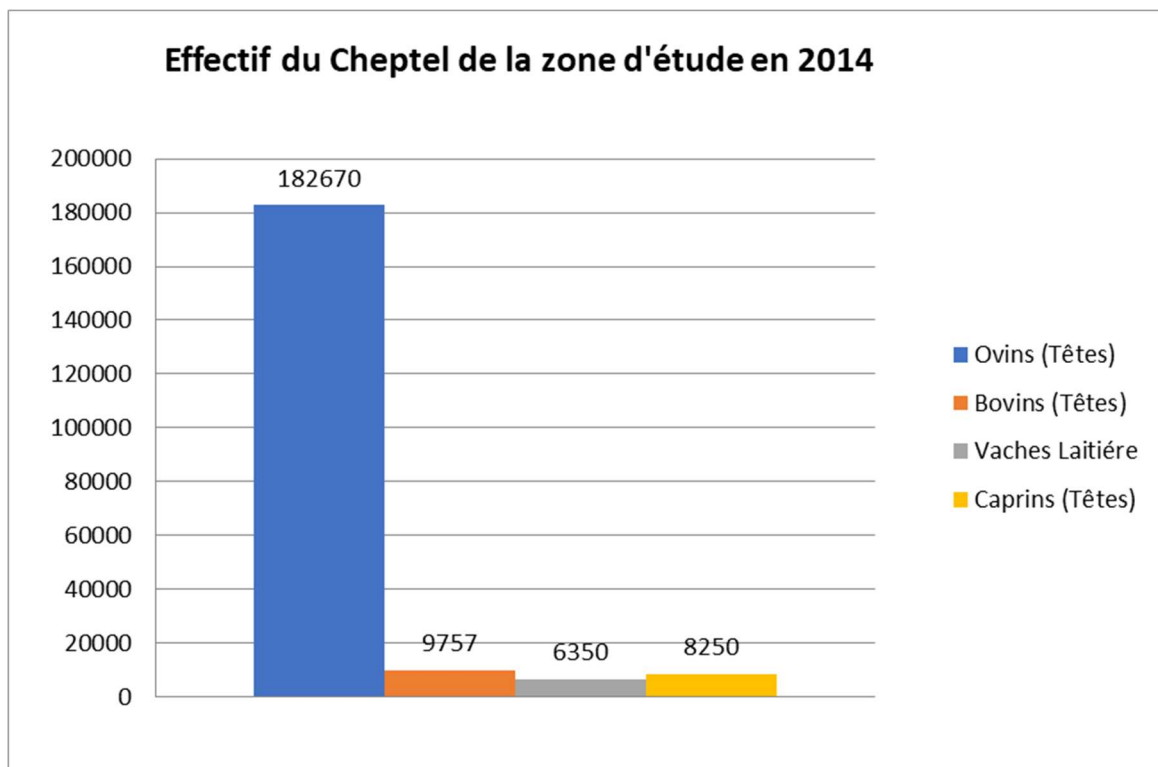


Figure n° 27 : Distribution du cheptel de la zone d'étude pour l'année 2014 (D.S.A., 2015)

L'analyse de la répartition du cheptel indique que la commune d'El Bouihi détient le plus important effectif ovin, avec près de 49,500 têtes, suivie par la commune d'El Aricha, qui compte environ 43,300 têtes.

Cette dernière se distingue toutefois par sa domination dans l'élevage caprin, occupant la première place au sein de la zone d'étude.

En ce qui concerne la production bovine, qu'elle soit laitière ou destinée à la viande, la commune d'El Gor occupe une position prépondérante avec respectivement 2 430 têtes pour la production laitière et 3 280 têtes pour la production de viande (Figure n° 28).

Sur la base des données disponibles, un histogramme d'évolution du cheptel a été élaboré afin d'illustrer les variations observées entre 2010, 2013 et 2014 à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude (Figure n° 29). Cette représentation graphique permet de visualiser les tendances générales de l'élevage et de mieux appréhender les dynamiques pastorales dans le temps.

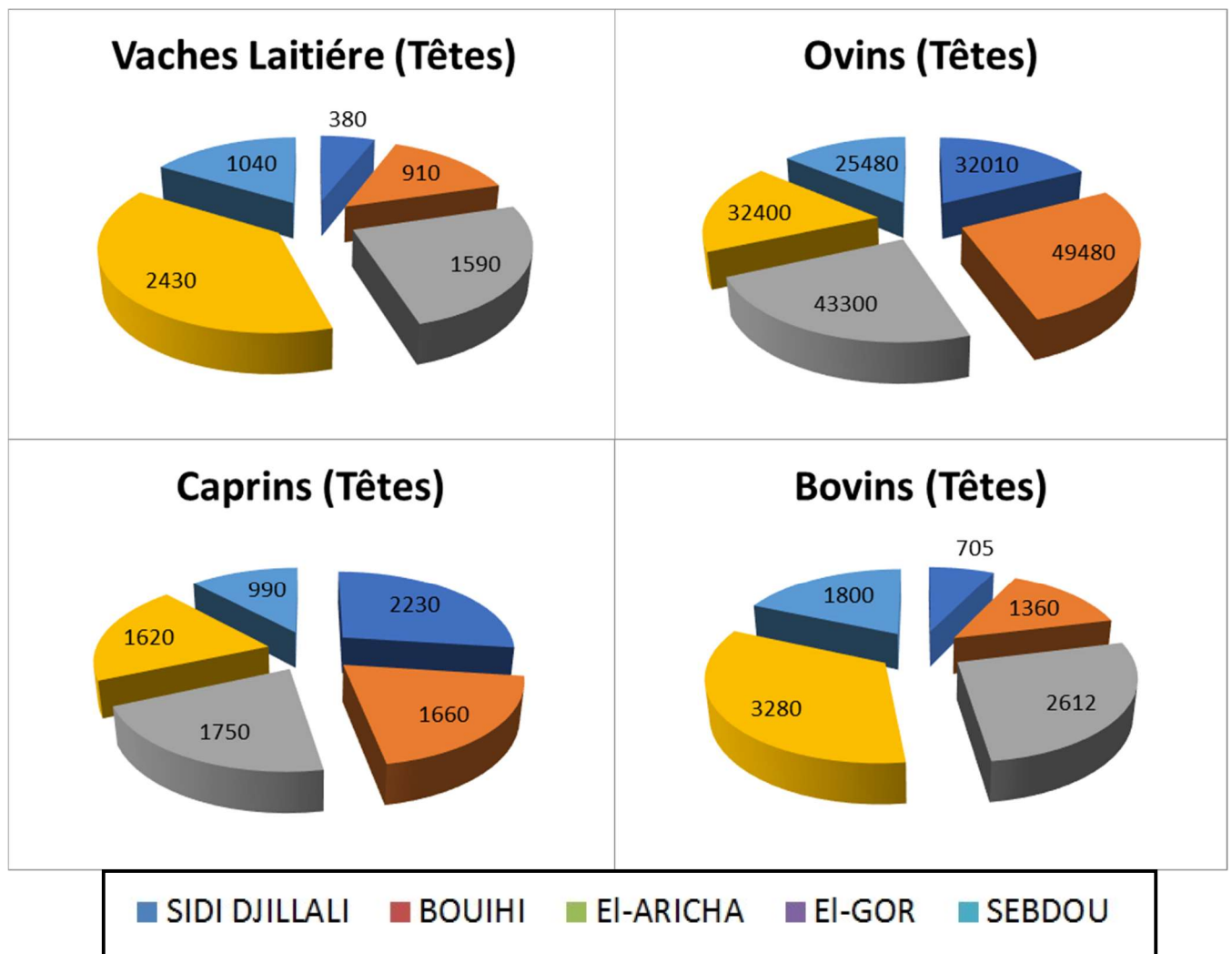


Figure n° 28 : Distribution du cheptel de chaque commune en 2014 illustrée par un camembert

L'analyse de l'évolution du cheptel met en évidence une croissance exponentielle de la production bovine au niveau des communes d'El Gor, d'El Bouihi et d'El Aricha.

Cette progression significative s'explique principalement par les mesures incitatives mises en place par l'État algérien, notamment à travers les programmes d'appui à l'élevage et l'accès facilité à des crédits bancaires agricoles, favorisant ainsi l'investissement dans le secteur bovin (ENNEBATI,2015).

Par ailleurs, une augmentation du nombre d'ovins est observée dans les communes d'El Aricha et de Sebdou, tandis que les trois autres communes enregistrent une légère régression de leurs effectifs ovins, probablement liée aux conditions climatiques défavorables et à la rareté des parcours pâturables.

Concernant l'élevage caprin, une amélioration notable est constatée dans les communes d'El Aricha, Sidi Djilali, et d'El Bouihi, témoignant d'une diversification progressive des systèmes

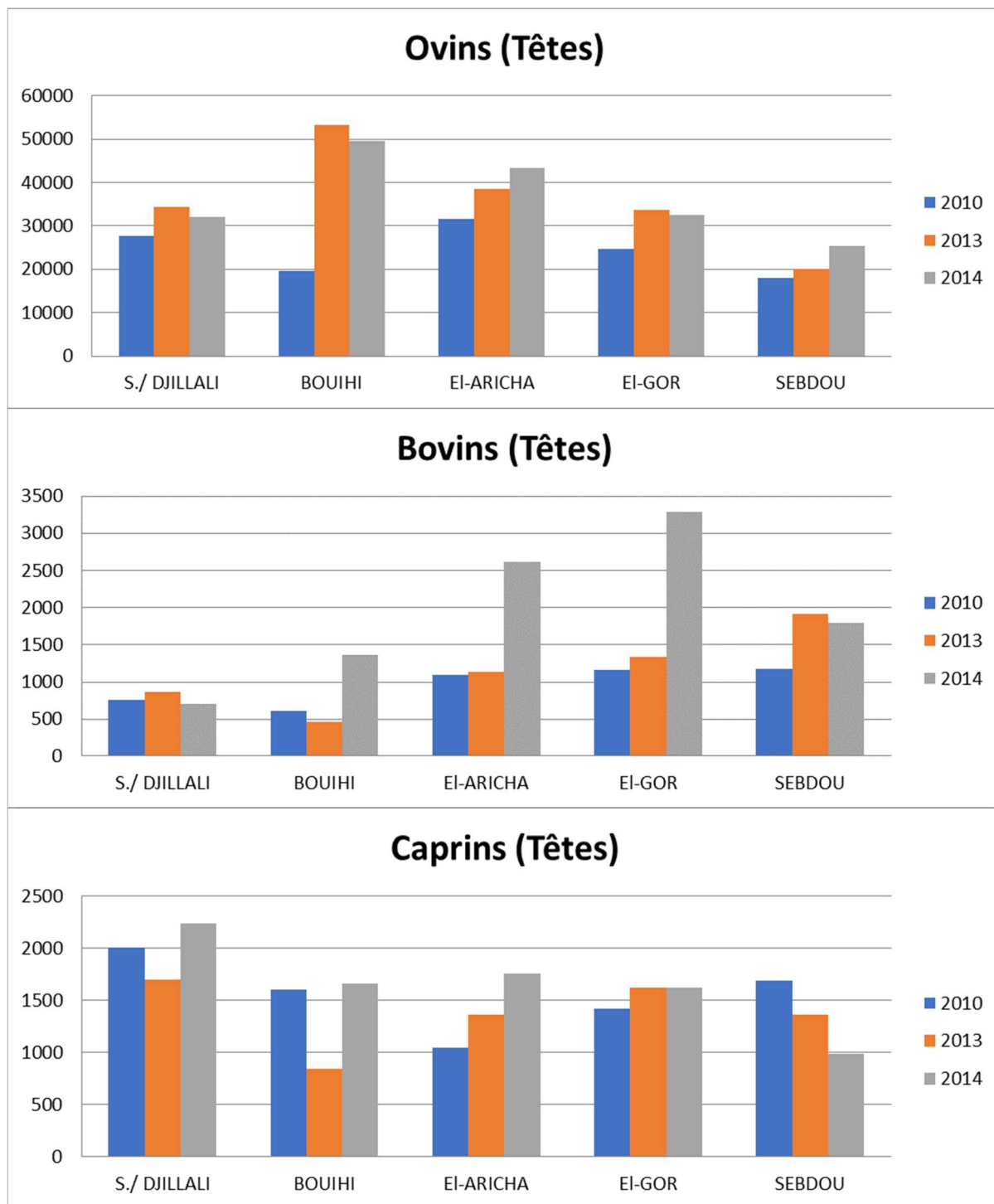


Figure n° 29 Variation annuelle des effectifs du cheptel dans la zone d'étude sous forme d'histogramme d'élevage et d'une adaptation accrue des éleveurs aux contraintes du milieu steppique.

## **Chapitre 5 : APPROCHES METHODOLOGIQUES**

### **I. La collecte des données**

#### **I.1 - Prospection sur terrain**

Une inventaire exhaustive des points d'eau comprenant les puits, sources et forages a été établie avec la collaboration de plusieurs organismes institutionnels, à savoir :

- le Service de l'Hydraulique de Seb dou ;
- la Commune de Seb dou ;
- la Circonscription des Forêts de Seb dou ;
- la Daira de Seb dou ;
- le Haut Commissariat au Développement de la Steppe (HCDS) de Seb dou ;
- la Direction des Services de l'Hydraulique de Tlemcen ;
- l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) d'Oran et de Tlemcen ;
- l'Agence de Bassin Hydrographique (ABH) d'Oran ;
- la Direction des Services Agricoles (DSA) de Tlemcen.

Des campagnes de terrain ont été effectuées entre juillet 2012 et juin 2014, dans le but de géoréférencer les points d'eau et d'évaluer leur état de fonctionnement.

t

Les points d'eau inaccessibles ont été repérés à partir de cartes d'état-major et des archives techniques relatives à leur réalisation et leur maintenance.

Les informations recueillies ont été vérifiées et validées par les organismes partenaires mentionnés ci-dessus, notamment en ce qui concerne les coordonnées GPS, le débit, la profondeur, le niveau statique, et d'autres paramètres hydrologiques pertinents.

Toutes les données collectées ont été intégrées dans un Système de Gestion de Base de Données (SGBD), ce qui a permis leur organisation, leur traitement et leur analyse au moyen d'un Système d'Information Géographique (SIG).

Il faut noter que l'ensemble des points d'eau inventoriés relève du domaine public, géré par les services étatiques.

## **I.2 - Cartes géographiques utiles**

Les travaux de terrain ont été réalisés à partir de cartes géographiques auxiliaires disponibles auprès des différents établissements publics mentionnés précédemment.

Ces documents ont permis de comparer, valider et actualiser les données recueillies sur le terrain, tout en facilitant la vérification spatiale et la mise en correspondance cartographique des points d'eau inventoriés.

## **I.3 - SIG et Télédétection**

Pour établir la carte d'occupation du sol de la zone étudiée, nous avons utilisé des images satellitaires obtenues par le capteur ETM+ du satellite Landsat 8, acquises le 3 juin 2014.

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) couvrant les cinq communes étudiées a également été utilisé pour la production des cartes thématiques relatives à la pente, à l'exposition et à d'autres paramètres géomorphologiques.

L'ensemble de ces opérations a été réalisé à l'aide de logiciels spécialisés en télédétection et analyse spatiale.

Le logiciel ArcGIS version 12.0 a constitué la plateforme principale de traitement.

Cependant, la version standard du programme ne permettant pas certaines analyses avancées, des extensions complémentaires ont été installées, notamment Arc Hydro v2.1, afin d'enrichir les fonctionnalités nécessaires aux traitements hydrologiques.

En complément, le logiciel MapInfo Professional version 11.0 a été mobilisé pour certaines opérations cartographiques spécifiques, en association avec l'extension Vertical Mapper v3.0, particulièrement utile pour la modélisation altimétrique et la visualisation tridimensionnelle des données spatiales.

## **II. Gestion des données**

La liste des points d'eau a été vérifiée et confirmée par les institutions (coordonnées GPS, débit, profondeur, niveau statique, etc.) puis intégrée dans une base de données. Chaque point d'eau

intégré dans la base de données a été enrichi par un ensemble d'informations pertinentes, telles que sa localisation, son débit, sa profondeur et d'autres caractéristiques utiles, ainsi que par des données issues de l'analyse SIG (lithologie, pente, orientation, réseau hydrographique et occupation du sol).

### **III. Analyse statistique par le K-means clustering**

Des études récentes (Ismail et al., 2024) (ENNEBATI,2025) ont été menées afin de délimiter les zones potentielles d'eau souterraine à l'aide de couches thématiques telles que la lithologie, les précipitations, l'occupation du sol, la densité de drainage, la densité de linéaments et la pente. Par ailleurs, l'utilisation de l'analyse statistique, notamment l'algorithme K-means, est essentielle pour renforcer notre recherche. En référence à Ana et al. (2018), qui soulignent que le K-means est un outil robuste pour la gestion des eaux souterraines, le clustering K-means occupe une place centrale dans notre étude.

L'objectif principal de l'algorithme de clustering K-means est de partitionner un ensemble de données non étiquetées en K clusters (groupes ou catégories), représentés par des centroïdes (Hancer et Karaboga, 2017).

Dans le cadre du présent travail de recherche, nous utilisons l'algorithme K-means clustering, qui est une méthode d'apprentissage automatique non supervisé permettant de diviser un ensemble de données en K clusters distincts et non superposés. Le cheminement de cette analyse est présenté dans la Figure n°30.

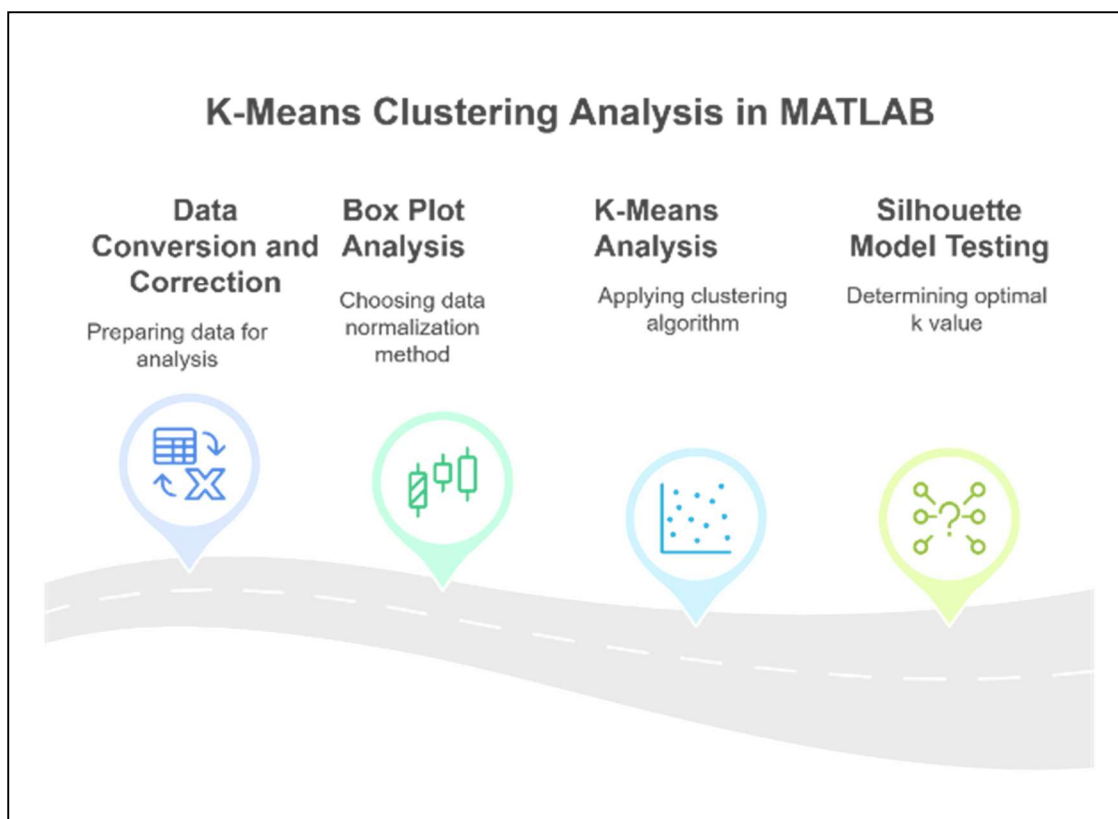


Figure n°30 : Prétraitement et évaluation du clustering K-means

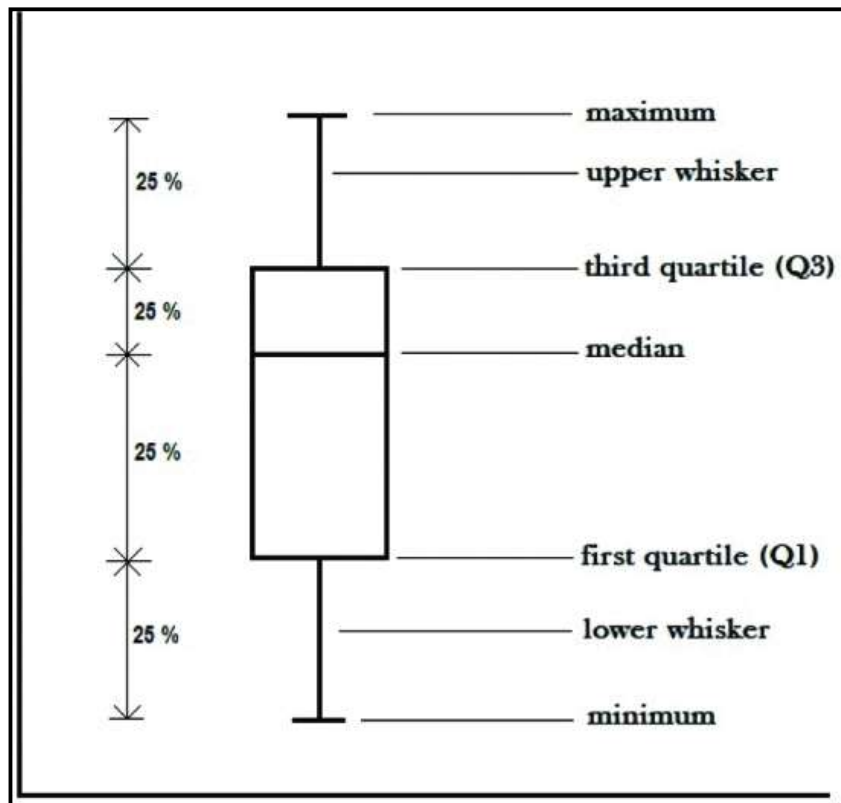
### III.1 - Conversion et correction des données

Des corrections de la base de données ont été réalisées tel que des points d'eau ont été retirés de l'étude due aux difficultés d'accès ou bien due au manque de donnée qui reste jusqu'à nos jours difficile à récupérer et en cas des points d'eau doublés pour garantir la qualité et la cohérence de l'analyse statistique.

Chaque point d'eau avec son ID (Identité unique) contient des données collectées utiles et disponible à notre étude (exemple : Nom point d'eau, Coordonnées XY, Débit) et des données extraites des cartes thématiques (exemple : Pente, Exposition, Lithologie).

### III.2 - Analyse Box Plot

Due à des valeurs aberrantes dans notre base de données, il est utile de faire un prétraitement des données en incluant la correction des anomalies ainsi que la sélection d'une stratégie de normalisation, en s'appuyant sur une analyse par diagramme de whisker (whisker plot analysis). Ce type de représentation graphique (Figure n°31) permet de visualiser la distribution des données selon le résumé en cinq chiffres : minimum, maximum, médiane, premier et troisième quartiles (Majaw & Ahmed, 2023)



**Figure n°31 : Représentation de l'analyse Whisker Plot**

L'analyse par Box Plot a ainsi permis de guider le choix entre une normalisation min-max ou une standardisation Z-score, pour les variables sensibles aux valeurs aberrantes, telles que les débits.

### **III.3 - Analyse K-means**

D'après YANG et DENG (2010), L'analyse va nous donner le nombre k conforme pour regrouper les points d'eau en classes homogènes sur la base de variables géospatiales et hydrogéologiques garantissant ainsi une bonne séparation entre les groupes et une cohérence interne élevée.

L'outil d'analyse MATLAB Online Software depuis la compagnie Match work ® reste le programme clé de cette étude.

### **III.4 - Test du model de Silhouette**

Le test de silhouette (S) a été appliqué afin de déterminer le nombre optimal de clusters (k) dans le cadre du regroupement des points d'eau à l'aide de l'algorithme K-means. Ce test évalue la qualité du partitionnement en mesurant à la fois la cohésion intra-cluster et la

séparation inter-cluster. Le score de silhouette est calculé pour chaque observation à partir de la formule :

$$s = \frac{b - a}{\max(a, b)}$$

Dans cette définition,

*a* : Désigne la distance moyenne d'un point par rapport aux autres points de son cluster.

*b* : La distance moyenne entre ce point et les points du cluster adjacent le plus proche.

Une valeur moyenne de silhouette proche de 1 indique des clusters bien définis, tandis qu'une valeur proche de 0 suggère un chevauchement important.

Ainsi, plusieurs itérations du K-means ont été réalisées pour différentes valeurs de *k*, et la valeur de *k* maximisant le score moyen de silhouette a été retenue comme nombre optimal de regroupement des points d'eau.

Afin de mieux classer, ordonner, comprendre, clarifier et simplifier le projet, la Figure n° 32 illustre le schéma en entonnoir de traitement des données des points d'eau (Water Point Data Processing Funnel). Cette représentation visuelle permet de suivre, étape par étape, le processus d'acquisition, de prétraitement, d'analyse et de classification des données, facilitant ainsi la compréhension globale de la méthodologie adoptée.

## Water Points Data Processing Funnel

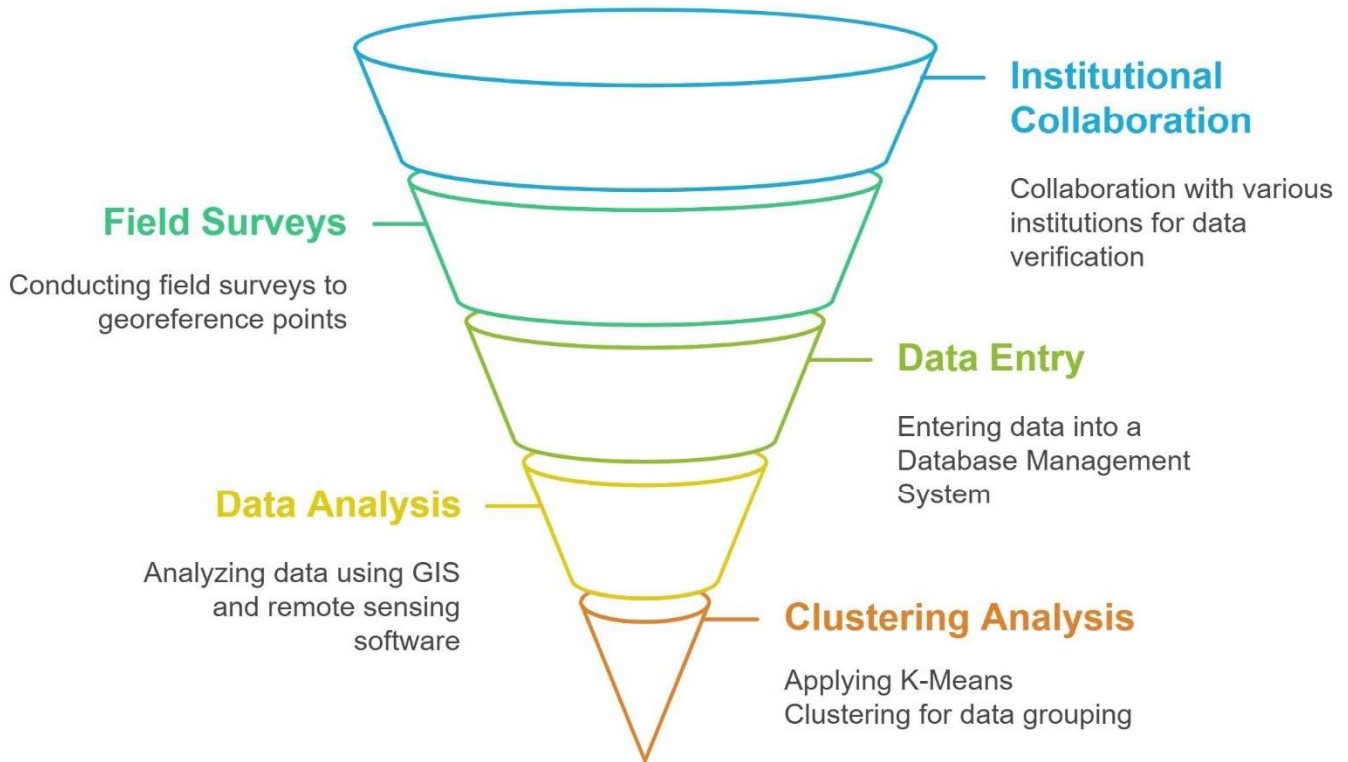


Figure n° 32 : Les approches méthodologiques poursuivies

### Chapitre 6 : RESULTATS ET DISCUSSION

Au cours des campagnes de prospection effectuées entre juillet 2012 et juin 2014, un total de 119 points d'eau comprenant des sources, puits et forages a été inventorié, localisé et validé pour l'ensemble des communes de la zone d'étude.

Avant d'aboutir au résultat final de cartographie hydrologique, plusieurs résultats intermédiaires ont été obtenus à travers l'élaboration de cartes thématiques complémentaires, permettant d'affiner l'analyse spatiale et de mieux interpréter la distribution des ressources en eau.

## I. Cartes thématiques

En se basant sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) élaboré avec ArcGIS, ces cartes thématiques ont été réalisées afin de fournir une analyse détaillée de la topographie et de la morphologie de la zone étudiée

### I.1 - Carte d'Exposition

À partir de la carte d'exposition (Figure n° 34) il a été possible d'identifier les superficies associées à chacune des orientations du terrain. Les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau n°16 Répartition des surfaces des terres selon leur exposition par rapport au degré d'insolation dans la zone d'étude**

<b>Exposition</b>	<b>Terrain plat</b>	<b>Nord</b>	<b>Est</b>	<b>Sud</b>	<b>Ouest</b>
<b>Surface Ha</b>	1500	81681	76490	84589	82450
<b>Taux de recouvrement</b>	0.46%	25.00%	23.41%	25.89%	25.24%

L'analyse des résultats révèle que les surfaces correspondant aux différentes expositions présentent une répartition relativement équilibrée, avec des valeurs comprises entre 76 490 ha et 84 589 ha.

En revanche, les terrains plats occupent une superficie très limitée, représentant à peine 0,46% de la surface totale.

La Dayet El Ferd constitue la principale zone plane, avec une étendue d'environ 729 ha, tandis que le reste des terrains plats, estimé à 771 ha, est dispersé de manière irrégulière à travers la zone d'étude, principalement dans la commune d'El Aricha.

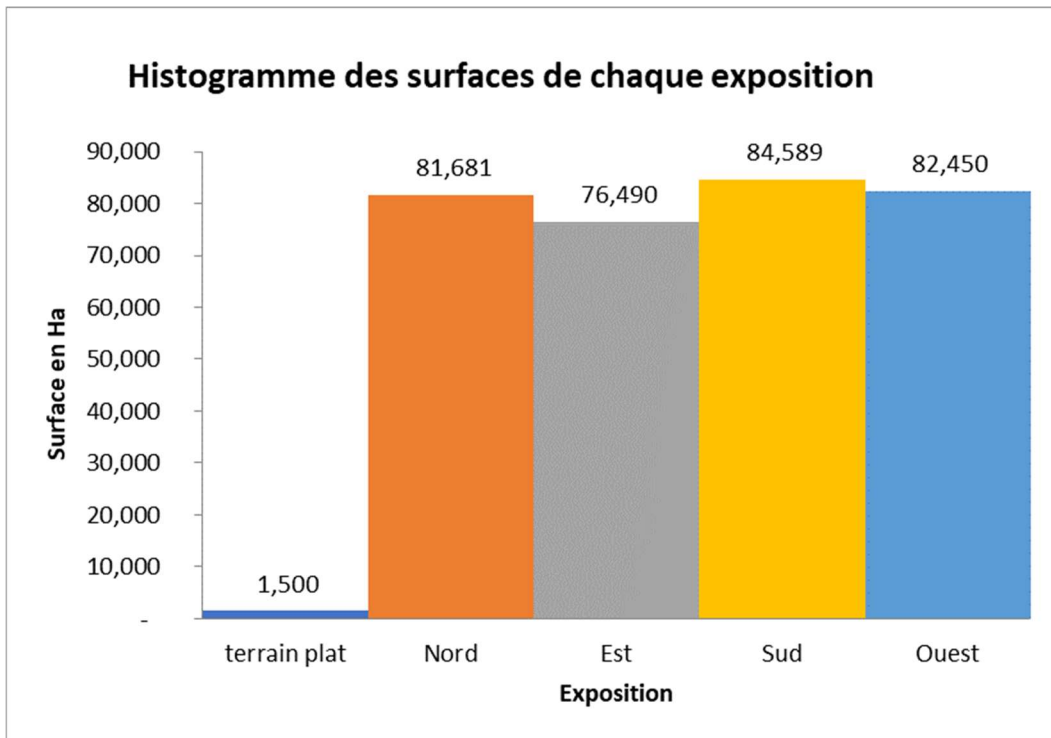


Figure n° 33 : Histogramme illustrant la distribution des surfaces selon l'exposition du relief

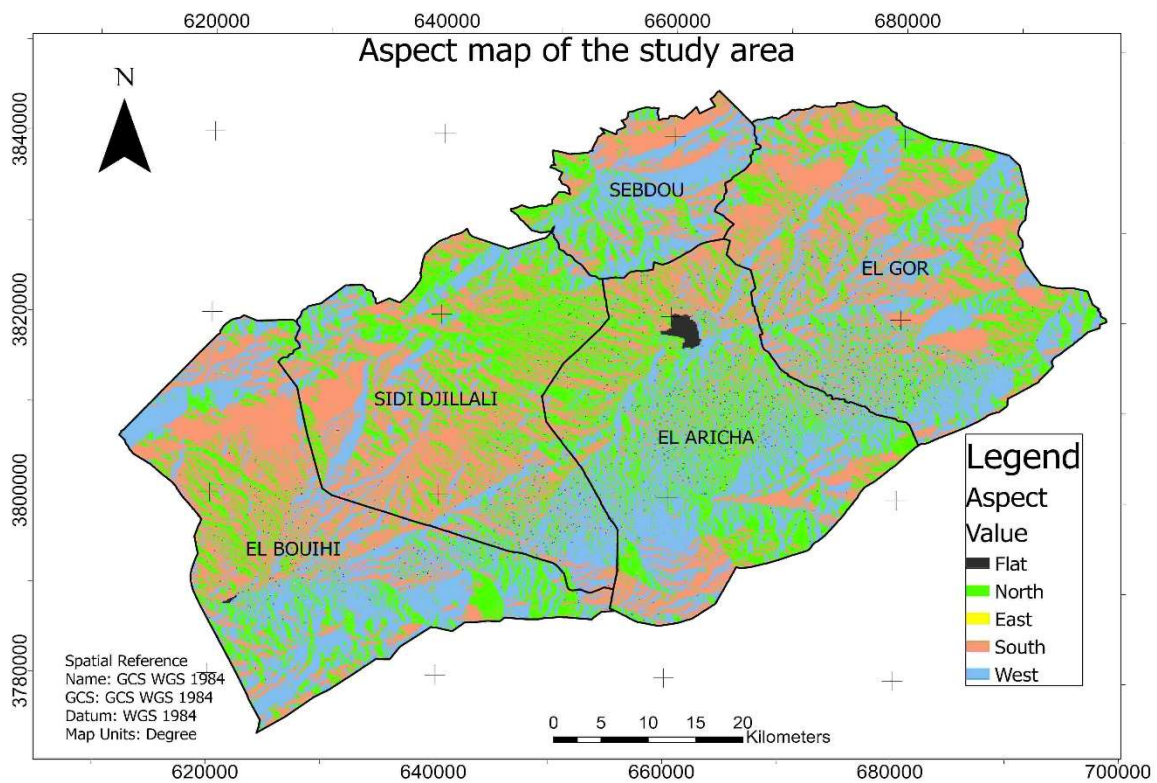


Figure n° 34 : Carte représentant la répartition des expositions par rapport au degré d'insolation au sein de la zone d'étude

## I.2 - Carte Hypsométrique

A partir de la carte hypsométrique (Figure n° 36), il apparaît que la zone d'étude présente des altitudes comprises entre 834 mètres et 1 829 mètres.

Cet intervalle d'élévation a été subdivisé en neuf classes altitudinales afin de faciliter l'analyse morphologique du relief.

La superficie correspondant à chaque classe a été calculée et consignée dans le tableau suivant.

Tableau n°17 : Distribution des superficies selon les classes d'altitude de la zone d'étude

<b>Altitude m</b>	<b>Surface Ha</b>	<b>Taux de recouvrement (%)</b>
<b>[840-1200]</b>	234,283	72
<b>[1200-1500]</b>	85,978	26
<b>[1500 - 1850]</b>	6,415	2

L'analyse de la carte hypsométrique montre que la classe d'altitude comprise entre 1 100 et 1 200 mètres représente plus de la moitié de la surface totale de la zone d'étude, avec un taux de recouvrement de 56 %, soit environ 185 000 hectares.

La seconde classe, comprise entre 1 200 et 1 300 mètres, couvre 18,47 % de la superficie totale, tandis que la classe située entre 1 000 et 1 100 mètres occupe 12,71 %.

Ainsi, l'ensemble de ces trois classes altitudinales, s'étendant de 1 000 à 1 300 mètres, regroupe une superficie de 287 267,61 hectares, soit près de 88 % de la surface totale de la zone d'étude. Cette concentration traduit la dominance des reliefs moyens, caractéristiques des paysages steppiques du sud de la wilaya de Tlemcen, où les formes d'érosion et les zones de transition entre plaines et reliefs accidentés sont les plus développées.

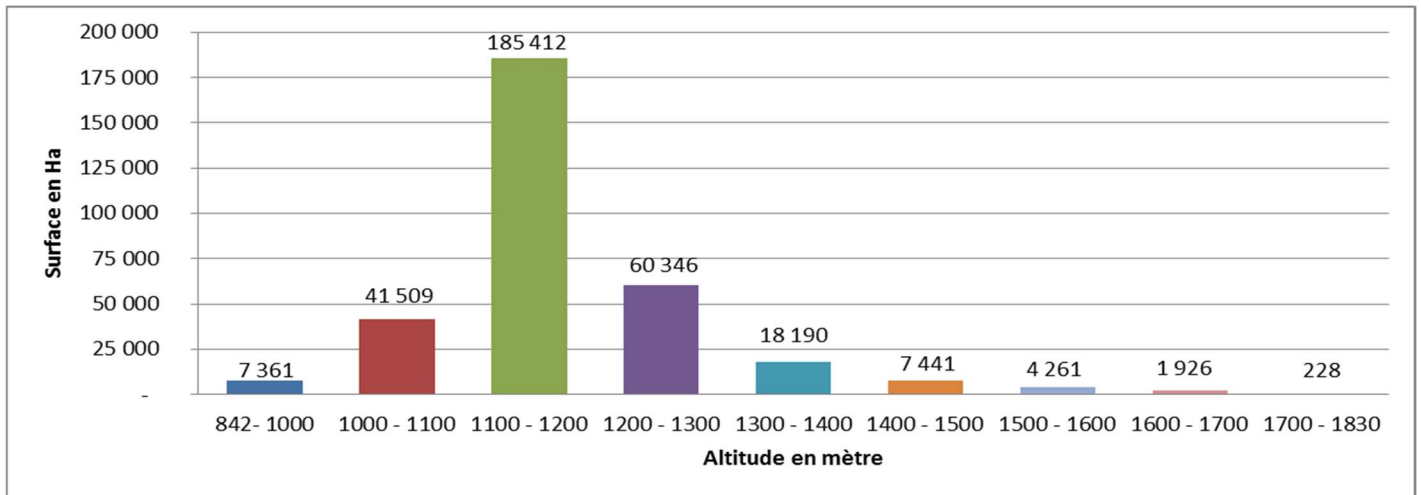


Figure n° 35 Répartition des surfaces selon les classes d'altitude de la zone d'étude

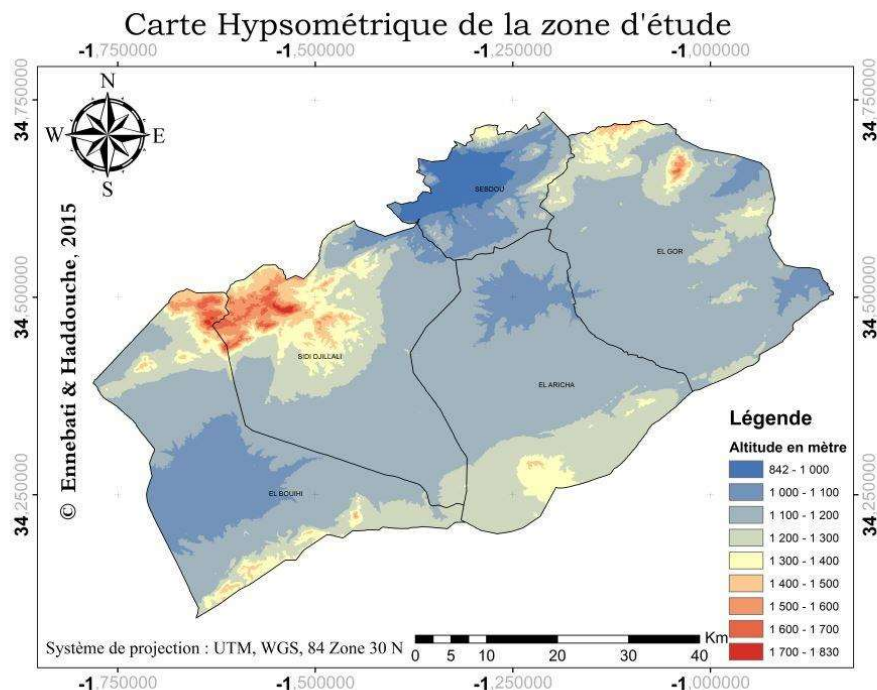


Figure n° 36 : Carte représentant la répartition altitudinale (hypsométrique) de la zone d'étude.

### I.3 - Carte des pentes

a été établie à partir du Modèle Numérique de Terrain et classée en cinq catégories selon le degré d'inclinaison.

La dernière classe, correspondant aux pentes supérieures à 40 %, représente des zones fortement accidentées, généralement impropres aux activités agricoles en raison de leur forte sensibilité à l'érosion et de leur difficulté d'exploitation.

**Tableau n°18 : Distribution des superficies selon les classes de pente dans la zone d'étude**

**Pente Surface Ha Taux de recouvrement**

Pente	Surface (Ha)	Taux de recouvrement
0 - 5 %	208767	63,90%
5 - 10 %	53214	16,29%
10-15%	19829	6,07%
15 - 20 %	12866	3,94%
20 - 25 %	9376	2,87%
25 - 30 %	6769	2,07%
30 - 40 %	8394	2,57%
plus de 40 %	7504	2,30%

L'analyse de la carte des pentes met en évidence la prépondérance des terrains faiblement inclinés, avec une classe de pente inférieure à 5 % occupant une superficie de 208 767 hectares, soit 63,90 % de la zone d'étude.

La classe suivante, correspondant aux pentes comprises entre 5 et 10 %, couvre environ 53 214 hectares, représentant 16,29 % de la surface totale.

À l'opposé, les terrains à forte pente, supérieurs à 40 %, se limitent à une superficie réduite de 7 500 hectares, soit à peine 2,30 % de l'ensemble.

Ainsi, les zones présentant une pente inférieure à 40 % totalisent près de 319 215 hectares, ce qui correspond à 97,70 % de la superficie totale.

Cette répartition confirme la dominance des reliefs peu accidentés, favorables aux activités agricoles et à la mise en valeur pastorale dans la région.

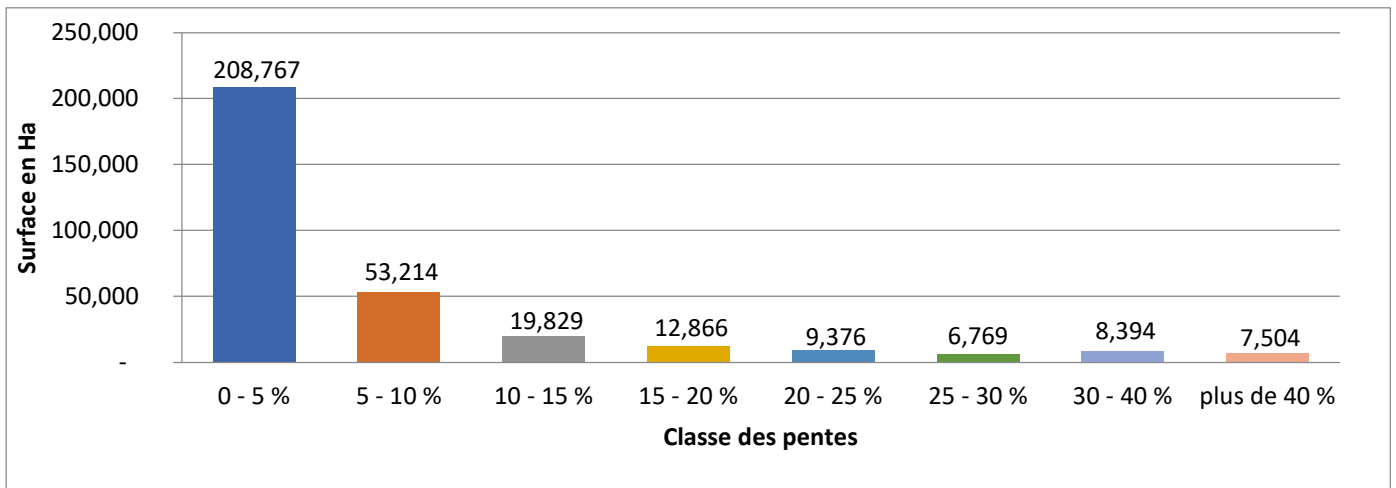


Figure n° 37 : Répartition des surfaces selon les classes de pente dans la zone d'étude

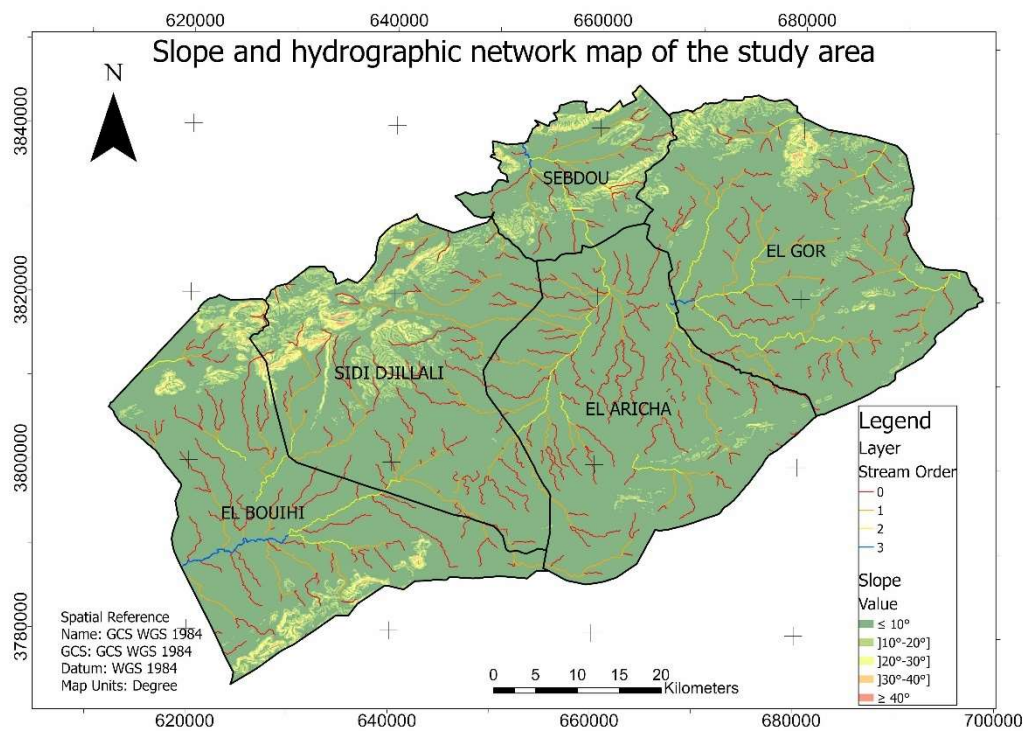


Figure n° 38 Carte représentant la répartition des classes de pente dans la zone d'étude

#### I.4 - Carte Lithologique

La carte lithologique (Figure n° 40) met en évidence six types de formations lithologiques distinctes

Tableau n°19 : Distribution des superficies selon les différentes couches lithologiques de la zone d'étude

### Surface Ha et taux de recouvrement

Type de surface	Surface (Ha)	Taux de recouvrement
<b>Croûtes calcaires</b>	178 577,47	54,67%
<b>Calcaires et dolomies dures</b>	110 321,62	33,77%
<b>Alluvions et sables</b>	31 276,73	9,57%
<b>Marnes</b>	4 758,41	1,46%
<b>Argiles</b>	1 087,47	0,33%
<b>Calcaires friables</b>	652,94	0,20%

L'analyse de la carte lithologique met en évidence la forte prédominance des croûtes calcaires, qui couvrent une superficie de 178 577 hectares, soit 54,67 % de la surface totale des cinq communes, représentant ainsi plus de la moitié du territoire étudié.

Elles sont suivies par les calcaires et dolomies dures, qui s'étendent sur 110 321 hectares, correspondant à 33,77 % de la surface globale.

Les formations argileuses ainsi que les calcaires friables ne sont observés que dans la commune d'El Gor, où ils représentent respectivement 0,33 % et 0,20 % de la superficie totale. Par ailleurs, les marnes apparaissent sous forme de bandes discontinues dans les communes d'El Gor, de Sidi Djilali et d'El Aricha, pour une superficie totale estimée à environ 4 758 hectares.

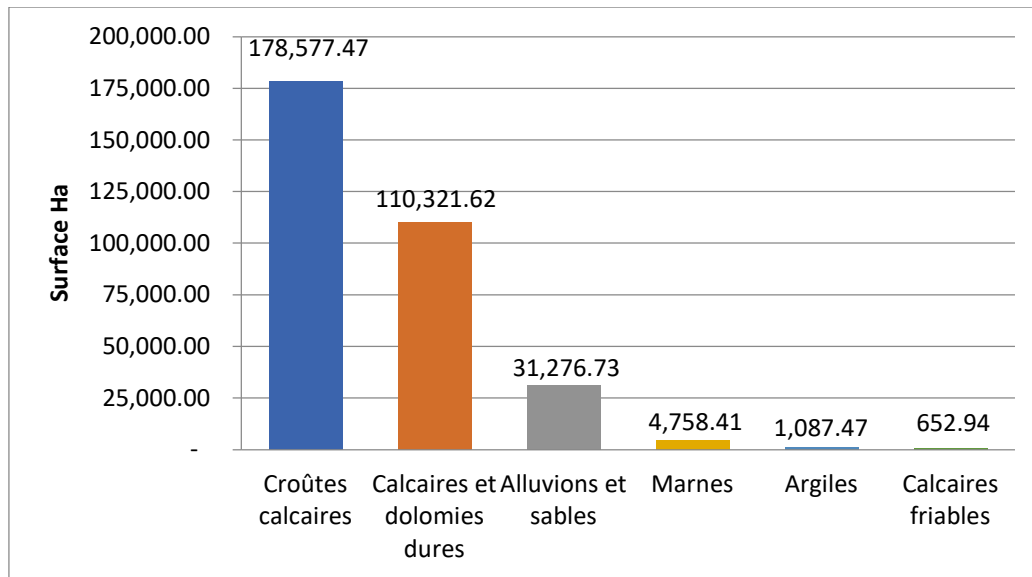


Figure n° 39 : Répartition des surfaces selon les différentes couches lithologiques de la zone d'étude

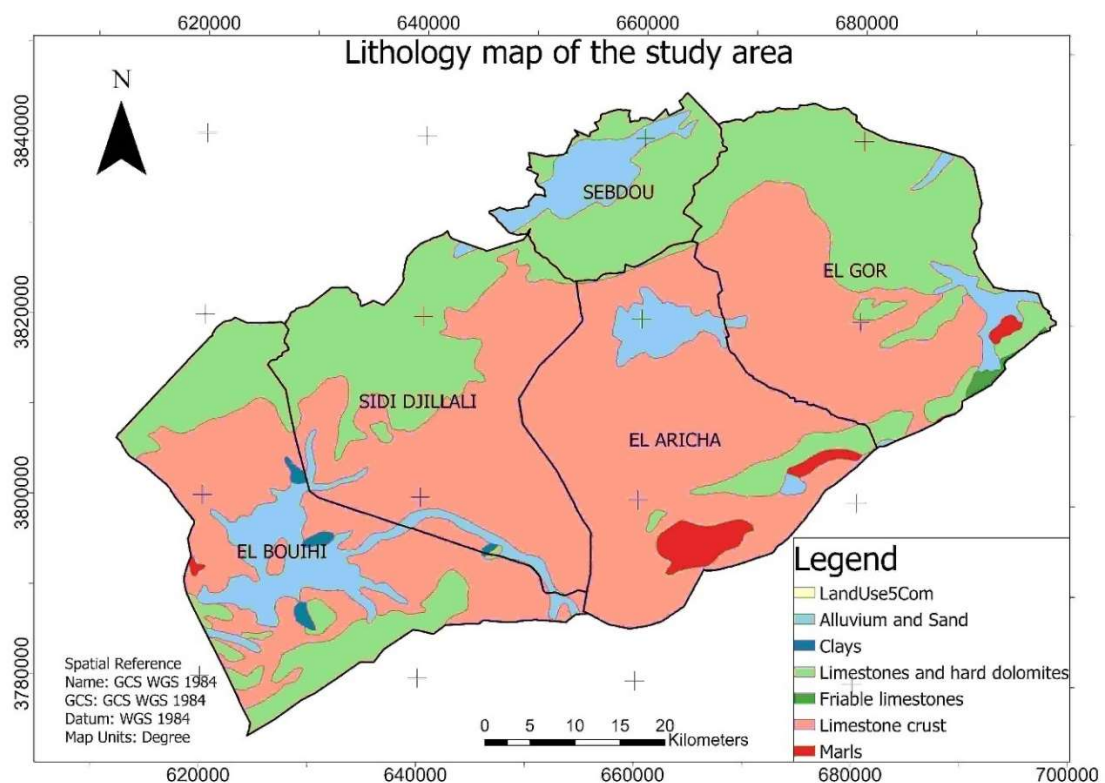


Figure n° 40 : Carte représentant la répartition des différentes formations lithologiques dans la zone d'étude

### I.5 - Carte d'occupation du sol

Pour réaliser la carte d'occupation du sol de la zone d'étude, des images satellitaires acquises le 12 mai 2014 par le capteur ETM+ du satellite Landsat 8 ont été exploitées.

Cette dernière présente une vocation principalement pastorale et agro-pastorale.

Les parcours naturels représentent la catégorie dominante, avec une superficie estimée à 186 017 hectares, soit près de 57 % de la surface totale, localisés majoritairement dans la partie sud de la zone.

Les sols nus représentent également une part notable du territoire, avec environ 76 090 hectares répartis principalement dans les communes de Sidi Djilali, El Aricha et El Bouihi. Les formations forestières se concentrent surtout dans la zone nord, où elles s'étendent sur 15 874 hectares, soit 4,9 % de la superficie totale. Les maquis couvrent eux aussi une surface considérable, localisés en grande partie dans le secteur nord de la zone d'étude.

Les espaces urbains demeurent très restreints, avec une superficie de seulement 741 hectares, représentant 0,24 % de la surface totale.

Enfin, les terrains de culture restent quasi insignifiants, ne dépassant pas 650 hectares, confirmant le caractère extensif de l'utilisation du sol et la prépondérance des activités pastorales sur l'agriculture. (Tab.20 & Fig. 39 & 40).

**Tableau n°20 : Distribution des superficies selon les différents types d'occupation du sol de la zone d'étude**

<b>Type d'occupation</b>		
<b>Type d'occupation</b>	<b>Surface en Ha</b>	<b>Taux de recouvrement</b>
<b>Parcours</b>	186 017,69	56,94%
<b>Sol nu</b>	76 090,58	23,29%
<b>Maquis</b>	46 800,69	14,33%
<b>Forêts</b>	15 874,47	4,86%
<b>Urbain</b>	741,02	0,23%
<b>Cultures</b>	645,71	0,20%
<b>Eau</b>	519,35	0,16%

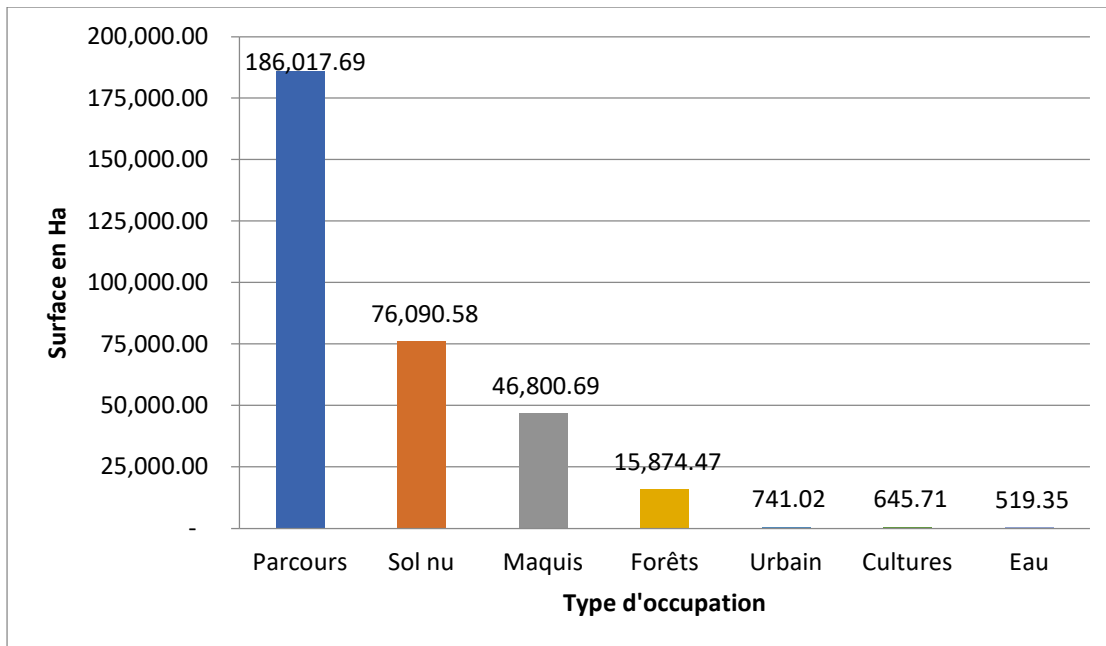


Figure n° 41 : Répartition des surfaces de chaque type d'occupation du sol.

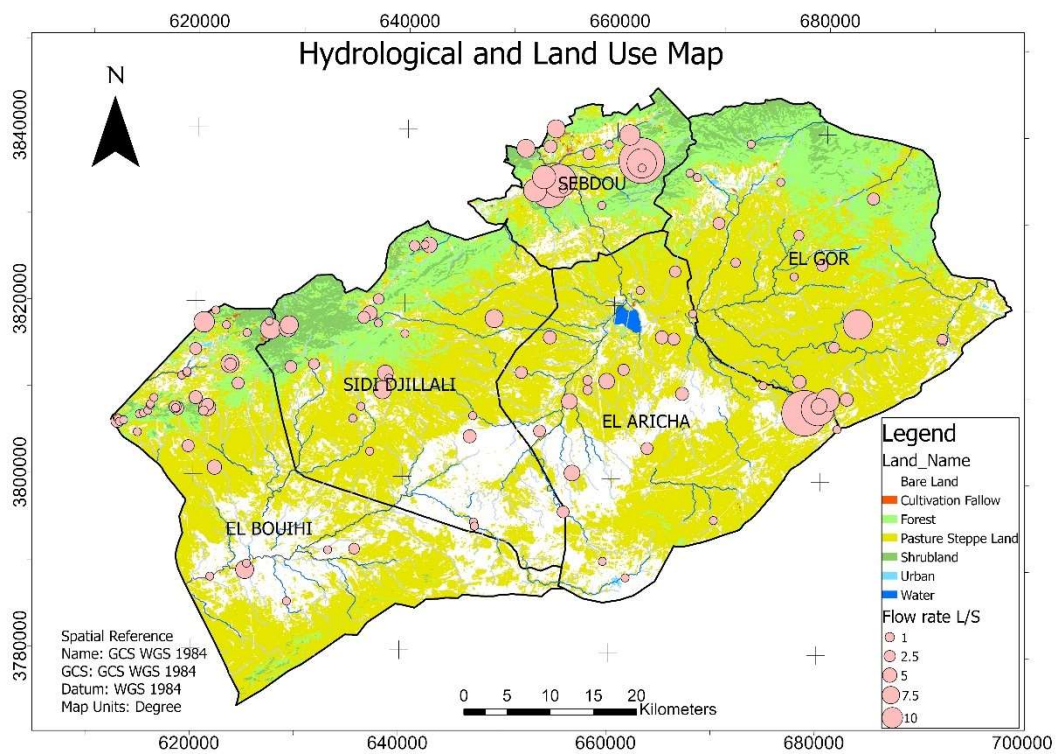


Figure n° 42 : Carte d'occupation de la zone d'étude

## II. Synthèse de la base de données

Un total de 119 points d'eau a été recensé dans la zone d'étude. Leur gestion est assurée par plusieurs organismes, notamment le HCDS, l'APC, l'ADE, la DSA ainsi que la Direction des Forêts. Le tableau ci-après présente la répartition de ces points d'eau selon chaque commune.

Tableau n°21 : Inventaire des points d'eau dans les communes steppiques de la wilaya de Tlemcen

<b>La commune</b>	<b>Forages</b>	<b>Sources</b>	<b>Puits</b>	<b>Total</b>
<b>Aricha</b>	12	0	7	19
<b>El Bouihi</b>	28	2	7	37
<b>El-Gor</b>	7	0	7	14
<b>Sebdou</b>	13	5	2	20
<b>Sidi Djilali</b>	18	0	11	29
<b>Total</b>	78	7	34	119

Le tableau n°21 et le graphique de la figure n°44 mettent en évidence la répartition des différents types de points d'eau (forages, puits et sources) dans cinq communes steppiques : Sebdou, Aricha, Sidi Djillali, El-Gor et El Bouihi.

On remarque une disparité importante entre les communes :

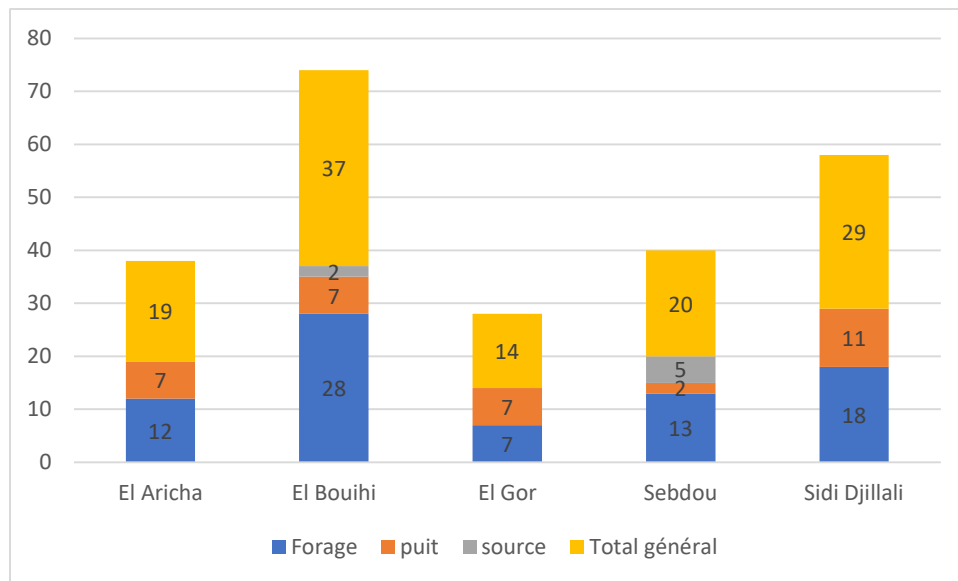
El Bouihi se distingue nettement avec le nombre total le plus élevé de points d'eau (37), dont une majorité de forages (28). Cela traduit une exploitation intensive des nappes souterraines, probablement en raison d'une faible disponibilité en eaux de surface.

Sidi Djillali arrive en seconde position avec 29 points d'eau, dominés également par les forages (18) et les puits (11).

Sebdou et El Aricha présentent des valeurs intermédiaires, respectivement 20 et 19 points d'eau, montrant un équilibre relatif entre les forages et les puits.

Enfin, El-Gor enregistre le plus faible total (14 points d'eau), ce qui pourrait indiquer une moindre densité de population ou une ressource en eau moins développée.

Sur l'ensemble des communes, les forages représentent la part la plus importante avec 78 unités, suivis par les puits (34) et enfin les sources (7), souvent rares dans les zones steppiques à climat aride.



**Figure 43 : Répartition du nombre de points d'eau (forages, puits et sources) dans les communes steppiques de la wilaya de Tlemcen**

L'analyse de l'histogramme de la Figure n° 44 : Débits total et moyen de la zone d'étude met en évidence une forte disparité des débits d'eau entre les communes steppiques de la wilaya de Tlemcen.

La commune de Seb dou se distingue nettement avec un débit total de 244,9 L/s et un débit moyen de 11,66 L/s, ce qui en fait la zone la plus productive en ressources hydriques. Cette situation s'explique principalement par sa position géographique en amont, favorisant la recharge des nappes et une meilleure accessibilité à l'eau souterraine.

À l'inverse, la commune d'El-Gor enregistre les valeurs les plus faibles, avec un débit total de 69 L/s et une moyenne de 3,63 L/s, traduisant des conditions hydrogéologiques plus défavorables.

Les autres communes présentent des valeurs intermédiaires, notamment Sidi Djilali (138 L/s, 6,00 L/s en moyenne) et El-Bouihi (117,5 L/s, 4,70 L/s en moyenne), qui témoignent d'un potentiel hydrique modéré.

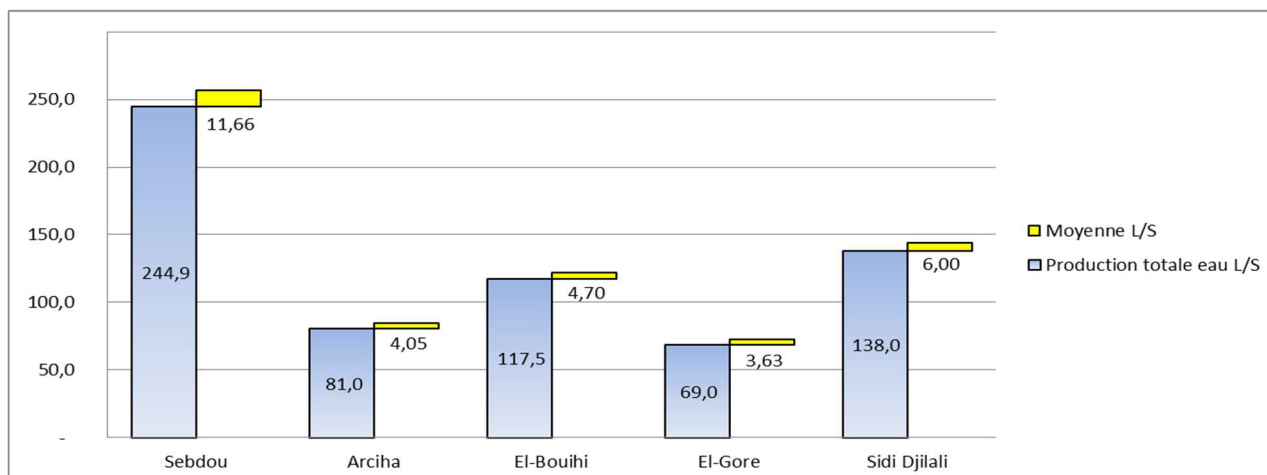


Figure n° 44 : Débits total et moyen de la zone d'étude

### III. Classification des points d'eau

L'analyse de silhouette a confirmé que  $K = 6$  représente le nombre optimal «  $k$  » de clusters pour la caractérisation du potentiel hydro-agricole dans la région d'étude de la steppe de l'Ouest algérien (Figure n° 45)

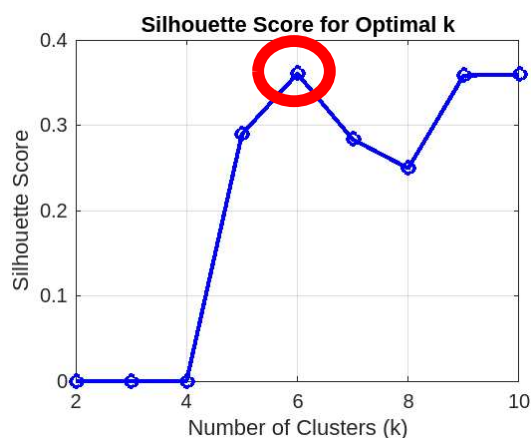


Figure n° 45 : Les valeur du test silhouette pour k optimal

La classification réalisée permet de distinguer de manière pertinente les différentes unités hydrogéologiques de la zone d'étude, en tenant compte simultanément du débit, de la lithologie, de la pente, de l'exposition et de l'occupation du sol.

Cette approche intégrée offre une lecture claire du comportement des nappes et des conditions physiques influençant leur productivité, fournissant ainsi une base fiable pour une gestion raisonnée et durable des ressources en eau.

Tableau n°22 : Parametre des valeur k (k=6)

Cluster	Débit	Lithologie	Pente	Exposition	Occupation du sol	Interprétation révisée
1	Faible	Croûte calcaire	<10°	Sud	Nu / Pâturage	Très faible – mauvaise exposition + croûte imperméable
2	Faible	Mixte	<10°	Sud / Sud-Est	Nu / Pâturage	Faible
3	Modéré à élevé	Calcaire dur	20–40°	Nord-Est / Est	Maquis / Forêt	Bon – exposition optimale + fractures favorisant l’infiltration
4	Élevé	Calcaire dur / Alluvions	10–20°	Diverses	Nu / Forêt	Excellent – en particulier pour les versants Nord / Est
5	Modéré	Calcaire dur	10–20°	Sud-Est / Nord-Est / Est	Pâturage / Maquis	Très bon – expositions favorables + zones de recharge
6	Nul	Calcaire dur	<10°	Nord	Nu / Pâturage	Paradoxe – bonne exposition mais absence de débit mesuré

L’analyse du Tableau n°22 met en évidence six classes distinctes (clusters), traduisant une variabilité spatiale marquée des potentialités hydrogéologiques :

- Le Cluster 1 correspond aux conditions les moins favorables, caractérisées par des croûtes calcaires imperméables, de faibles pentes et une exposition sud défavorable à l’infiltration. Ces zones présentent un débit quasi nul, limitant leur intérêt hydrogéologique
- Le Cluster 2, bien que légèrement meilleur, reste peu productif. La lithologie y est mixte et les conditions topographiques modestes n’encouragent qu’une infiltration partielle.
- Les Clusters 3 et 4 regroupent les secteurs les plus performants. La présence de calcaires durs fracturés, associée à des pentes modérées à fortes et à des expositions nord-est, favorise l’infiltration et la recharge des nappes. Ces unités, souvent couvertes de maquis ou de forêts, présentent les débits les plus élevés de la zone d’étude.

- Le Cluster 5 révèle un potentiel modéré à bon, combinant une exposition favorable (sud-est à nord-est) et une occupation du sol propice à l'infiltration, notamment les pâturages et les zones de maquis.
- Enfin, le Cluster 6 présente une anomalie apparente : malgré une exposition favorable et une topographie douce, aucun débit n'a été mesuré. Cette absence d'écoulement s'explique probablement par la présence de barrières géologiques souterraines ou de structures peu perméables, empêchant la circulation de l'eau.

Dans l'ensemble, cette classification hiérarchise efficacement les potentialités hydrogéologiques des cinq communes steppiques et souligne l'importance d'une approche multidimensionnelle intégrant les données de surface et de subsurface pour une planification hydro-agricole optimale.

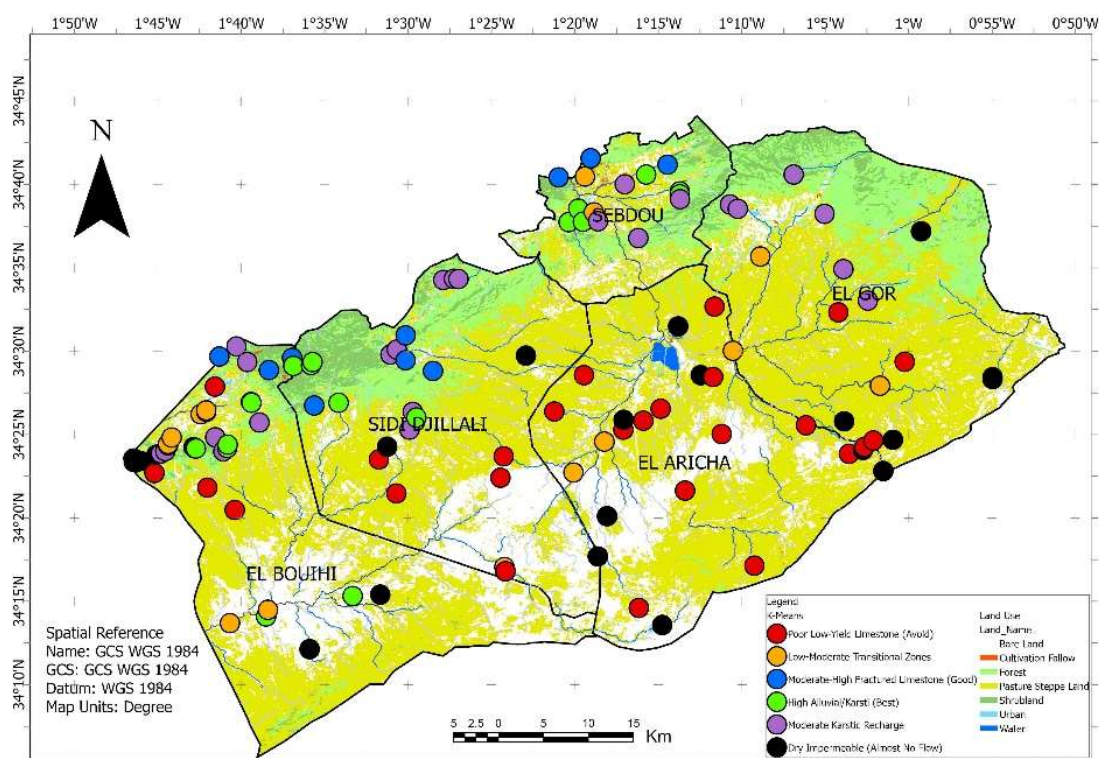


Figure n°46 : Carte de classification des points d'eau (k=6)

La Figure n°46 illustre la distribution spatiale des points d'eau regroupés par clusters et leur classification en fonction du potentiel hydrogéologique et agricole. Cette représentation

cartographique permet de visualiser la structure spatiale du milieu et la différenciation régionale issue de l'analyse de clustering.

L'organisation spatiale des clusters révèle trois grandes zones de potentiel hydro-agricole :

- Les clusters 1 et 6, situés principalement au sud, traduisent un potentiel faible à nul en raison de la présence de croûtes calcaires imperméables et d'un climat aride, ne permettant qu'un usage limité à l'agriculture pluviale ou au pâturage extensif.
- Les clusters 3 et 4, localisés au nord, présentent un potentiel élevé à très élevé, favorisé par la présence de calcaires fracturés et de dépôts alluviaux qui améliorent la recharge et la productivité hydrique. Ces secteurs offrent des conditions propices à la mise en valeur agricole irriguée et aux cultures à forte rentabilité.
- Les clusters 2 et 5, à potentiel intermédiaire, nécessitent une vérification complémentaire sur terrain avant toute exploitation intensive. Ils couvrent aussi des zones majoritairement nordiques, où la gestion de l'eau devra être planifiée avec précaution.

La carte montre également une répartition relativement homogène des forages et puits, tandis que les sources naturelles se concentrent surtout à Sebdou (cinq sources) et El-Bouihi (deux sources).

Le réseau hydrographique, organisé en trois ensembles principaux, reflète la structure du drainage régional :

- Le premier alimente la commune de Sebdou,
- Le second relie El-Gor, Sidi Djilali et El-Aricha vers la Dayet El-Ferd,
- Et le troisième, issu de Sidi Djilali et El-Bouihi, s'oriente vers le sud-ouest.

L'analyse croisée avec la carte d'occupation du sol montre que la majorité des points d'eau sont situés sur des parcours steppiques et des zones agricoles, indiquant un fort lien entre occupation du sol et disponibilité hydrique.

Pour une interprétation plus claire, les six clusters initiaux ont été regroupés en trois zones distinctes selon leur niveau de disponibilité en eau souterraine (Figure n°47)

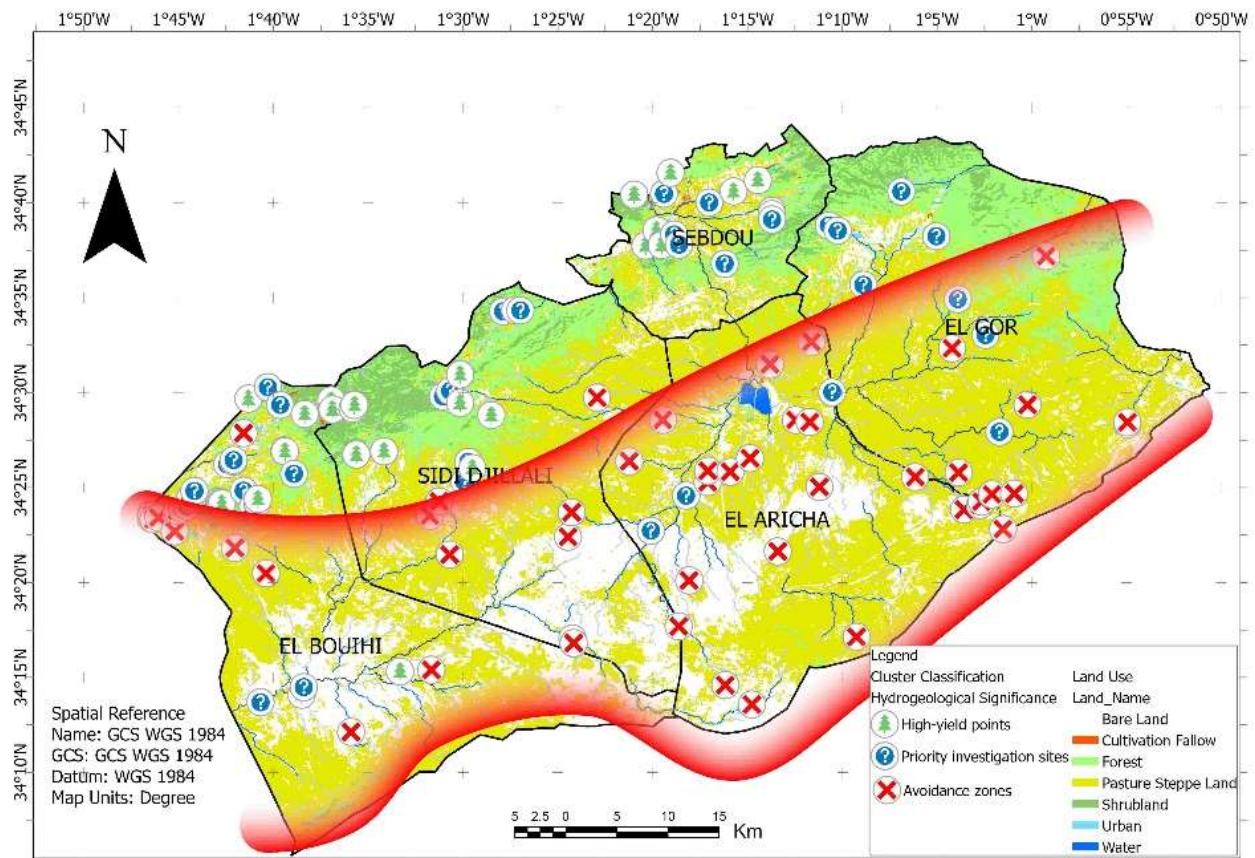


Figure n°47 : Carte d'aptitude hydro-agricole basée sur le clustering K-means

L'analyse de l'aptitude hydro-agricole révèle une différenciation spatiale marquée au sein de la zone d'étude. Celle-ci est nettement segmentée entre une zone nord et une zone sud, cette dernière étant principalement caractérisée par un potentiel agricole limité. Cette répartition se manifeste par une concentration de zones à très faible potentiel, formant une bande continue dans le sud du territoire étudié. Ce regroupement spatial, représenté en rouge sur la carte, correspond étroitement aux conditions arides de la steppe et reflète vraisemblablement des contraintes en matière de qualité des sols et de disponibilité en eau souterraine.

L'un des résultats les plus significatifs de ce clustering concerne la commune de Sebdo, qui se distingue nettement en étant totalement en dehors de la "ceinture rouge". Elle constitue une

zone à fort potentiel hydro-agricole, et abrite en particulier le point d'eau de Demmam, identifié comme la source la plus productive de l'ensemble du jeu de données. Cette combinaison de facteurs favorables positionne Sebdou comme la commune la plus prometteuse en matière de planification agricole et de répartition des ressources à l'échelle régionale.

À l'inverse, la commune d'El Aricha, bien que représentant la plus grande superficie de la zone d'étude, ne présente aucune source à haut débit en eau souterraine. L'absence de points d'eau majeurs pourrait s'expliquer par des contraintes hydrogéologiques profondes ou par un déficit d'investissement dans le développement des infrastructures hydriques.

La répartition spatiale des classes d'aptitude (potentiels) met en évidence la pertinence de l'algorithme K-means, qui offre une lecture précieuse des interactions entre les facteurs environnementaux et les infrastructures dans la détermination du potentiel agricole. Ces résultats soulignent la nécessité d'interventions ciblées, notamment dans la partie sud du territoire, afin d'améliorer l'accès à l'eau ou d'adapter l'occupation des sols aux réalités environnementales.

Enfin, l'étude confirme l'intérêt de combiner les outils SIG et les méthodes d'analyse statistique telles que le clustering K-means pour le zonage des écosystèmes complexes et sensibles au climat, comme celui de la steppe sud de Tlemcen. Ce travail propose un cadre robuste pour orienter les investissements en faveur du développement durable, en soulignant le rôle crucial d'une gestion efficace des ressources en eau dans une stratégie équilibrée d'aménagement du territoire.

### **Comparaison avec des études similaires**

Les résultats obtenus dans cette recherche concordent avec ceux de MARIN et al. (2018), publiés dans la revue Water (MDPI), où l'algorithme K-means, combiné à une Analyse en Composantes Principales (ACP), a permis de classer 582 puits selon 28 variables hydro-géochimiques. Leur étude a démontré que la réduction de dimension par ACP améliore la compacité et la séparation des clusters (indice de silhouette passant de 0,13 à 0,59).

De façon analogue, notre démarche a confirmé que la préparation des données (normalisation, sélection de variables SIG pertinentes) influence fortement la qualité des regroupements.

Néanmoins, notre approche diffère de celle de MARIN et al. par son orientation hydrogéologique plutôt que chimique : elle vise à zoner la ressource en fonction de la productivité et de l'aptitude agricole, plutôt qu'à évaluer la qualité physico-chimique de l'eau.

Par ailleurs, la problématique du choix du nombre optimal de clusters (K) demeure un enjeu méthodologique essentiel. Comme le rappellent HANCER et KARABOGA (2016) dans leur étude de référence, les méthodes traditionnelles du K-means présentent parfois des limites lorsqu'il s'agit de données complexes ou fortement bruitées. Les auteurs proposent des approches évolutives et adaptatives pour pallier ce problème. Dans notre cas, nous avons opté pour une approche hybride simple, combinant les méthodes du coude (Elbow) et de la silhouette, puis validée par la cohérence spatiale observée sur la carte SIG.

Cette stratégie a permis de garantir une classification statistiquement robuste et spatialement cohérente, en accord avec les caractéristiques géomorphologiques et hydrogéologiques locales.

## CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette recherche, consacrée à l'évaluation du potentiel hydrologique et agropastoral des zones steppiques du sud de la wilaya de Tlemcen, il ressort que la compréhension et la gestion durable de ces milieux fragiles nécessitent une approche intégrée alliant analyse spatiale, télédétection et systèmes d'information géographique (SIG).

Ce travail, centré sur cinq communes représentatives (Sebdou, Sidi Djilali, El Gor, El Bouihi et El Aricha), a permis de dresser un diagnostic complet des ressources naturelles, des contraintes physiques et des dynamiques humaines qui façonnent ce territoire à dominante pastorale.

L'étude a d'abord montré l'importance du facteur socio-économique dans la conservation et la valorisation des parcours steppiques. Ces espaces, qui couvrent la majeure partie de la zone d'étude, se situent principalement entre 1000 et 1300 mètres d'altitude et présentent des pentes inférieures à 10 %, conditions topographiques favorables aux activités pastorales traditionnelles.

Sur le plan climatique, les précipitations annuelles varient de 315 mm dans le nord (stations de Ras El-Ma et Sidi Djilali) à 198 mm dans le sud (station d'El Aricha), traduisant un gradient d'aridité progressif vers les zones méridionales. Cette configuration climatique, combinée à des sols fragiles et à des pratiques agricoles extensives, renforce la vulnérabilité écologique du milieu.

La cartographie des expositions du relief a révélé une répartition quasi homogène entre les quatre orientations principales (Nord, Est, Sud et Ouest), chacune représentant environ 25 % de la surface totale. Cette diversité d'orientation influe sur la dynamique d'érosion, la répartition de la végétation et les conditions d'infiltration des eaux de pluie.

Concernant les ressources hydriques, 119 points d'eau (forages, puits et sources) ont été inventoriés et géoréférencés sur les 178 recensés initialement. Leur analyse a mis en évidence une forte disparité spatiale des débits et de la productivité hydrogéologique.

La commune de Sebdou se démarque nettement avec un débit total de 245 L/s et un débit moyen de 11,66 L/s, confirmant son rôle central dans la dynamique hydrologique régionale.

Cette commune bénéficie en effet d'un réseau hydrographique bien structuré et d'une position amont favorable à la recharge des nappes et au développement agricole.

L'application de l'algorithme K-Means, combinée à des données spatiales multi-couches (pente, exposition, lithologie, occupation du sol et débit), a permis d'identifier six classes (clusters) de potentialité hydrogéologique.

Cette classification a mis en évidence trois grands ensembles :

- Une zone méridionale à faible rendement, marquée par la dominance des croûtes calcaires imperméables ;
- Une zone centrale à potentiel intermédiaire, où se superposent des formations mixtes nécessitant une gestion prudente ;
- Une zone septentrionale à fort potentiel, notamment autour de sebdou, caractérisée par des calcaires fracturés et des dépôts alluviaux favorables à la recharge et à l'irrigation.

Cette approche de clustering spatial a démontré sa pertinence scientifique et opérationnelle : Elle offre un gain significatif en temps et en coût pour la planification territoriale, tout en permettant une hiérarchisation claire des priorités d'intervention dans les milieux semi-arides. Elle illustre également l'intérêt des SIG couplés à la télédétection dans le suivi des ressources naturelles et la définition de scénarios de développement adaptés aux réalités locales.

L'ensemble des résultats obtenus met en lumière une fracture hydrogéologique nette entre le nord, mieux doté en eau et en terres agricoles, et le sud, soumis à des conditions d'aridité et de dégradation accentuées.

Cette distinction spatiale doit orienter les politiques publiques vers une gestion différenciée des ressources : Intensification raisonnée et irrigation maîtrisée au nord, accompagnées d'actions de restauration et de protection des parcours au sud.

Sur le plan méthodologique, l'étude confirme l'efficacité de la combinaison entre analyses statistiques (K-Means) et données spatiales pour le zonage des écosystèmes complexes, et ouvre la voie à des applications similaires dans d'autres régions semi-arides algériennes.

Elle constitue ainsi une référence pour la mise en place d'un système d'aide à la décision spatialisé, au service d'une planification hydro-agricole durable.

#### Alignement avec les Objectifs de Développement Durable (ODD)

Cette recherche s'inscrit pleinement dans la dynamique internationale des Objectifs de Développement Durable, notamment :

- ODD 6 : Eau propre et assainissement,
  - Cible 6.4 : « Accroître sensiblement l'efficacité de l'utilisation de l'eau et assurer la durabilité des prélèvements d'eau douce » ;
  
- ODD 15 : Vie terrestre,
  - Cible 15.3 : « Lutter contre la désertification, restaurer les terres et les sols dégradés, y compris ceux affectés par la sécheresse et les inondations, et s'efforcer de parvenir à un monde sans dégradation des terres ».

Ainsi, les outils développés et les résultats obtenus constituent à la fois un diagnostic territorial précis et un instrument d'aide à la décision pour appuyer les stratégies nationales de lutte contre la désertification et d'adaptation au changement climatique.

Ils favorisent la mise en place de projets agricoles durables, d'une utilisation plus rationnelle de l'eau et d'une restauration progressive des parcours steppiques.

#### Perspectives

À la lumière de ces conclusions, il est recommandé de :

- Renforcer les études hydrogéologiques locales afin d'améliorer la connaissance des nappes et d'optimiser les prélèvements ;
- Encourager les projets d'agriculture fourragère et de reverdissement pastoral, pour stabiliser les sols et limiter la pression sur les parcours ;
- Généraliser l'usage des sig et de la télédétection dans le suivi environnemental et la planification territoriale ;

- Impliquer davantage les communautés locales dans les politiques d'aménagement et de gestion durable, afin d'assurer la pérennité des actions entreprises.

En conclusion, la steppe méridionale de Tlemcen recèle des ressources naturelles prometteuses, mais demeure fragile. Seule une gouvernance intégrée et participative, fondée sur la connaissance scientifique et l'aménagement raisonné, permettra de transformer ce potentiel en un modèle de développement durable et résilient pour les générations futures.

## BIBLIOGRAPHIE

1. AIDOUD, A., LE FLOC'H, E. et LE HOUEROU H., N. 2006. *Les steppes arides du Nord de l'Afrique*. s.l. : Secheresse, 2006. 19-30 pp.
2. ANA E. M. C., DIEGO A. M. C., ELENA M. O. S., FRANCISCO G. R. and DAVID V. S. (2018). "Groundwater Quality Assessment: An Improved Approach to K-Means Clustering, Principal Component Analysis and Spatial Analysis: A Case Study ," *Water*,10(4),437.
3. ARROUAYS, D. 1987. *Un exemple d'utilisation de la télédétection pour la réalisation d'une carte des sols à mouenne echelle. Actes de la semaine Monétier-les-Bains. Projet Télédétection II Recherche en cours à l'INRA*. 1987. in Haddouche I., 1998. Cartographie pédopaysagique de synthèse par télédétection "Image Landsat TM" Cas de la région de Ghassoul. Ins. Agronomie Mém. Magistère. pp 275-280.
4. BAGNOULS, F. et GAUSSEN, H. 1953. *Saison sèches et indice xéothermique*. Toulouse : Bul. Soc. His. Nat., 1953. PP 139-239.
5. BARIOU, R. 1978. *Manuel d'utilisation de télédétection 2ème partie : les application de la photo-interpretation dans le domaine des sciences de la terre. III Les sols*. 1978. in Haddouche I., 1998. Cartographie pédopaysagique de synthèse par télédétection "Image Landsat TM" Cas de la région de Ghassoul. Ins. Agronomie Mém. Magistère. pp 129-153.
6. BEDRANI, S. 1984. *La steppe, les pasteurs et les agro-pasteurs en Algérie*. Alger : CREAD, 1984. p22.
7. BEDRANI, S., BENADJILA, M. et BENADJILA, S. 1991. - *Aperçu sur la législation et les modes d'utilisation par les animaux des terres publiques en Algérie. Actes du quatrième congrès international des terres de parcours*. Montpellier : s.n., 1991. Vol. 2, PP. 895-899. ISBN 2-87614-102-7.
8. BELGIU, M., & DRĂGUȚ, L. (2016). *Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 114, 24–31.
9. BENABADJI, N. et BOUAZZA, M. 2000. Contribution à une étude bioclimatique de la steppe à Artemisia herba-alba Asso. dans l'Oranie (Algérie occidentale). *Science et changements planétaires / Sécheresse*. 2000, Vol. 11, 2.

10. BENCHERIF, S. 2011. *L'élevage pastoral et la céréaliculture dans la steppe algérienne évolution et possibilités de développement*. Paris : Thèse Doc. école doctorale Abies, 2011.
11. BEN-HUR, A., Horn, D., SIEGELMANN, H. T., & VAPNIK, V. (2001). *Support vector clustering*. Journal of Machine Learning Research, 2(Dec), 125-137.
12. BENSAID, A. 2006. *SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la wilaya de Naâma (Algérie)*. Oran : Thèse Doc. Univ. Es-Senia, 2006. 299 P.
13. BENSOUIAH, R. 2002. *Vue d'ensemble de la steppe Algérienne*. s.l. : Doc. en ligne : (<http://desertification.voila.net/steppealgerienne.htm>), 2002.
14. BENSOUIAH, R. 2003. La lutte contre la désertification dans la steppe algérienne : les raisons de l'échec de la politique environnementale. *Journées de la Société d'Ecologie Humaine*. 2003, Vol. 15èmes journées de la Société d'Ecologie Humaine. 11-12 Déc..
15. BIALOUZ, S. 1977. *Deux remarques sur l'utilisation de la télédétection pour la cartographie pédologique. Introduction à la discussion 1er colloque "pédologie-télédétection"*. Rome : s.n., 1977. in Haddouche I., 1998. Cartographie pédopaysagique de synthèse par télédétection "Image Landsat TM" Cas de la région de Ghassoul. Ins. Agronomie Mém. Magistère. pp 213-220.
16. BONN, F. et ROCHON, G. 1993. *Précis de la télédétection: Principes et méthodes*. [éd.] PU Québec. Québec : A.U.P.E.L.F, 1993. p. 485. Vol. I. ISBN 2-7605-0613-4.
17. BOUANANI, A. 2004. *Hydrologie, transport solide et modelisation*. Tlemcen : Univ. Tlemcen Thèse Doc., 2004. 250 P.
18. BOUAZZA, M. (1995) "Phyto-ecological study of the steppes of *Stipa tenacissima* L. and *Lygeum spartum* L. south of Sebdou (Oran, Algeria)," *Ph.D. Thesis, University of Tlemcen, Algeria*, 275.
19. BOUAZZA, M. 1995. *Etude phyto-écologique des steppes a *Stippa tenacissima* L. et a *Lygeum spartum* L. au sud de Sebdou (Oranie-Algérie)*. Thèse Doct. Es. Sci. Univ. Tlemcen : s.n., 1995. 275 p..
20. BOUCHETATA, T. et BOUCHETATA, A. 2005. Dégénération des écosystèmes stéppiques et stratégie de développement durable. Mise au point méthodologique appliquée à la Wilaya de Naama (Algérie). *Développement durable et territoires*. [En ligne] 02 septembre 2005. [Citation : 14 septembre 2015.] <http://developpementdurable.revues.org/1339>. ISSN électronique 1772-9971.

21. BOUYAHIA, H. 2010. *Dynamique des systèmes d'élevage ovin et stratégie des éleveurs face aux aléas climatiques : cas de la région de Naama*. s.l. : Mém. Mag.Univ. Mascara, 2010. p 179.
22. BURROUGH, P.H. 1986. *Principals of geographical information system for land ressource assement*. Oxford : Clarendon press, 1986. p. 193 p. in ZAOUI M., Gestion des risques de feu dans la forêt de M'sila Wilaya d'Oran. Tlemcen : Mém. Mag. Univ. Tlemcen, 2013, p. 177 p..
23. CHERIFA H. CHEMIRIK, K., BAAHMED, D., NEDJAI, R., BOUDJEMLINE, D. and MAHCER, I. (2024). "Mapping Groundwater Potential Zones with GIS-RS-AHP Under Climate Change – Case of Mostaganem Plateau," Northwest Algeria. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25. pp. 72–89.
24. COMMISSION de Pédologie et de Cartographie des sols. 1967. *Classification des sols*. s.l. : C.P.C.S., 1967. 96 P.
25. COUDREC, R. 1974. De la tribu à la coopérative: aperçu de l'évolution des hautes plaines oranaises. *Option Méditerranéennes*. 1974, 28. PP 65-74.
26. COWEN, D.J. 1988. *GIS versus CAD versus DBMS: What Are the Differences? Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1988.
27. DAJOZ, R. 1985. *Précis d'écologie*. Paris : Bordas, 1985. 505 P..
28. DESHAYES, N. et MAUREL, P. 1990. *La télédétection en agriculture : Principes généraux de la télédétection (l'image spatiale et son contenu)*. Montpellier : s.n., 1990. pp 11-27.
29. DIDON, E. 1990. *SIG: Concept, Fonction, Application*. 1990.
30. DJEBAILI, S., ACHOUR, H., AIDOUD, F., et Khelifi, H 1982. *Groupes écologiques édaphiques dans les formations steppiques du Sud-oranais*. s.l. : Bulletin d'écologie terrestre BIOCENOSE, 1982. pp. 7-59.
31. DOUH. 2011. *Caractérisation des paramètres Zootechniques de l'élevage ovin en zones steppiques Cas de la Wilaya de Tébessa*. s.l. : Mém. Mag.Institut des sciences de la Nature et de la Vie El Taref, 2011. 130 p.
32. EMBERGER, L. 1955. *Une classification biogéographique des climats*. Montpellier : Trav. Bot. Géo. Zool.Fac. Sci. Bot., 1955. PP. 3-43.
33. ENNEBATI M.E.A. 2015. *Potentialités hydrologiques de l'écosystème steppique de Tlemcen et intégration des données dans un système à référence spatiale*. Mém. Mag., Univ. Tlemcen, 129P.

34. ENNEBATI M.E.A. et HADDOUCHE D. 2025. *Hydro-agricultural zoning of Southern Tlemcen steppe using GIS and k-means clustering*. Journal of Water and Land Development. 61-61. 10.24425/jwld.2025.155302.
35. ESCADAFAL, R. 1989. *Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et âr télédétection. Application : exemple de la région Tataouine*. Paris : O.R.S.T.O.M, 1989. in Haddouche I., 1998. Cartographie pédopaysagique de synthèse par télédétection "Image Landsat TM" Cas de la région de Ghassoul. Ins. Agronomie Mém. Magistère. 317 P.
36. FERAH, T. 2010. *Intégration des données multi sources dans un Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS) des formations forestières méditerranéennes. Cas de la zone écologique de ghazaouate (Algérie Nord occidentale)*. Arzew : Mém. Mag. Centre des techniques spatiales, 2010. 123 p + annexes.
37. FLORET, C. 1981. *Effects of protection on steppic vegetation in the mediterranean*. 1981.
38. FLORET, C., LE FLOC'H, E. et PONTANIER, R. 1992. *Perturbation anthropique et aridification en zone présaharienne In: Le Floc'h E., Grouzis M., Cornet A., Bille J. C. (Eds) L'aridité une contrainte de développement, caractérisation réponses biologiques et stratégie de sociétés*. Paris : Ed. Orostom, 1992. 449-463 pp.
39. GAMBLIN, B. 1995. *Un système d'information géographique à l'ONTF rêve ou réalité ?* s.l. : Fox, 1995. in KHAZANI R., 2013 Contribution a l'étude de la diversité pédopaysagique des parCours steppique de la région sud de la wilaya de tlemCen (Cas de la Commune d'el-ariCha). Mém. Master Univ. Tlemcen .
40. GIRAD, M-C. 2010. *Traitement des données de télédétection*. 2e. Paris : Dunod, 2010. 576 P.
41. H.C.D.S. 2005. *Problématique des zones steppiques et perspectives de développement*. s.l. : Rap. Synth. haut commissariat au développement de la steppe, 2005. 10 P.
42. HADDOUCHE, D. 1998. *Cartographie Pédopaysagique De Synthèse Par Télédétection « Images Landsat Tm » Cas De La Region De Ghassoul(El-Bayadh)*. Alger : Institut National d'Agronomie Thèse Magister., 1998. 138 p.
43. HADDOUCHE, D., TOUTAIN, B., SAIDI, S., and MEDERBAL, K. (2008) How to reconcile development of steppe populations with the fight against desertification? Case of Naâma province (Algeria),” *New Medit*, 7, pp.25–31.

44. HADDOUCHE, D. 2009. *La télédétection et la dynamique des paysages en milieu aride et semi-aride en Algérie: Cas de la région de Naama*. s.l. : Thèse Doc. Univ. Tlemcen, 2009. 211 p.
45. HADDOUCHE, D., and SAIDI, S. (2014) “Management plan and options for pastoral resources: Case of the Mécheria region (Algeria),” *Journal of Remote Sensing and GIS*, 2, pp. 62–69.
46. HADDOUCHE, D. 2017. *Cartographie Pédopaysagique De Synthèse Par Télédétection*. Editions Universitaires Europeennes (EUE) ISBN: ISBN-13: 978-3-639-54486-2 ISBN-10: 3639544862 EAN: 9783639544862
47. HADEID, M. 2008. *Approche anthropique du phénomène de désertification dans un espace steppique : le cas des hautes plaines occidentales algériennes*. *Vertigo*. [En ligne] Avril 2008. [Citation : 03 Juin 2015.]  
<http://vertigo.revues.org/5368#tocfrom2n1>. 10.4000/vertigo.5368.
48. HALIMI, A. 1980. *L'Atlas Blidéen : climat et étages végétaux*. Alger : O.P.U, 1980. 484 P.
49. HALITIM, A. 1988. *Sols des régions arides d'Algérie*. alger : OPU, Alger, 1988. 384 p.
50. HALITIM. 1985. *Contribution à l'étude des sols des zones arides ( hautes plaines steppiques de l'Algérie)*. *Morphologie, distribution et rôle des sols dans la génèse et le comportement des sols*. s.l. : Thèse Doc. Univ. Rennes, 1985. pp:1-183.
51. HANCER, E., KARABOGA, D. (2017) “A comprehensive survey of traditional, merge-split and evolutionary approaches proposed for determination of cluster number,” *Swarm Evolut. Comput.*,32, pp49–67.
52. ISMAIL H., I., Qurtobi, M., Saadi, R. *et al.* (2024) “Integrating remote sensing, GIS-based, and AHP techniques to delineate groundwater potential zones in the Moulouya Basin, North-East Morocco,” *Applied Water Science*, 14, 122 .
53. HINSE, M. 1989. *Réflectance spectrale des sols de settat (Chaouia, Maroc)*. *Travaux sur terrain*. 1989. in Haddouche I., 1998. *Cartographie pédopaysagique de synthèse par télédétection "Image Landsat TM" Cas de la région de Ghassoul*. *Ins. Agronomie Mém. Magistère*. 132 P.
54. HIRCHE, A., BOUGHANI, A. et SALAMANI, M. 2007. *Evolution de la pluviosité annuelle dans quelques stations arides Algériennes*. s.l. : Revu Sécheresse, 2007. pp. PP : 314 - 320. Vol.18 N° 4.

55. I.N.R.A. 1991. *Relations entre facteurs du milieu naturel et pedopaysages : variables pertinentes pour une delimitation assistee*. Paris : Séminaire I.N.R.A. 22-24 octobre, 1991. In ZAOUÏ, M. 2013. Gestion des risques de feu dans la forêt de M'sila Wilaya d'Oran. Tlemcen : Mém. Mag. Univ. Tlemcen, 2013. 177 P. 421p.
56. IDRÏSSA, A. 2004. *Etude du milieu physique d'une région semi-aride par télédétection et intégration des données dans un système géographique : cas de la région d'Ain Sefra*. Tlemcen : Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 2004. 80p..
57. KHALDOUNI, A. 2000. *Evolution technologique et pastoralisme dans la steppe algérienne. Le cas de camion Gak en Haute-pleines occidentales*. Montpellier : CIHEAM, 2000. 121-127.
58. Khelil. 1997. *L'écosystème steppique : quel avenir ?* Alger : DAHLEB, 1997. 184P.
59. KING, D. 1994. *Apport de la télédétection à l'étude de la couverture pédologique*. Revue des travaux menés au service d'étude des sols et de la carte pédologique de France. s.l. : Bul. S.F.P.T. n° 134 (1994-2), 1994. in Haddouche I., 1998. Cartographie pédopaysagique de synthèse par télédétection "Image Landsat TM" Cas de la région de Ghassoul. Ins. Agronomie Mém. Magistère. pp 15-19.
60. Kubat, M., Holte, R. C., & Matwin, S. (1998). *Machine learning for the detection of oil spills in satellite radar images*. Machine Learning, 30(2), 195–215.
61. LE HOUEROU, H. N. 1985. *La régénération des steppes algériennes*. 1985. Rapport de mission de consultation et d'évaluation. Ministère de l'agriculture, Alger..
62. LE HOUEROU, H. N. 1992. *Agroforestry and sylvopastoralism to combat land degradation in the mediterranean basin: Old approaches to new problems*. s.l. : Agri. Ecosy. Environm., 1992. 99-109 pp.
63. LE HOUEROU, H. N. 1995. *Bioclimatologie et biogéographie des steppes aride du Nord de l'Afrique- Diversité biologique, développement durable et désertisation. Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 10*. Montpellier : CIHEAM, 1995. 136 P.
64. LE HOUEROU, H. N. 1996. *Climat change, drought and desertification*. s.l. : Arid Land Res. Manag., 1996. 1-36 pp.
65. LE HOUEROU, H. N. 2001. *Biogeography of the arid steppe land north of the sahara*. s.l. : J. Arid Environ, 2001. 103-128 pp.
66. LE HOUEROU, H. N. 2002. *Man-made deserts : Dersertiyation processes and threats*. s.l. : Arid Res. Manag., 2002. 1-36.

67. LE HOUEROU, H. N. 2006. *Environmental constraints and limits to livestock husbandry in arid land*. s.l. : Sécheresse, 2006. 10-18 pp.
68. Le Houérou, H.N. (1995) "Bioclimatology and biogeography of arid steppes in North Africa – Biological diversity, sustainable development and desertification," Options Mediterranean: Series B. Studies and Research CIHEAM. Montpellier,10.
69. LE HOUEROU. 1977. *Plant sociology and ecology applied to grazing lands research,survey and management in the mediterranean Basin*. In. KHELIL A., 1997. *L'écosystème steppique : quel avenir ?*. DAHLAB Alger. 184p. 1977.
70. LLOYD, S. (1982). *Least squares quantization in PCM*. IEEE Transactions on Information Theory, 28(2), 129–137.
71. M.A.D.R. 2008. *Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. Note sur la steppe* In . 2008. 2-7pp.
72. MACQUEEN, J. (1967). *Some methods for classification and analysis of multivariate observations*. In Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability (Vol. 1, No. 14, pp. 281–297).
73. MAHDAVI, M., et al. (2019). *Evaluation of land suitability for agriculture using K-means and GIS in semi-arid region of Iran*. Environmental Earth Sciences, 78, 655.
74. MAJAW, N. and AHMED, S. (2023) "Exploring Data Distributions using Box and Whisker Plot Analysis," International Conference on Computing Communication and Networking Technologies, pp. 1–8.
75. MEGHRAOUI, M. 2007. *Contribution à l'aménagement durable d'une zone de montagne par télédétection : cas de la Commune de oued lakhdar*. Tlemcen : Mém. Mag. Univ. Tlemcen, 2007. 107 P.
76. Ministry of Agriculture and Rural Development (2008) "Note on the steppe," Annual Report, pp. 2–7.
77. MONTCHAUSSÉ, G. 1977. *La steppe algérienne : Causes et effets d'une désertisation*. octobre - décembre. Paris : Edition Anthropos, 1977. pp.123-151.
78. NAERT, B. 1995. *Cartographie des sols aidées par la télédétection, une méthodes adaptée aux milieu méditerranéen et arides*. Montpellier : I.N.R.A, 1995. pp 193-199.
79. National Water Resources Agency (2005) "Extract from the map of the hydro climatological network and water quality monitoring in Northern Algeria," Annual Report, 82.

80. NEDJIMI, B et GUIT, B. 2012. Les steppes algériennes: Causes de déséquilibre. *Revues.Univ-Ouargla*. Algerian Journal of Arid And Environment (AJAE), 2012, Vol. II, 2.
81. NEDJIMI, B. 2012. *Rangeland improvement and management option in the arid steppes of Algeria*. In: Germano, M. Denise (Ed.) *Steppe ecosystems: Dynamics, land use and conservation*. . New York : Nova Science Publishers, 2012. 157-170.
82. NEDJIMI, B. 2012. *Seasonal variation in productivity, water relation and ion contents of *Atriplex halimus* spp. *schweinfurthii* grown in Chott Zehrez wetland*. s.l. : Saudi Soc. Agri Sci., 2012. 43-49 pp.
83. NEDJIMI, B. et HOMIDA, M. 2006. *Problématique des zones steppiques algériennes et perspectives d'avenir*. s.l. : Revue du Chercheur, 2006. 13-19 pp.
84. Nedjimi, B., and Guit, B. (2012) "Algerian steppes: Causes of imbalance," University of Ouargla Journal, 2, p.12.
85. NEDJIMI, B., SEBTI, M. et NAOUI, T. 2008. *Le problème du foncier agricole en Algérie*. Alger : Revue Droit Sci. Hum., 2008. 1-11 pp.
86. NEDJRAOUI, D. 1990. *Adaptation de l'alfa (*Stipa tenacissima* L) aux conditions stationnelles*. Alger : Thèse Doc. USTHB, 1990. 256 P.
87. NEDJRAOUI, D. (2003) "Mechanisms for monitoring desertification in Algeria – Proposal for a national long-term ecological monitoring system," Synthesis Document Sahara and Sahel Observatory, p.37.
88. NEDJRAOUI, D. et BEDRANI, S. 2008. *La désertification de la steppe algérienne: causes, impacts et action de luttés*. s.l. : Vertigo, 2008. 1-15 pp.
89. NEDJRAOUI, D. 2012. Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. *Profil fourrager (Algérie)*. [En ligne] FAO, Janvier 2012. [Citation : 08 Juin 2015.] <http://www.fao.org/ag/agp/AGPC/doc/Counprof/Algeria/Algerie.htm>.
90. PIEYNS, S. 1999. *Utilisation de la télédétection en hydrologie*. Bondy : O.S.T.R.O.M, 1999. 39714.
91. POUGET, M. 1973. *Une manifestation particulière et méconnue de la salure dans les steppes du sud-Algérien: Les plages de la salure sur les glacis quaternaires à crôte calcaire*. s.l. : Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, 1973. 15-24 pp.
92. POUGET. 1980. *Les relations sol-végétation dans les steppes Sud- algéroises*. Paris : Thèse Doc., travaux et documents de l'OROSTOM, 1980. 555 p.
93. RUSSELL, S. J., & NORVIG, P. (2010). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (3rd ed.). Prentice Hall.

94. SAUVAGE, CH. 1961. *Recherches géobotaniques sur le chêne liège au Maroc*. Montpellier : Thèse Doc. Univ. Montpellier, Trav. Inst. Sci. Chérifien, 1961.
95. SCANVIC, J.Y. 1983. *Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre naturelle et méthodes*. Orléans : BRGM, 1983. p. 158.
96. SHAHABI, H., et al. (2021). *Spatial modeling of groundwater potential zones using ensemble ML techniques*. Science of The Total Environment, 768, 144310.
97. TEILLET, P.-M. 1999. The role of surface observation in support of remote sensing. *Télédétection (Revue de recherche et d'application en télédétection )*. GBSP, 1999, Vol. I, 01.
98. TOMILINSON, R.F. 1988. *The Impact of the Transition From Analogue to Digital Cartographic Representation*. s.l. : The American Cartographer, 1988. Vol. 15 n° 3. 251-261.
99. TRICART, J. et CAILLEUX, A. 1965. *Introduction à la géomorphologie climatique. L'influence non directe du climat: pédogénèse et mophogénèse*. 1965. PP 100-144.
100. WANG, Q., et al. (2022). *Precision agriculture powered by ML: Smart irrigation system*. Computers and Electronics in Agriculture, 193, 106633.
101. WU, Z. Y., & Walski, T. M. (2017). *Leak detection in water distribution networks using statistical models and machine learning*. Journal of Water Resources Planning and Management, 143(12), 04017072.
102. YANG, L. and Deng, M. (2010) "Based on k-Means and Fuzzy k-Means Algorithm Classification of Precipitation," International Symposium on Computational Intelligence and Design, pp. 218–221.
103. ZAOUI, M. 2013. *Gestion des risques de feu dans la forêt de M'sila Wilaya d'Oran*. Tlemcen : Mém. Mag. Univ. Tlemcen, 2013. 177 P.
104. ZOUNEMAT-Kermani, M., et al. (2020). *Water quality prediction using ML algorithms: a review*. Journal of Hydrology, 588, 125085.