

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الدكتور مولاي الطاهر، سعيدة
Université Moulay Tahar, Saïda



كلية علوم الطبيعة والحياة
Faculté des Science Naturelle et de la Vie

N° d'ordre

قسم الفلاحة وعلوم التغذية
Département d'Agriculture et de Nutrition
Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master
En écologie
Spécialité : Protection des écosystèmes

Thème

***Approche intégrée mobilisant l'intelligence artificielle et les savoirs
écologiques traditionnels dans la lutte contre la désertification dans les
zones semi-arides : étude de cas de la wilaya de Saïda***

Présenté par :

- M^{elle} MOKEDDEM Ferial

Soutenu le : 20/06/2026

Devant le jury composé de :

<i>Président</i>	<i>Mr LAKHDARI Mama</i>	<i>Pr Université UMTS</i>
<i>Examineur</i>	<i>Mme. HENDI Amina</i>	<i>MAA Université UMTS</i>
<i>Encadreur</i>	<i>Mr. ANTEUR Djamel</i>	<i>MCA Université UMTS</i>

Année universitaire 2025-2026



Remerciements

Au nom d'Allah le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux, je tiens tout d'abord à remercier Dieu de m'avoir accordé la force et la patience pour mener à bien ce mémoire.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, **le professeur Antrur Djamel**, pour son encadrement, ses conseils précieux et son soutien tout au long de ce travail.*

*Je remercie également les membres du jury, **LAKHDARI Mama** et **Hendi Amina**, d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire et de consacrer de leur temps à son examen.*

*J'adresse aussi mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation universitaire, en particulier les professeurs **Mahjouba Hicham** et **Darrab Djellali**, qui ont été un véritable soutien durant mes premières années universitaires. Ils m'ont encouragé et motivé à poursuivre mes études et m'ont donné la force de continuer.*

Je n'oublie pas ma famille, à qui j'exprime toute ma reconnaissance pour son soutien constant et ses encouragements tout au long de mon parcours.

Enfin, je m'adresse à moi-même avec reconnaissance pour mes efforts, ma persévérance et ma détermination tout au long de ce parcours, malgré les difficultés rencontrées.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.





Dédicace

À moi-même, en reconnaissance de tous les efforts, de la patience et de la persévérance fournis malgré les difficultés, et de ma conviction d'avoir continué jusqu'à atteindre cette étape.

À ma mère, à celle qui m'a porté avec fatigue et veillé sur moi, au cœur qui ne connaît que l'amour et le sacrifice, à cel

le dont les prières ont été la source de ma réussite et le soutien dans mes moments de faiblesse, je dédie ce travail avec une gratitude que les mots ne peuvent exprimer.

À mon père, symbole de force et de sagesse, qui m'a appris le sens du courage et de la persévérance, et qui a toujours été un soutien discret m'apportant sécurité et confiance à chaque étape.

À toute ma famille, qui m'a toujours soutenue et accompagnée avec amour et encouragement tout au long de mon parcours.

*À mon amie **Ben Attallah Mokhtaria**, qui a été à mes côtés durant ce chemin et m'a soutenue par ses mots et ses encouragements.*

À toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.



Résumé : Cette étude propose une approche intégrée combinant l'intelligence artificielle et les savoirs écologiques traditionnels afin d'analyser et de lutter contre le phénomène de la désertification dans les zones semi-arides, avec un cas d'application dans la wilaya de Saïda. Elle repose sur l'exploitation de données géospatiales issues de la télédétection, de modèles numériques de terrain et d'indices de végétation, traités à l'aide de systèmes d'information géographique et d'algorithmes de classification. Parallèlement, les savoirs locaux sont mobilisés pour enrichir l'interprétation des dynamiques environnementales et comprendre les pratiques d'adaptation des populations face aux contraintes climatiques et écologiques. L'objectif est de produire une cartographie de la sensibilité à la désertification (ISD) et de proposer une lecture croisée entre approches scientifiques et connaissances traditionnelles, afin de soutenir des stratégies de gestion durable des ressources naturelles.

Mots-clés : Intelligence artificielle ; Désertification ; Savoirs écologiques traditionnels

Abstract: This study proposes an integrated approach combining artificial intelligence and traditional ecological knowledge in order to analyze and combat the phenomenon of desertification in semi-arid regions, with a case study application in the Wilaya of Saïda. It is based on the use of geospatial data derived from remote sensing, digital elevation models, and vegetation indices, processed using geographic information systems and classification algorithms. In parallel, local knowledge is mobilized to enrich the interpretation of environmental dynamics and to understand the adaptation practices of populations in the face of climatic and ecological constraints. The objective is to produce a Desertification Sensitivity Index (DSI) map and to propose a cross-reading between scientific approaches and traditional knowledge, in order to support sustainable natural resource management strategies.

Keywords: Artificial Intelligence; Desertification; Traditional Ecological Knowledge

المخلص: تقترح هذه الدراسة مقارنة متكاملة تجمع بين الذكاء الاصطناعي والمعارف البيئية التقليدية من أجل تحليل ومكافحة ظاهرة التصحر في المناطق شبه الجافة، مع تطبيق حالة دراسية في ولاية سعيدة. وهي تعتمد على استغلال البيانات الجغرافية المكانية المستخرجة من الاستشعار عن بعد، ونماذج الارتفاع الرقمية، ومؤشرات الغطاء النباتي، والتي تتم معالجتها باستخدام نظم المعلومات الجغرافية وخوارزميات التصنيف. وبالتوازي مع ذلك، يتم توظيف المعارف المحلية لإغناء تفسير الديناميكيات البيئية وفهم ممارسات التكيف لدى السكان أمام القيود المناخية والبيئية. الهدف هو إنتاج خريطة حساسية للتصحر (ISD) واقتراح قراءة متقاطعة بين المقاربات العلمية والمعارف التقليدية، من أجل دعم استراتيجيات التسيير المستدام للموارد الطبيعية.

الكلمات المفتاحية: الذكاء الاصطناعي؛ التصحر؛ المعارف البيئية التقليدية

Liste des abréviations

IA : Intelligence Artificielle

SET : Savoirs Écologiques Traditionnels

SIG : Systèmes d'Information Géographique

ISD : Indice de Sensibilité à la Désertification

MNT : Modèle Numérique de Terrain

SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

EVI : Enhanced Vegetation Index

CNN : Convolutional Neural Network

SVM : Support Vector Machine

SPI : Standardized Precipitation Index

SSI : Soil Moisture Stress Index

LiDAR : Light Detection And Ranging

EBVs : Essential Biodiversity Variables

RVB : Rouge Vert Bleu

OSO : Occupation du Sol

PM_{2,5} : Particules fines de diamètre inférieur à 2,5 µm

NO₂ : Dioxyde d'azote

O₃ : Ozone

AOD : Aerosol Optical Depth

CNULD : Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification

ANR : Agence Nationale de la Recherche

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

THEIA : Pôle de données et services pour les surfaces continentales

GEDI : Global Ecosystem Dynamics Investigation

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

Liste des figures

Figure V.1 : Répartition des classes du SAVI dans la zone d'étude.....	144
Figure V.2 : Histogramme des classes de pentes dans la zone d'étude	147
Figure V.3 : Diagramme circulaire des classes d'exposition	150
Figure V.4 : Schéma fonctionnel du rôle du réseau hydrographique dans la désertification.	156
Figure V.5 : Répartition des classes d'occupation du sol	158
Figure V.6 : Répartition des classes ISD dans la zone d'étude.....	162

Liste des cartes

Carte III .1 : Cadre géographique et administratif des communes étudiées dans le sud de la wilaya de Saïda.....	80
Chapitre IV : Traitement spatial des données et élaboration des cartes thématiques.....	105
Carte IV.1: Composition colorée en vraies couleurs (RVB) de la zone d'étude	111
Carte IV.2: Composition colorée en fausses couleurs (RVB) de la zone d'étude	112
Carte IV.3: Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la zone d'étude	114
Carte IV.4: Carte des pentes de la zone d'étude.	115
Carte IV.5: Carte de l'exposition (Aspect) de la zone d'étude	116
Carte IV.6: Carte géologique de la zone d'étude.....	117
Carte IV.7: Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude	118
Carte IV.8: Carte de l'occupation du sol de la zone d'étude	120
Carte IV.9: Carte de l'indice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) de la zone d'étude.	121
Carte IV.10: Carte de l'indice de sensibilité à la désertification (ISD) de la zone d'étude. ...	122

Liste des tableaux

Tableau III .1 : Présentation administrative des communes.....	80
Tableau III.2 Caractéristiques climatiques générales de la zone d'étude	83
Tableau III.3 Caractéristiques morphologiques générales de la zone.....	85
Tableau III.4: Caractéristiques principales des sols de la zone d'étude.....	88
Tableau III.5: Caractéristiques géologiques de la zone d'étude.....	89
Tableau IV.1: Caractéristiques altimétriques de la zone d'étude (MNT).....	129
Tableau IV.2: Répartition des classes de pentes dans la zone d'étude (pente.tif)	130
Tableau IV.4 : Répartition des classes d'occupation du sol dans la zone d'étude (dsertificationoccupation du sol.tif)	132
Tableau IV.5 :Tableau des ordres hydrographiques	135
Tableau IV.6 : Tableau des superficies des classes ISD.....	136
Tableau V.1 : Relation entre les classes du SAVI et la sensibilité à la désertification	142
Tableau V.2 : Répartition des classes de couverture végétale dans la zone d'étude.....	143
Tableau V.3 : Caractéristiques altimétriques de la zone d'étude	145
Tableau V.4 : Répartition des classes de pentes dans la zone d'étude.....	146
Tableau V.5 : Relation entre pente et processus de dégradation.....	147
Tableau V.6 : Répartition des classes d'exposition dans la zone d'étude.....	148
Tableau V.7 : Relation entre exposition et conditions environnementales	149
Tableau V.8 : Relation entre unités géologiques et sensibilité à la désertification	151
Tableau V.9 : Typologie des sols et niveaux de sensibilité associés	152
Tableau V.10 : Hiérarchisation du réseau hydrographique et implications environnementales	154
Tableau V.11 : Relation entre densité de drainage et sensibilité environnementale.....	155
Tableau V.12 : Typologie de l'occupation du sol et niveau de sensibilité.....	157
Tableau V.13 : Classification des niveaux de sensibilité à la désertification (ISD)	160

Tableau V.14 : Répartition des classes ISD dans la zone d'étude	161
Tableau V.15 : Comparaison des communes selon la sensibilité environnementale.....	163
Tableau V.16 : Apports des SIG dans l'analyse spatiale de la désertification.....	165
Tableau V.17 : Apports du traitement automatisé dans l'analyse environnementale	166
Tableau V.18 : Limites des approches SIG et numériques	167
Tableau V.19 : Principales pratiques écologiques traditionnelles et leurs effets	168
Tableau V.20 : Complémentarité entre approches traditionnelles et modernes.....	169
Tableau V.21 : Perspectives d'intégration des savoirs traditionnels.....	170

Table des matières

Remerciements	-
Dédicace	-
Résumé	-
Liste des abréviations.....	-
Liste des figures	-
Liste des cartes.....	-
Liste des tableaux	-
Table des matières	-
Introduction	1

Partie bibliographique

Chapitre I : Cadre théorique et méthodologique de l'approche intégrée

I.1 Introduction.....	5
I.2. Intelligence artificielle et ses applications dans le domaine environnemental	5
I.2.1 Définitions et origines de l'intelligence artificielle	5
I.2.2 Techniques principales de l'intelligence artificielle	7
I.2.2 Applications de l'IA dans la surveillance et l'analyse des ressources environnementales.	8
I.3. Savoirs écologiques traditionnels et leur rôle dans la protection des écosystèmes	16
I.3.1 Définitions et caractéristiques principales	17
I.3.2. Rôle des détenteurs de savoir.....	20
I.3.3 Facteurs influençant la transmission	20
I.3.4. Défis contemporains	21
I.3.5. Stratégies pour renforcer la transmission.....	22
1-2- Importance des savoirs locaux dans la gestion durable des ressources naturelles	22
1-3- Défis liés à la préservation de ces savoirs à l'ère moderne	24
5. Conflits avec la modernisation technologique	29
5.1 Tensions culturelles et sociales	29
5.2 Incompatibilités techniques et écologiques.....	29
5.3 Défis liés à la gouvernance et aux politiques	30
6. Stratégies de préservation et adaptation	30
6.1 Documentation et enregistrement	30
6.2 Éducation et transmission intergénérationnelle	31

6.3 Intégration avec la technologie	31
6.4 Politiques et cadres institutionnels	32
6.5 Résilience écologique et sociale.....	32
-2Intégration entre intelligence artificielle et savoirs traditionnels.....	32
2-1-Similarités et différences entre les deux systèmes de connaissance	33
1. Similarités entre IA et SET	33
2. Différences entre IA et SET	34
2-2-Modèles théoriques d'intégration et de cohabitation.....	35
1. Modèle complémentaire (Complementarity Model).....	35
2. Modèle d'intégration adaptative (Adaptive Integration Model)	36
3. Modèle de cohabitation harmonieuse (Harmonious Coexistence Model	36
4. Modèle participatif ou co-construction (Participatory/Co-construction Model).....	36
5. Modèle d'intégration multi-échelle (Multi-scale Integration Model)	37
2-3-Enjeux sociaux, éthiques et politiques liés à cette intégration	37
1. Enjeux sociaux	37
2. Enjeux éthiques	37
3. Enjeux politiques.....	38
4. Vers une intégration responsable	38
2-4- Méthodologie adoptée pour intégrer ces savoirs dans la lutte contre la désertification	39
1. Recensement et documentation des savoirs traditionnels	39
2. Collecte et intégration des données environnementales via l'IA	40
3. Modélisation hybride IA – SET	40
4. Validation participative et ajustements	40
5. Suivi et évaluation continue	41
Conclusion.....	41

Chapitre II : La désertification dans les zones semi-arides

Introduction	43
-1Définition et impacts environnementaux et sociaux de la désertification	43
1-1-Définitions et types de désertification	43
1-2-Indicateurs environnementaux de dégradation des sols	46
1. Indicateurs physiques	46
2. Indicateurs chimiques.....	48
3. Indicateurs biologiques	50

4. Indicateurs combinés et spatiaux	52
1-3-Impacts sur la biodiversité et les communautés humaines	53
-2Causes de la désertification dans les zones semi-arides	55
2-1-Facteurs climatiques	55
2-2-Facteurs anthropiques	56
2-3-Pressions démographiques et urbanisation	58
3-Stratégies de lutte contre la désertification aux niveaux international et national.....	60
3-1-Conventions et initiatives internationales.....	60
1. La Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULD).....	60
2. Initiatives régionales et programmes complémentaires	61
3. Impacts et pertinence pour l'Algérie	62
3-2-Politiques et stratégies nationales algériennes.....	62
1. Cadre législatif et institutionnel	63
1.1 Cadre législatif	63
1.2 Institutions nationales impliquées	63
1.3 Coordination et mécanismes de gouvernance	64
2. Programmes et initiatives opérationnelles	65
2.1 Programmes nationaux de reforestation et de restauration des sols.....	65
2.2 Initiatives de gestion intégrée des ressources en eau	65
2.3 Projets de lutte contre la désertification en partenariat avec des acteurs internationaux ...	66
2.4 Implication des communautés locales et des savoirs traditionnels	66
3. Approches intégrées et participatives.....	67
3.1 Définition et fondements théoriques	67
3.2 Objectifs et avantages	67
3.3 Méthodes et outils d'intégration.....	68
3.4 Exemples de mise en œuvre	68
3.5 Limites et défis.....	68
4. Résultats obtenus et limites	69
4.1 Résultats obtenus.....	69
4.1.1 Amélioration de la couverture végétale et de la fertilité des sols.....	69
4.1.2 Renforcement de la participation communautaire	69
4.1.3 Production de données et outils de suivi	69
4.2 Limites et contraintes	70

4.2.1 Limites techniques	70
4.2.2 Contraintes institutionnelles et financières	70
4.2.3 Défis sociaux et culturels	70
4.3 Perspectives et recommandations	70
3-3-Évaluation des forces et faiblesses des approches existantes	71
1. Forces des approches existantes.....	71
1.1 Approches intégrées et multidimensionnelles.....	71
1.2 Participation communautaire et appropriation locale	71
1.3 Production et utilisation de données fiables	72
2. Faiblesses et limites des approches existantes	72
2.1 Dépendance aux financements externes.....	72
2.2 Limites techniques et méthodologiques	73
2.3 Contraintes institutionnelles et coordination.....	73
2.4 Défis socio-culturels.....	73
3. Perspectives d'amélioration	73
3.1 Renforcer la coordination institutionnelle.....	74
3.2 Assurer la durabilité financière	74
3.3 Intégrer pleinement les savoirs locaux et traditionnels	74
3.4 Renforcer les capacités techniques locales	74
Conclusion.....	75

PARIE PRATIQUE

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Introduction	78
III.1 Situation géographique de la wilaya de Saïda.....	78
III. 1.2. Délimitation de la zone d'étude	78
III.1.3. Caractéristiques physiques et environnementales de la zone d'étude.....	80
III. 1.3.1. Climat.....	81
III. 1.3.2. Relief.....	83
III.3.3. Sols.....	85
III. 1.3.4. Géologie	88
III. 1.3.5. Réseau hydrographique	90
III. 1.3.6. Couvert végétal	91
III .2-4- Données de terrain.....	95

III .2-5- Observations et enquêtes locales	96
III .2-6- Outils d'intelligence artificielle utilisés.....	96
III .3- Méthodologie de travail	97
III .3-1- Collecte des données	97
III .3-2- Prétraitement et traitement des images	98
III .3-3- Calcul des indices de végétation (NDVI).....	98
III .3-4- Classification et cartographie	99
III .3-5- Analyse des zones dégradées.....	100
III .3-6- Intégration des savoirs écologiques traditionnels.....	100
III .4- Méthodes d'analyse	101
III .4-1- Analyse spatiale	101
III .4-2- Approche comparative.....	102
III .4-3- Analyse par intelligence artificielle	102
III .4-4- Validation des résultats	103
Conclusion.....	103

Chapitre IV : Traitement spatial des données et élaboration des cartes thématiques

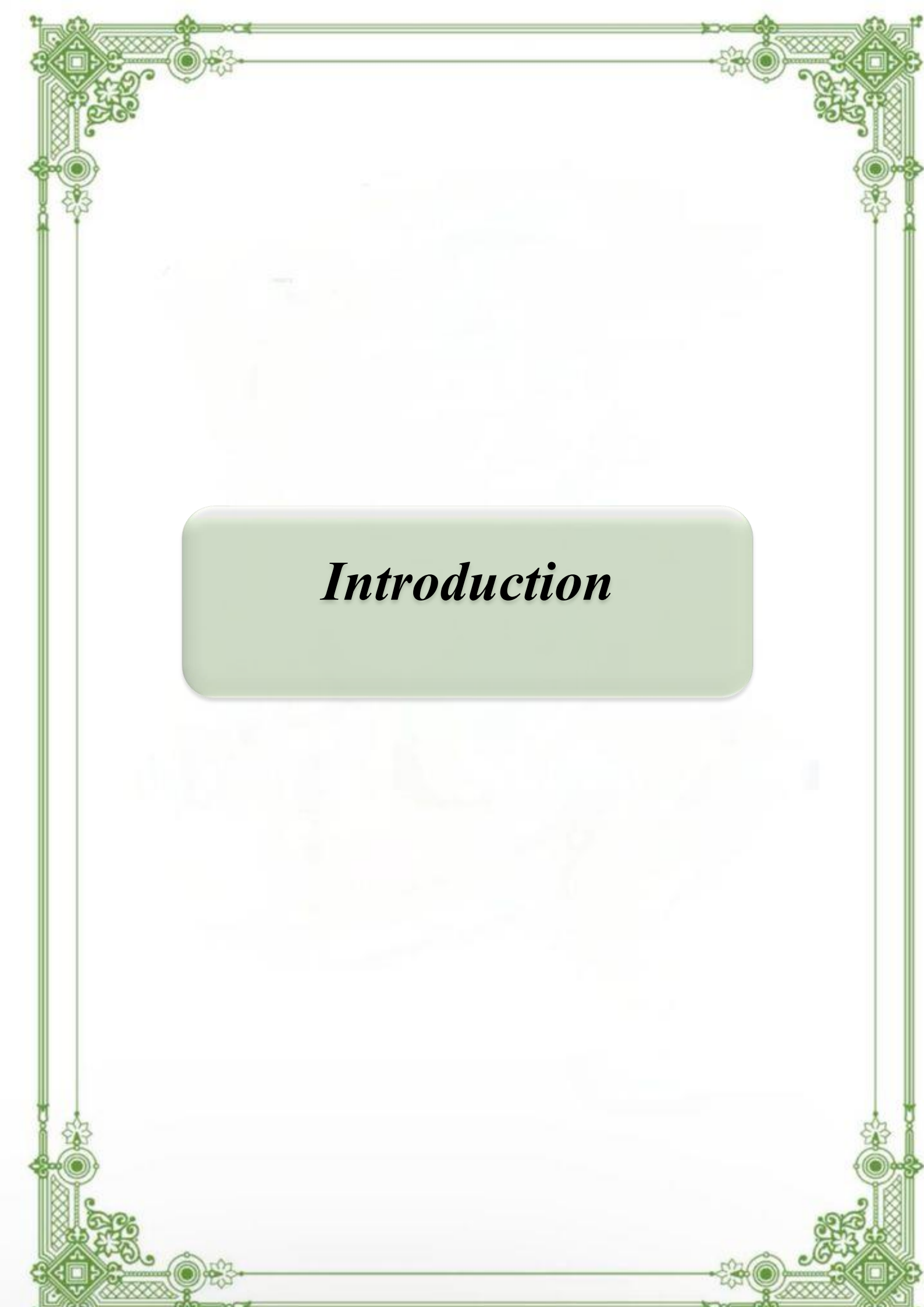
IV.1 Introduction.....	106
IV.2 Sources et préparation des données	106
IV.2.1 Images satellitaires utilisées.....	106
IV.2.2 Données topographiques et environnementales.....	107
IV.2.3 Prétraitement des données spatiales.....	108
IV.3 Élaboration des cartes thématiques	109
IV.3.1 Composition colorée en vraies couleurs (RVB)	109
3. Interprétation et intérêt de la carte.....	111
IV.3.2 Composition colorée fausse couleur RVB	111
IV.3.3 Modèle Numérique de Terrain (MNT)	113
IV.3.4 Carte des pentes	114
IV.3.5 Carte de l'exposition (Aspect)	116
IV.3.6 Carte géologique	117
IV.3.7 Carte du réseau hydrographique	118
IV.3.8 Carte de l'occupation du sol	119
IV.3.9 Calcul et analyse de l'indice SAVI.....	120
IV.3.10 Carte de sensibilité à la désertification (ISD)	122

IV.4 Mobilisation des outils numériques dans l'analyse de la désertification	123
IV.4.1 Rôle des SIG et technologies numériques	123
1. Intégration et gestion des données spatiales.....	123
2. Analyse spatiale et modélisation des phénomènes environnementaux	123
3. Production de cartes thématiques	124
4. Aide à la décision et gestion environnementale	124
IV.4.2 Traitement automatisé des données spatiales.....	124
IV.4.3 Superposition des couches thématiques.....	126
IV.4.4 Identification des zones sensibles à la désertification.....	127
IV.4.5 Élaboration de la carte ISD	128
IV.5 Exploitation statistique et représentation graphique des résultats	129
IV.5.1.Calcul et analyse de l'indice SAVI	133
IV.5.2.Carte du réseau hydrographique	134
IV.5.3.Carte de la sensibilité à la désertification (ISD)	136
IV.6 Intégration des approches numériques intelligentes dans cette étude.....	137
IV.7 Chaîne de traitement réalisée sous ArcGIS	139
IV.8 Conclusion	139

Chapitre V : Analyse et discussion des résultats

V.1 Analyse spatiale des facteurs environnementaux influençant la désertification	142
V.1.1 Influence du couvert végétal sur la sensibilité à la désertification.....	142
V.1.2 Influence du relief et des pentes sur les processus de dégradation	145
V.1.3 Effet de l'exposition sur les conditions microclimatiques	148
V.1.4 Influence des caractéristiques géologiques et pédologiques	150
V.1.5 Rôle du réseau hydrographique dans la dynamique environnementale	153
V.1.6 Relation entre occupation du sol et dégradation des terres	157
1. Structure de l'occupation du sol et implications environnementales.....	157
2. Influence des types d'occupation du sol sur les processus de dégradation.....	158
3. Corrélation entre occupation du sol et carte de sensibilité (ISD).....	158
4. Processus de dégradation liés à l'occupation du sol	159
5. Analyse synthétique et interprétation globale	159
5.2 Analyse de la sensibilité à la désertification	160
5.2.1 Classification des niveaux de sensibilité.....	160
5.2.2 Répartition spatiale des zones vulnérables.....	161

5.2.3 Interprétation de la carte ISD	162
5.2.4 Analyse comparative entre les communes étudiées	163
5.3 Apport des technologies SIG et du traitement numérique dans l'analyse environnementale	164
V.3.1 Contribution des SIG dans l'analyse spatiale.....	165
V.3.2 Apport du traitement automatisé des données.....	165
V.3.3 Limites techniques et méthodologiques	166
V.4 Apport des savoirs écologiques traditionnels dans la lutte contre la désertification.....	167
V.4.1 Rôle des pratiques locales dans la préservation des ressources naturelles.....	168
V.4.2 Complémentarité entre savoirs traditionnels et outils numériques	169
V.4.3 Perspectives d'intégration dans les stratégies environnementales	169
V.5 Discussion générale des résultats	170
V.5.1 Comparaison avec les études antérieures	171
V.5.2 Limites méthodologiques de l'étude	171
V.5.3 Recommandations et perspectives futures	172
V.5.4 Perspectives opérationnelles de lutte contre la désertification.....	173
Conclusion	174
Références Bibliographiques	176



Introduction

Introduction

La désertification représente aujourd'hui l'un des phénomènes environnementaux les plus préoccupants dans les zones arides et semi-arides, en raison de ses impacts directs sur la dégradation des sols, la réduction du couvert végétal et la perturbation des équilibres écologiques. Ce processus complexe résulte de l'interaction entre des facteurs naturels tels que les conditions climatiques, la nature des sols et la morphologie du terrain, et des pressions anthropiques liées aux activités humaines, notamment l'exploitation excessive des ressources naturelles et les pratiques agricoles non durables.

En Algérie, ce phénomène touche particulièrement les régions steppiques et semi-arides, où la fragilité des écosystèmes accentue la vulnérabilité des terres face aux processus de dégradation. La wilaya de Saïda constitue un exemple représentatif de ces dynamiques environnementales, en raison de sa diversité géographique, de la variabilité de son occupation du sol et de l'intensité des pressions exercées sur les ressources naturelles. Cette situation rend nécessaire une analyse approfondie des mécanismes de désertification afin de mieux comprendre son évolution et ses déterminants.

Dans ce contexte, les méthodes traditionnelles d'analyse environnementale montrent certaines limites, notamment en matière de traitement de grandes quantités de données et de compréhension fine des dynamiques spatiales. L'intégration des technologies modernes telles que l'intelligence artificielle et les systèmes d'information géographique offre aujourd'hui de nouvelles perspectives pour améliorer la cartographie, l'analyse et la modélisation des phénomènes de dégradation des terres. En parallèle, les savoirs écologiques traditionnels, issus de l'expérience des populations locales, apportent une dimension complémentaire essentielle pour mieux interpréter les réalités du terrain et les stratégies d'adaptation développées par les communautés.

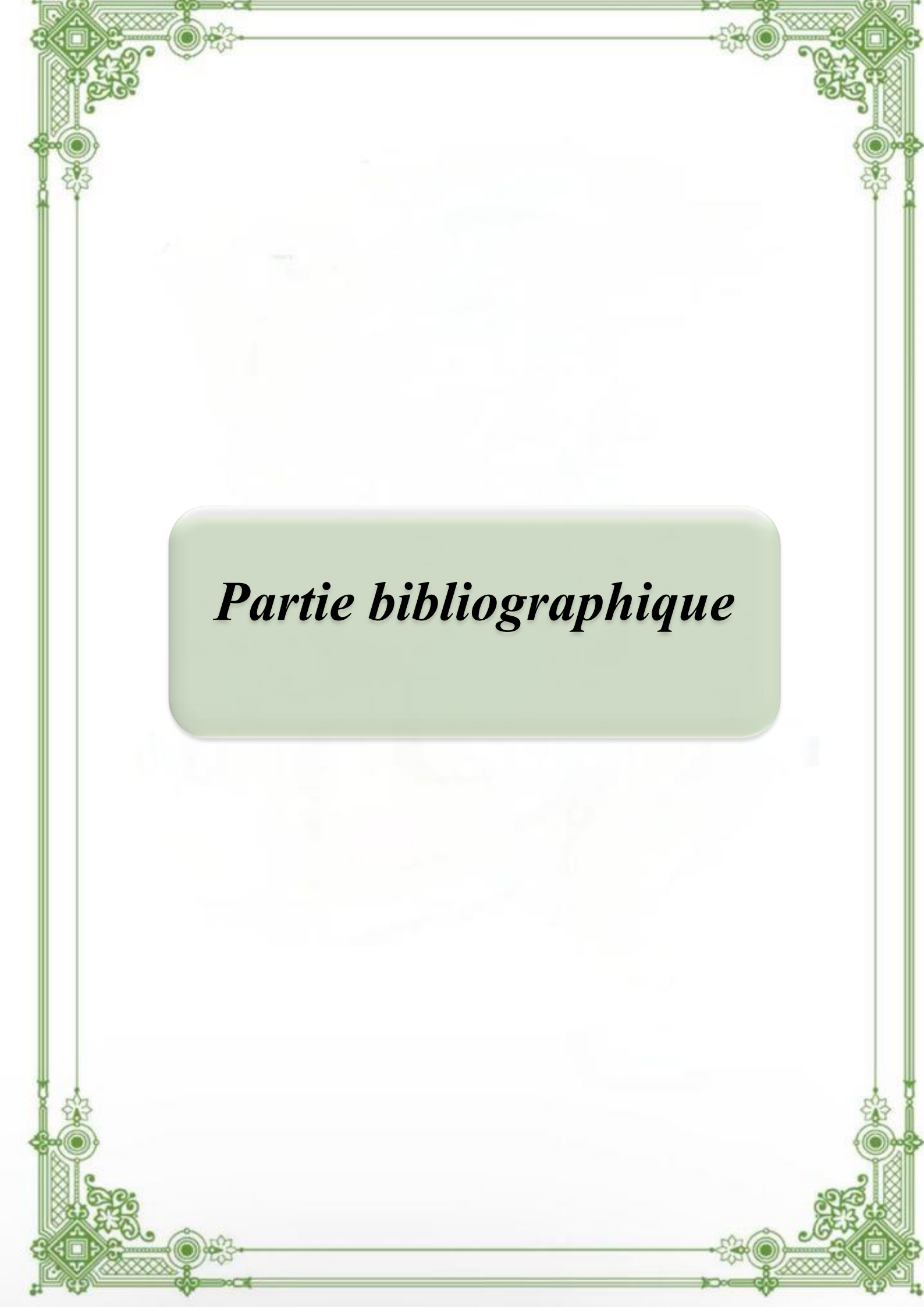
Dans ce cadre, l'approche adoptée dans ce travail repose sur la combinaison de l'intelligence artificielle et des savoirs écologiques traditionnels afin d'améliorer la compréhension globale de la désertification dans la wilaya de Saïda et d'identifier des pistes de gestion plus adaptées aux conditions locales.

La problématique centrale de cette recherche peut être formulée ainsi : dans quelle mesure une approche intégrée mobilisant l'intelligence artificielle et les savoirs

écologiques traditionnels peut-elle contribuer à améliorer l'analyse, la compréhension et la lutte contre la désertification dans les zones semi-arides, en particulier dans le cas de la wilaya de Saïda ?

L'objectif principal de cette étude est d'analyser les facteurs naturels et humains qui influencent la désertification dans la zone d'étude, tout en exploitant les outils de l'intelligence artificielle et de la télédétection pour améliorer la précision de l'analyse spatiale. Il s'agit également d'intégrer les savoirs écologiques traditionnels dans l'interprétation des résultats afin d'obtenir une lecture plus complète et plus proche des réalités locales. L'étude vise en outre à contribuer à la mise en place d'une approche intégrée susceptible de soutenir la prise de décision en matière de gestion durable des terres.

L'intérêt de cette recherche réside dans sa contribution à l'amélioration des méthodes d'analyse environnementale à travers la combinaison des technologies modernes et des connaissances locales. Elle permet également de mieux comprendre les mécanismes de dégradation des terres dans les zones semi-arides et de proposer des approches plus adaptées aux réalités écologiques et socio-économiques de la région étudiée.



Partie bibliographique

***Chapitre I : Cadre théorique et
méthodologique de l'approche
intégrée***

I. Introduction

La lutte contre la désertification dans les zones semi-arides constitue un défi majeur pour la durabilité des écosystèmes et le bien-être des communautés locales. Dans ce contexte, l'approche intégrée, qui combine les avancées technologiques de l'intelligence artificielle (IA) avec les savoirs écologiques traditionnels (SET), apparaît comme une solution innovante et prometteuse. Ce chapitre vise à poser les fondements théoriques et méthodologiques nécessaires à la compréhension et à l'analyse de cette approche.

Il est structuré en trois sections principales. La première section est consacrée à l'intelligence artificielle et à ses applications dans le domaine environnemental, en insistant sur ses techniques, ses origines et son potentiel dans la surveillance et l'analyse des ressources naturelles. La deuxième section explore les savoirs écologiques traditionnels, leur rôle dans la protection des écosystèmes, ainsi que les enjeux liés à leur préservation et à leur transmission intergénérationnelle. Enfin, la troisième section examine les perspectives d'intégration entre intelligence artificielle et savoirs traditionnels, en abordant les modèles théoriques de cohabitation, les enjeux sociaux, éthiques et politiques, ainsi que la méthodologie adoptée pour intégrer ces savoirs dans la lutte contre la désertification.

I.1. Intelligence artificielle et ses applications dans le domaine environnemental

I.1.1 Définitions et origines de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine multidisciplinaire de l'informatique qui vise à concevoir des systèmes capables d'accomplir des tâches nécessitant généralement l'intelligence humaine. Ces tâches incluent la reconnaissance vocale et visuelle, la prise de décision complexe, la traduction automatique, ainsi que l'analyse de données massives pour prévoir des événements ou optimiser des processus. Selon Jean-Gabriel Ganascia, professeur à Sorbonne Université, l'IA représente « l'ensemble des théories et des techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine » (**Ganascia, 2018**) Cette définition souligne que l'IA ne se limite pas à l'automatisation simple mais implique une capacité d'apprentissage et d'adaptation à de nouvelles situations, ce qui est crucial pour son application aux problématiques environnementales.

Les origines de l'IA remontent aux travaux de pionniers tels qu'Alan Turing, qui proposa dès 1950 le célèbre test de Turing afin d'évaluer la capacité d'une machine à exhiber un comportement intelligent équivalent à celui d'un humain. Cependant, c'est en 1956, lors de la conférence de Dartmouth, que le terme « intelligence artificielle » fut formellement introduit par John McCarthy et ses collègues, établissant ainsi le domaine comme une discipline académique à part entière (**Mccarthy,J.Mnsky,M.L.; Rochester, N,& Shannon,C.E, 1956**) Depuis, l'IA a connu plusieurs phases d'expansion et de stagnation, les « hivers de l'IA », marqués par des attentes déçues et une réduction du financement. L'émergence récente de l'apprentissage profond (deep learning) et des réseaux de neurones artificiels, soutenue par la disponibilité massive de données numériques et la puissance de calcul accrue, a conduit à un renouveau significatif, offrant des possibilités inédites pour la gestion et la protection de l'environnement (**LeCun, 2019**)

Dans le domaine environnemental, l'IA constitue un outil stratégique pour la surveillance et la gestion des écosystèmes naturels. Par exemple, les techniques d'apprentissage automatique permettent d'analyser des images satellites et des données SIG (Systèmes d'Information Géographique) pour détecter les changements de couverture terrestre, la déforestation, l'avancée de la désertification et la dégradation des sols. L'IA est également utilisée pour modéliser les impacts du changement climatique sur la biodiversité, prévoir les événements extrêmes comme les sécheresses ou les inondations, et optimiser l'utilisation des ressources naturelles telles que l'eau ou les terres cultivables (**Pachot, A., & Patissier, 2022, pp. 78-102**)

De plus, l'intégration de l'IA avec les savoirs écologiques traditionnels (SET) peut améliorer considérablement la durabilité des pratiques locales. En combinant les connaissances locales sur la gestion des sols, des ressources en eau et de la biodiversité avec les analyses précises et les prévisions offertes par l'IA, il est possible de concevoir des stratégies adaptées aux spécificités des zones semi-arides. Cette approche hybride permet non seulement de détecter les risques de dégradation écologique plus tôt mais aussi de proposer des solutions préventives ou correctives, renforçant ainsi la résilience des communautés face aux changements environnementaux (**Pachot, A., & Patissier, 2022, pp. 105-130**)

En résumé, l'intelligence artificielle ne se limite pas à un outil technologique abstrait. Dans le contexte environnemental, elle représente un levier puissant pour la protection des écosystèmes, la prévention de la désertification et la gestion durable des ressources naturelles. L'intégration de l'IA dans les stratégies environnementales constitue une voie prometteuse pour répondre aux

défis écologiques contemporains, en particulier dans les zones semi-arides comme la wilaya de Saïda.

I.1.2 Techniques principales de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) repose sur un ensemble de techniques et d'approches qui permettent aux machines de simuler certaines capacités cognitives humaines. Ces techniques se classent principalement en plusieurs catégories :

1. L'apprentissage automatique (Machine Learning)

L'apprentissage automatique est une technique fondamentale de l'IA qui permet aux systèmes d'apprendre à partir de données sans être explicitement programmés pour chaque tâche. Cette méthode repose sur des modèles statistiques et des algorithmes capables de détecter des motifs, dégénéraliser des règles et de prédire des résultats futurs. Dans le domaine environnemental, l'apprentissage automatique est utilisé pour la modélisation des écosystèmes, la prédiction des risques de désertification, l'analyse des séries climatiques et la surveillance de la biodiversité à partir de capteurs ou d'images satellites (**Goodfellow, 2016, pp. 210-250**)

2. L'apprentissage profond (Deep Learning)

Le deep learning est une sous-catégorie de l'apprentissage automatique qui utilise des réseaux de neurones artificiels à plusieurs couches pour traiter des données complexes et non structurées telles que les images, les sons et les textes. Ces réseaux permettent de détecter des structures hiérarchiques dans les données et de réaliser des tâches de classification, de reconnaissance et de prévision avec une grande précision. Dans le contexte environnemental, le deep learning est largement utilisé pour l'analyse d'images satellitaires afin de suivre la déforestation, la dégradation des sols, ou encore l'expansion des zones arides (**LeCun, 2019, pp. 130-155**)

3. Les systèmes experts

Les systèmes experts sont des programmes informatiques conçus pour reproduire la capacité de décision d'un expert humain dans un domaine particulier. Ils reposent sur une base de connaissances et un moteur d'inférence pour évaluer des situations et proposer des solutions. Dans le domaine de l'environnement, les systèmes experts peuvent aider à identifier les zones à risque de désertification, à recommander des pratiques agricoles durables ou à planifier la gestion de l'eau et des sols (**Jackson, Introduction to expert systems, 1999, pp. 50-85**)

4. Les algorithmes évolutionnaires

Ces algorithmes s'inspirent des principes de l'évolution biologique, tels que la sélection naturelle et la mutation, pour optimiser des solutions à des problèmes complexes. Ils sont particulièrement utiles pour résoudre des problèmes d'optimisation environnementale, par exemple pour la gestion durable des ressources en eau ou la planification de la reforestation dans les zones dégradées (**Holland, 1992, pp. 105-140**)

5. Méthodes basées sur la logique et les connaissances

Ces méthodes permettent de représenter des connaissances sous forme de règles logiques et d'effectuer des raisonnements déductifs. Elles sont souvent combinées avec d'autres techniques d'IA pour renforcer la prise de décision dans des contextes complexes et incertains, comme la gestion de la biodiversité ou la prévision des catastrophes naturelles (**Nilsson, 1998, pp. 75-110**)

L'application de ces techniques dans le domaine environnemental offre des avantages considérables, notamment la capacité d'analyser de grandes quantités de données écologiques, de détecter des changements précoces dans les écosystèmes et de proposer des stratégies de gestion préventive et durable. L'association de l'IA avec les savoirs écologiques traditionnels (SET) permet également d'élaborer des solutions adaptées aux spécificités locales, tout en maximisant l'efficacité des interventions pour lutter contre la désertification dans les zones semi-arides (**Pachot, A., & Patissier, 2022, pp. 115-140**)

Applications de l'IA dans la surveillance et l'analyse des ressources environnementales

L'intelligence artificielle (IA) s'impose aujourd'hui comme un outil central dans l'observation, l'analyse et la gestion des écosystèmes. Grâce à la capacité de traiter d'énormes volumes de données, l'IA permet de détecter des tendances et des anomalies environnementales qui échappaient aux méthodes traditionnelles. Les données satellites, les capteurs au sol et les observations participatives peuvent être intégrées dans des modèles prédictifs afin de surveiller l'état des sols, la végétation, les ressources en eau et la biodiversité (**Ganscia, 2018**) Cette combinaison favorise la mise en place de systèmes d'alerte précoce face aux risques environnementaux tels que la désertification, les feux de forêt ou la dégradation des terres (**Pachot, A., & Patissier, 2022**)

L'IA ne se limite pas à la collecte des données : elle permet également leur analyse approfondie grâce à des techniques d'apprentissage automatique et de deep learning, qui améliorent la

précision des modèles de prévision. Par exemple, dans le contexte nord-africain, l'IA a été utilisée pour anticiper les zones à risque de désertification en combinant des indices de végétation, des données climatiques et des informations locales sur l'usage des sols (**Benslimane & Mederbal, 2008, p. 23**) Ainsi, l'IA devient un levier stratégique pour la planification environnementale et la gestion durable des ressources naturelles

1- Cartographie de l'occupation et de l'usage des sols (Land Cover / Land Use)

La cartographie de l'occupation du sol constitue l'une des applications les plus avancées de l'IA dans le domaine environnemental. Les algorithmes d'apprentissage supervisé tels que les forêts aléatoires (Random Forest) et les machines à vecteurs de support (SVM) sont utilisés pour classifier automatiquement les images multispectrales et radar issues des satellites Sentinel-2, Landsat ou Planet (**Duberry, 2021, pp. 1-9**). Ces classifications permettent de produire des cartes détaillées représentant l'usage des sols : zones agricoles, forêts, zones urbaines, zones arides ou semi-arides

Avec l'arrivée du deep learning, notamment des réseaux convolutifs (CNN) et des architectures U-Net, il est désormais possible d'améliorer la précision des cartes et de détecter les changements subtils dans la couverture terrestre. Par exemple, la chaîne OSO en France (pôle THEIA) génère annuellement des cartes à 10 mètres de résolution couvrant l'ensemble du territoire métropolitain, intégrant des traitements automatisés basés sur l'IA (**THEIA, 2016**). De plus, ces modèles peuvent combiner plusieurs sources de données (optique, radar, LiDAR) pour améliorer la robustesse des résultats, et permettre un suivi des conversions agricoles, des déforestations saisonnières et de l'expansion urbaine (**Oussedik & Zegrar, 2003, p. 198**)

Les applications locales montrent également l'efficacité de ces techniques. À Mayotte, par exemple, l'intégration d'algorithmes de machine learning et d'approches orientées objet a permis de produire des cartes d'occupation du sol adaptées à l'île, ce qui facilite la planification et la gestion environnementale (**Catalogue, 2023**) L'utilisation de jeux de données de référence, comme AI4LCC (MultiSenGE/MultiSenNA), assure la validation et l'entraînement des modèles IA multimodaux et multitemporels, renforçant ainsi la fiabilité des analyses de changement et des prévisions environnementales.

2- Suivi de la végétation et de la dégradation des terres

L'intelligence artificielle joue un rôle fondamental dans le suivi de la végétation et la détection de la dégradation des terres, particulièrement dans les zones semi-arides. Les modèles IA combinent des séries temporelles d'indices de végétation tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et l'EVI (Enhanced Vegetation Index), avec des variables climatiques (précipitations, température, humidité) afin de distinguer les variations naturelles de la végétation des pressions anthropiques **(Benslimane & Mederbal, 2008, p. 35)** Cette distinction est cruciale pour comprendre les processus de désertification et pour anticiper les zones vulnérables

Les techniques de machine learning et de deep learning permettent de traiter de grandes séries d'images Sentinel-2, Landsat et MODIS, afin de produire des cartes précises de la biomasse, de l'état de la couverture végétale et de l'évolution des habitats. Par exemple, la régression spatio-temporelle et les modèles de rupture (breakpoint detection) sont appliqués pour identifier les zones où la végétation subit un stress hydrique ou une dégradation progressive (Oussedik & Zegrar, 2003, p. 199). Ces analyses sont complétées par des données LiDAR ou radar pour estimer la structure verticale de la végétation, la hauteur de la canopée et la densité des arbres, informations essentielles pour le suivi de la biodiversité et le calcul des stocks de **(INRAE, 2023, p. 17)**

Dans le contexte algérien, notamment dans les régions semi-arides du nord et de l'ouest, ces techniques ont permis de cartographier des gradients de sensibilité à la désertification, identifiant les zones nécessitant une intervention prioritaire. L'IA facilite également la création de systèmes d'alerte précoce pour anticiper la perte de couverture végétale, le dépérissement des herbages et la fragmentation des habitats, tout en guidant les décisions de reforestation ou de protection des sols **(Duberry, 2021, pp. 1-9)**

En intégrant les connaissances locales et les pratiques traditionnelles de gestion des sols et de l'eau, l'IA permet une approche plus complète et contextuelle. Les modèles peuvent croiser des observations de terrain (rôles des communautés locales et savoirs traditionnels) avec des données satellitaires pour proposer des interventions adaptées aux spécificités écologiques et sociales de chaque territoire **(Pachot, A., & Patissier, 2022, p. 102)**

3- Ressources en eau : eaux de surface, qualité et sécheresse

L'intelligence artificielle constitue un outil majeur pour la surveillance et la gestion des ressources en eau, en particulier dans les zones semi-arides où la disponibilité hydrique est limitée et variable. Les modèles IA permettent de combiner des données satellitaires, des mesures in situ et des variables climatiques afin d'évaluer la quantité et la qualité des eaux de surface, ainsi que les risques de sécheresse **(Duberry, 2021)**

Par exemple, l'IA peut détecter automatiquement l'évolution des plans d'eau temporaires, tels que les chotts et les sebkhas, à partir d'images Sentinel-2 et Landsat. Les algorithmes d'apprentissage supervisé et de deep learning analysent les signatures spectrales pour estimer des paramètres de qualité de l'eau, tels que la turbidité, la concentration en chlorophylle-a ou l'oxygène dissous **(Benslimane & Mederbal, 2008)** Ces analyses sont essentielles pour anticiper les périodes de pénurie et optimiser la gestion des retenues d'eau, des barrages collinaires et des systèmes d'irrigation.

En matière de sécheresse, l'IA est utilisée pour modéliser les indices SPI (Standardized Precipitation Index) et SSI (Soil Moisture Stress Index) en reliant les anomalies détectées par satellite aux données climatiques locales. Cette approche permet de prévoir les zones de stress hydrique et d'alerter les gestionnaires avant que la dégradation des sols et la perte de végétation ne deviennent critiques **(Oussedik & Zegrar, 2003, p. 200)**

Les programmes nationaux français, tels que le projet ANR TIMES, illustrent bien l'usage de l'IA multi-source pour suivre les dynamiques hydrologiques et anticiper les risques environnementaux

En outre, les modèles de downscaling et upscaling des précipitations satellitaires permettent d'adapter les données globales à des échelles locales, essentielles pour la planification opérationnelle et la prévention des crises hydriques. La combinaison des données multisources, telles que les points nuageux, les drones, les capteurs au sol et les satellites, permet d'obtenir une vision précise et en temps quasi réel de la disponibilité en eau, favorisant une gestion intégrée et durable **(Pachot, A., & Patissier, 2022, p. 117)**

4- Risques naturels :

L'intelligence artificielle joue un rôle essentiel dans la prévention et la gestion des risques naturels, notamment les feux de forêt, l'érosion des sols et la salinisation, qui constituent des

menaces majeures pour les zones semi-arides. Les modèles IA utilisent des algorithmes d'apprentissage supervisé et de deep learning pour prédire l'aléa feu en analysant des données sur la météo, la structure et la phénologie de la végétation, l'historique des brûlis et la topographie (**Duberry, 2021, pp. 1-9**)

Pour l'érosion des sols, l'IA exploite des paramètres dérivés tels que les pentes, la rugosité, les indices de sol nu et l'humidité de surface radar afin de cartographier les zones les plus vulnérables. De même, pour la salinisation, l'analyse des images satellites et des données in situ permet d'identifier les zones où l'accumulation de sels pourrait compromettre la fertilité des sols (**Benslimane & Mederbal, 2008, p. 49**) ces cartes de risque alimentent la planification des interventions, comme les pare-feux, les reboisements ciblés ou les aménagements anti-érosifs, et orientent les campagnes de terrain des équipes de gestion environnementale

L'IA permet également d'anticiper la combinaison de plusieurs facteurs de risque. Par exemple, en intégrant la variabilité climatique et les pressions anthropiques, les modèles peuvent identifier les zones où la sécheresse combinée à la fragilité du sol augmente le risque d'érosion et de dégradation des habitats (**Pachot, A., & Patissier, 2022**). Les publications francophones de télédétection et de photogrammétrie, ainsi que les retours d'expérience institutionnels, confirment que l'utilisation de l'IA améliore non seulement la fréquence et la précision des cartes de risques, mais facilite également l'élaboration de stratégies locales adaptées aux contraintes écologiques et sociales

Ainsi, l'intégration de l'IA dans la gestion des risques naturels constitue un outil puissant pour réduire la vulnérabilité des écosystèmes et des communautés locales, tout en soutenant les initiatives de planification durable dans les zones semi-arides

5- Biodiversité et suivis écologiques « à haut débit »

L'intelligence artificielle permet aujourd'hui de transformer la surveillance de la biodiversité grâce à l'automatisation et au traitement de grands volumes de données, souvent appelés « données massives » ou big data environnementales. Les techniques d'apprentissage automatique et de deep learning sont utilisées pour identifier automatiquement des espèces animales et végétales à partir de pièges-photos, de vidéos ou de données acoustiques

(bioacoustique). Ces outils permettent non seulement d'accélérer l'inventaire de la biodiversité, mais aussi d'améliorer la précision et la fiabilité des observations (**Duberry, 2021**)

Les données recueillies par télédétection, LiDAR et drones peuvent être combinées avec ces observations pour évaluer l'état des habitats et la qualité des écosystèmes. Par exemple, l'intégration de Sentinel-2, GEDI et d'images à très haute résolution permet de produire des cartes détaillées des variables essentielles de biodiversité (Essential Biodiversity Variables, EBVs) à des résolutions fines, offrant une vision quasi « en temps réel » de la dynamique des populations et de la couverture végétale (**INRAE, 2023**)

L'IA facilite également les analyses spatio-temporelles pour détecter les tendances, les zones de fragmentation et les corridors écologiques. Dans les zones semi-arides, cela permet de suivre les impacts de la désertification sur la biodiversité et d'identifier les zones critiques pour la conservation. La combinaison de données satellitaires, de capteurs au sol et d'observations citoyennes enrichit la qualité des modèles et offre une meilleure intégration entre science et savoirs locaux (**Pachot, A., & Patissier, 2022, p. 145**).

Les programmes français, tels que VertigO, INRAE, Ifremer et MNHN, utilisent ces pipelines IA pour produire des indicateurs fiables, réduire les coûts de suivi et faciliter la participation des citoyens scientifiques. Ces approches permettent de créer des outils de gestion et de planification écologique plus efficaces, tout en améliorant la réactivité face aux menaces environnementales et aux changements rapides de l'écosystème (**LeCun, 2019**)

6- Qualité de l'air et santé environnementale

L'intelligence artificielle joue un rôle de plus en plus important dans le suivi de la qualité de l'air et la protection de la santé environnementale, en particulier dans les zones urbaines et semi-arides où la pollution atmosphérique et les particules fines représentent un risque majeur pour la population. Les modèles IA permettent de combiner des mesures satellitaires, des capteurs au sol et des données météorologiques pour produire des cartes détaillées de concentration en polluants tels que PM_{2,5}, NO₂ ou O₃, avec une résolution spatiale fine adaptée aux interventions locales (**Duberry, 2021**)

L'apprentissage automatique permet de prédire les variations temporelles des polluants et d'identifier les sources principales, qu'elles soient naturelles (poussières désertiques, feux de

forêt) ou anthropiques (trafic, activités industrielles). Les modèles de downscaling appliquent des données globales à l'échelle locale pour affiner la résolution et fournir des évaluations plus précises des zones à risque. Par exemple, en combinant l'opacité des aérosols (AOD) détectée par satellite avec des variables climatiques et l'occupation du sol, l'IA peut générer des cartes horaires ou quotidiennes de pollution, utilisées pour alerter la population et orienter les politiques publiques (**Pachot, A., & Patissier, 2022**)

En parallèle, les systèmes d'IA peuvent évaluer les impacts sanitaires des expositions prolongées aux polluants atmosphériques et identifier les populations vulnérables, contribuant ainsi à la planification d'actions de prévention et de mitigation. Les études françaises récentes et les rapports institutionnels (CESE, ANR) insistent sur la nécessité de mesurer l'empreinte environnementale des systèmes d'IA eux-mêmes, notamment en termes de consommation énergétique et de matériaux, afin de développer des chaînes de traitement « frugales » et durables (**CESE, 2024, p. 22**).

Ainsi, l'intégration de l'IA dans le suivi de la qualité de l'air permet non seulement de générer des informations détaillées pour la santé environnementale, mais également de soutenir des politiques publiques plus efficaces et réactives, en particulier dans les zones vulnérables aux changements climatiques et aux pressions anthropiques

7- Atouts et limites opérationnelles (détails approfondis)

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans la surveillance et l'analyse des ressources environnementales offre de nombreux avantages mais comporte également des limites importantes à considérer pour la planification et la gestion écologique.

A. Atouts principaux

1. Montée en échelle territoriale et temporelle

Les systèmes IA permettent de traiter des volumes massifs de données couvrant des zones très étendues et sur de longues périodes. Par exemple, la chaîne OSO (THEIA) produit chaque année des cartes d'occupation du sol à une résolution de 10 m sur l'ensemble du territoire métropolitain français grâce aux images Sentinel-2. Cette capacité de traitement massif permet de suivre les changements rapides de l'environnement, comme l'urbanisation, la déforestation, ou la dégradation des sols

(THEIA, 2016). En zones semi-arides comme la wilaya de Saïda, cette montée en échelle peut aider à identifier rapidement les zones à risque de désertification

2. Robustesse et fiabilité des données

La combinaison de différentes sources de données, telles que les images optiques, radar, LiDAR et les données in situ, renforce la précision des modèles IA. Cela permet de réduire les erreurs liées à la dépendance à une seule source de données et d'obtenir des cartes plus fiables pour la planification environnementale. Par exemple, en combinant Sentinel-1 et Sentinel-2, les chercheurs peuvent obtenir des cartes détaillées de la végétation et de l'état des sols, essentielles pour anticiper les dégradations (INRAE, 2023) s

3. Automatisation des tâches chronophages

Les modèles IA peuvent fusionner des données très hétérogènes, comme des images satellites, des données climatiques, des observations terrain et des savoirs traditionnels locaux. Cette capacité d'intégration permet de produire des analyses plus complètes et de détecter des phénomènes complexes comme la combinaison de stress hydrique et de pressions anthropiques sur la dégradation des sols (Duberry, 2021)

4. Capacité à intégrer des données multi-sources

Les modèles IA peuvent fusionner des données très hétérogènes, comme des images satellites, des données climatiques, des observations terrain et des savoirs traditionnels locaux. Cette capacité d'intégration permet de produire des analyses plus complètes et de détecter des phénomènes complexes comme la combinaison de stress hydrique et de pressions anthropiques sur la dégradation des sols (Duberry 2021)

B. Limites et défis

1. Dépendance aux données locales et transférabilité limitée

Les modèles IA sont souvent conçus à partir de jeux de données spécifiques à une région. Leur performance peut diminuer lorsqu'ils sont appliqués à des contextes différents ou à des conditions environnementales nouvelles. Cela limite la transférabilité des modèles et nécessite des ajustements locaux

2. Opacité des modèles complexes

Les modèles de deep learning, tels que les réseaux neuronaux convolutifs (CNN), sont souvent considérés comme des « boîtes noires », ce qui rend difficile l'explication des résultats. Cette opacité peut limiter la confiance des décideurs et des gestionnaires dans les recommandations générées par l'IA (CESE, 2024, p. 28)

3. Contraintes d'accès aux données à très haute résolution

Certaines données satellitaires ou aériennes sont privées ou coûteuses, limitant l'accès pour des projets locaux ou universitaires. Cette contrainte peut ralentir la mise en œuvre des analyses et réduire la fréquence de mise à jour des cartes (ARN, 2025, p. 19)

4. Consommation énergétique et impact environnemental de l'IA

Le traitement de données massives consomme beaucoup d'énergie et peut avoir un impact environnemental significatif. Il est donc essentiel de concevoir des architectures informatiques sobres, d'utiliser des infrastructures ouvertes et d'optimiser l'efficacité énergétique des algorithmes pour limiter l'empreinte écologique

C. Retour d'expérience et bonnes pratiques

Des projets français comme One Forest Vision illustrent la possibilité de combiner les super-sites instrumentés, les inventaires forestiers, la télédétection et l'IA tout en impliquant les communautés locales. Ces expériences montrent comment maximiser les bénéfices de l'IA pour la surveillance environnementale tout en prenant en compte les contraintes techniques, sociales et écologiques (INRAE, 2023)

L'adoption de pratiques telles que la validation terrain systématique, la formation des utilisateurs locaux et l'implication des savoirs écologiques traditionnels permet de renforcer l'efficacité des modèles IA et d'améliorer la prise de décision en matière de gestion durable des ressources naturelles

1- Savoirs écologiques traditionnels et leur rôle dans la protection des écosystèmes

Les savoirs écologiques traditionnels (SET) représentent l'ensemble des connaissances, pratiques et croyances développées et transmises par les communautés locales au fil des générations pour gérer et utiliser durablement les ressources naturelles. Ces savoirs, accumulés par l'expérience et l'observation de l'environnement, constituent un patrimoine intellectuel et

culturel précieux qui permet aux populations de s'adapter aux changements environnementaux et de maintenir l'équilibre des écosystèmes. Dans le contexte de la désertification et de la dégradation des sols, notamment dans les zones semi-arides comme la wilaya de Saïda, les SET jouent un rôle complémentaire aux outils modernes de gestion environnementale tels que l'intelligence artificielle.

1-1- Définitions et caractéristiques principales

Les savoirs écologiques traditionnels (SET) désignent l'ensemble des connaissances, pratiques, techniques et croyances accumulées par les communautés locales au fil des générations pour comprendre, gérer et préserver leur environnement naturel. Ces savoirs ne se limitent pas à une simple observation de la nature, mais constituent un système intégré et dynamique qui relie les dimensions écologiques, sociales, économiques et culturelles de la vie communautaire (**Berkes & Folke, 2000**).

les SET sont « un système de connaissances et de pratiques dynamiques, transmises culturellement et élaborées à travers l'expérience directe avec l'environnement » (**Berkes & Folke, 2000**). Ces savoirs permettent aux communautés de comprendre les cycles naturels, prévoir les changements environnementaux et adapter leurs activités en conséquence, garantissant ainsi la durabilité des ressources.

Par exemple, dans les zones semi-arides comme la wilaya de Saïda, les populations connaissent parfaitement les cycles de précipitations, les périodes de sécheresse, les sols les plus fertiles, ainsi que la végétation résistante à l'aridité. Elles savent comment gérer les pâturages pour éviter la surpâturage, comment construire des systèmes d'irrigation traditionnels pour optimiser l'usage de l'eau, et comment planter certaines espèces d'arbres ou de cultures pour limiter l'érosion et restaurer les sols dégradés. Ces connaissances, souvent transmises de manière orale ou pratique, constituent une intelligence environnementale locale, développée sur des siècles d'expérience (**Mistry & Berardi, 2016, pp. 1-6**)

Caractéristiques principales détaillées

1. Empirique et contextuel

Les SET reposent sur des observations précises et une expérience directe avec le milieu naturel. Contrairement aux données scientifiques standardisées, ils sont spécifiquement

adaptés aux particularités locales, telles que le type de sol, le climat, la végétation et la biodiversité. Par exemple, la technique traditionnelle de stockage d'eau dans des citernes enterrées ou de capture de l'humidité matinale peut réduire la pression sur les nappes phréatiques(Mistry & Berardi, 2016)

2. Holistique

Les savoirs traditionnels abordent l'environnement dans sa globalité, en intégrant les interactions entre sols, végétation, eau, climat et faune. Cette approche permet de prendre des décisions adaptées à l'ensemble de l'écosystème, contrairement à certaines méthodes scientifiques qui peuvent se focaliser sur un seul paramètre.

3. Dynamique et évolutif

Bien que qualifiés de « traditionnels », ces savoirs ne sont pas figés. Ils évoluent au fil du temps en intégrant de nouvelles pratiques ou en adaptant les anciennes aux changements climatiques ou aux nouvelles technologies. Par exemple, certaines communautés combinent aujourd'hui les techniques traditionnelles de captage d'eau avec des pompes solaires ou des petits systèmes de goutte-à-goutte pour irriguer efficacement leurs cultures. (Mistry & Berardi, 2016)

4. Transmission orale et pratique

La transmission se fait souvent par l'apprentissage sur le terrain, les contes, les proverbes ou les rituels communautaires. Cette méthode garantit que le savoir est non seulement préservé mais aussi contextualisé et compris dans ses implications pratiques.

5. Interdisciplinarité implicite

Les SET intègrent des connaissances d'agriculture, de climatologie, de géologie, d'écologie et de sociologie. Cette interdisciplinarité permet de prendre en compte simultanément les facteurs environnementaux, économiques et sociaux dans la gestion des ressources naturelles. (Mistry & Berardi, 2016)

6. Adaptabilité et résilience

Les savoirs traditionnels offrent aux communautés une grande résilience face aux aléas naturels. Par exemple, en ajustant le calendrier agricole selon les signes de sécheresse ou en utilisant des

espèces végétales adaptées aux sols pauvres, les populations minimisent les risques de dégradation environnementale et garantissent la sécurité alimentaire.

Les SET représentent un patrimoine vivant et stratégique qui permet de gérer durablement les écosystèmes tout en conservant les pratiques culturelles et sociales locales. Ils sont complémentaires aux outils modernes, comme l'intelligence artificielle et les systèmes de télédétection, et leur intégration peut améliorer significativement la lutte contre la désertification et la dégradation des sols.

Transmission intergénérationnelle des savoirs

La transmission intergénérationnelle des savoirs écologiques traditionnels (SET) constitue un pilier fondamental de la conservation des pratiques durables et de la résilience des écosystèmes locaux. Elle permet non seulement de préserver l'expérience acquise par les générations précédentes, mais aussi de transmettre des valeurs culturelles, sociales et environnementales essentielles pour la gestion durable des ressources naturelles. Cette transmission ne se limite pas à une simple reproduction mécanique des gestes, mais implique un processus complexe d'apprentissage, d'adaptation et d'interprétation des connaissances dans un contexte socio-environnemental spécifique (Berkes F. , 2008)

Modes de transmission

La transmission des savoirs écologiques se réalise par différents canaux, complémentaires et souvent imbriqués (Berkes F. , 2008) :

- 1- **Transmission orale** : Le vecteur principal des SET est la tradition orale. Les anciens utilisent des contes, proverbes, chants, et histoires pour transmettre des leçons écologiques et des stratégies d'adaptation aux contraintes locales. Ces récits intègrent souvent des éléments de codification de la nature et des cycles écologiques, permettant aux jeunes d'acquérir des connaissances pratiques et mémorables. Par exemple, la répartition des pâturages et la gestion des ressources en eau dans les zones semi-arides sont enseignées à travers des récits illustrant les conséquences d'une mauvaise gestion.
- 2- **Apprentissage pratique et observation directe** : L'éducation sur le terrain, par observation et participation aux activités agricoles, pastorales ou forestières, constitue une méthode essentielle. Les jeunes apprennent en impliquant activement leurs sens et leur jugement, en reproduisant les gestes des anciens et en comprenant les interactions complexes entre

l'homme et l'environnement . Cette approche favorise un apprentissage expérientiel, indispensable pour l'adaptation aux changements environnementaux.

- 3- **Transmission rituelle et symbolique** : Certaines connaissances sont transmises via des rituels, cérémonies ou pratiques symboliques qui codifient des règles écologiques. Ces rituels structurent le calendrier agricole ou pastoral et renforcent la mémoire collective, garantissant la mise en œuvre des pratiques durables. Par exemple, l'interdiction saisonnière de couper certaines espèces végétales ou la rotation des pâturages sont souvent associées à des cérémonies traditionnelles (**Berkes F. , 2008**)
- 4- **Supports écrits et numériques** : Avec la modernisation, la documentation écrite (carnets, rapports, études locales) et les outils numériques (bases de données, plateformes éducatives) deviennent des vecteurs complémentaires. Ils permettent de préserver les connaissances et d'élargir l'accès aux savoirs aux générations éloignées des espaces ruraux

Rôle des détenteurs de savoir

Les anciens et leaders communautaires jouent un rôle crucial dans la transmission intergénérationnelle des savoirs écologiques traditionnels. Leur fonction ne se limite pas à enseigner des techniques, mais englobe plusieurs dimensions (**Mistry & Berardi, 2016**)

- 1- **Gardien de la mémoire écologique** : Les détenteurs de savoir conservent l'expérience cumulative des générations précédentes. Ils connaissent les interactions complexes entre les écosystèmes et les pratiques humaines, ce qui leur permet de guider les jeunes dans des contextes environnementaux variables
- 2- **Médiateur social et culturel** : Les anciens structurent le transfert de savoir de manière à préserver l'ordre social et culturel. Ils définissent qui peut accéder à certaines connaissances et comment celles-ci doivent être utilisées, renforçant ainsi l'identité et la cohésion communautaire
- 3- **Formateur pratique** : En encadrant les activités sur le terrain, les leaders communautaires permettent aux jeunes de développer des compétences pratiques, de prendre des décisions éclairées et de comprendre les conséquences de leurs actions sur l'environnement

Facteurs influençant la transmission

Plusieurs variables conditionnent l'efficacité du processus de transmission (**Berkes F. , 2008**) :

- 1- **Motivation et engagement des jeunes** : Les jeunes doivent être activement impliqués pour que l'apprentissage soit significatif. La participation pratique, l'observation et le questionnement favorisent la rétention (**Gadgil & Folke, 1993**) et l'adaptation des savoirs.
- 2- **Reconnaissance sociale et culturelle** : Les savoirs valorisés et respectés sont transmis avec plus de soin et de fidélité. Les communautés qui considèrent leurs connaissances comme un héritage culturel ont plus de chances de les préserver
- 3- **Compatibilité avec l'éducation formelle** : L'intégration ou le conflit avec le système scolaire et les programmes modernes influence la motivation des jeunes et peut soit renforcer soit affaiblir la transmission
- 4- **Disponibilité des ressources matérielles et technologiques** : La documentation, les outils numériques et l'accès à des supports écrits peuvent faciliter la transmission surtout dans les contextes où l'apprentissage oral est limité par l'urbanisation ou la migration

Défis contemporains

La transmission intergénérationnelle des SET fait face à des contraintes majeures dans le monde moderne (**Gadgil & Folke, 1993**)

- 1- **Urbanisation et migration** : Le départ des jeunes vers les villes réduit leur exposition aux pratiques traditionnelles et à l'expérience directe sur le terrain.
- 2- **Pression des systèmes éducatifs modernes** : L'enseignement scolaire axé sur des connaissances scientifiques standardisées peut dévaloriser les savoirs locaux et réduire le temps consacré à l'apprentissage pratique.
- 3- **Perte de langues et d'identités culturelles** : Les savoirs écologiques sont souvent codés dans des langues locales. La disparition de ces langues entraîne la perte d'informations précises sur l'environnement et les pratiques de gestion durable.
- 4- **Changements environnementaux rapides** : La modification des écosystèmes due au climat ou aux activités humaines peut rendre certains savoirs traditionnels obsolètes ou inadaptés, ce qui complique leur transmission

Stratégies pour renforcer la transmission

Pour assurer la continuité et l'efficacité de la transmission, plusieurs stratégies peuvent être adoptées (Mistry & Berardi, 2016) :

- 1- **Éducation communautaire intégrée** : Inclure les SET dans les programmes scolaires, ateliers pratiques et activités extrascolaires afin de combiner apprentissage théorique et expérience pratique.
- 2- **Projets participatifs et collaboratifs** : Développer des initiatives qui combinent savoirs locaux et technologies modernes (SIG, intelligence artificielle, bases de données) pour documenter et analyser les pratiques traditionnelles.
- 3- **Documentation et archivage systématique** : Créer des supports écrits, photographiques, audiovisuels et numériques pour sauvegarder les connaissances et les rendre accessibles à une large audience.
- 4- **Valorisation culturelle et économique** : Mettre en évidence les bénéfices sociaux, culturels et économiques des savoirs traditionnels pour encourager leur apprentissage et leur respect.
- 5- **Encadrement par les leaders communautaires** : Renforcer le rôle des anciens comme mentors et formateurs pour assurer la légitimité et la fidélité des savoirs transmis

1-2- Importance des savoirs locaux dans la gestion durable des ressources naturelles

Les savoirs locaux et écologiques traditionnels (SET) représentent un pilier fondamental pour la gestion durable des ressources naturelles, en particulier dans les zones rurales et semi-arides où les communautés dépendent directement de l'environnement pour leur subsistance. Ces savoirs sont le résultat d'une interaction longue et complexe entre les populations et leurs écosystèmes, intégrant une compréhension fine des cycles écologiques, des comportements de la faune et de la flore, ainsi que des régimes climatiques locaux. Selon Berkes (Berkes F. , 2008) , les SET constituent « un corpus de connaissances, de pratiques et de croyances développées et transmises au fil des générations, qui permet aux communautés de gérer leurs ressources de manière durable ».

La compréhension contextuelle et fine des écosystèmes que procurent ces savoirs locaux est difficile à reproduire par les seules approches scientifiques modernes. Par exemple, les SET permettent aux communautés de détecter des micro-habitats favorables à certaines espèces végétales ou animales, de prévoir les périodes critiques de sécheresse ou d'inondation à travers

l'observation des phénomènes naturels, et de gérer efficacement les sols et les pâturages afin d'éviter l'érosion et la dégradation (**Gadgil & Folke, 1993**) Ces connaissances locales, souvent transmises oralement ou par des pratiques rituelles, assurent une adaptabilité et une résilience écologique que les approches techniques seules ne peuvent garantir.

Dans le domaine agricole et pastoral, les SET offrent des stratégies de gestion durable : rotation des cultures, utilisation de jachères pour préserver la fertilité des sols, techniques d'irrigation adaptées aux contraintes locales, et gestion raisonnée des pâturages pour prévenir le surpâturage. Ces pratiques ont été expérimentées et affinées sur plusieurs générations, ce qui leur confère une efficacité prouvée pour maintenir la productivité des ressources naturelles tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement (**Maffi, 2001, p. 51**) En outre, la combinaison des savoirs traditionnels avec les technologies modernes, telles que les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection, permet d'optimiser la surveillance et la gestion écologique à une échelle plus large, tout en respectant le contexte local.

La préservation de la biodiversité constitue un autre aspect central de l'importance des savoirs locaux. Les communautés locales, grâce à leurs observations et expériences accumulées, identifient les espèces clés pour l'écosystème, évitent la surexploitation des ressources végétales et animales, et maintiennent des corridors écologiques essentiels à la régénération naturelle. Ces pratiques contribuent non seulement à la conservation écologique, mais aussi à la maintenance des services écosystémiques indispensables pour l'agriculture, l'eau et la santé des populations (**Mistry & Berardi, 2016**)

Enfin, l'intégration des SET dans la gouvernance locale et la participation communautaire renforce la cohésion sociale et assure l'acceptabilité des politiques de conservation. Les communautés qui valorisent leurs savoirs traditionnels dans la gestion des ressources montrent souvent une meilleure résilience écologique et sociale, ce qui constitue un atout majeur face aux changements environnementaux et climatiques rapides (**Berkes F. , 2008**) Les savoirs locaux, loin d'être simplement des traditions, sont donc des outils actifs de gestion durable, de planification écologique et de prévention des risques environnementaux.

1-3- Défis liés à la préservation de ces savoirs à l'ère moderne

La **préservation des savoirs écologiques traditionnels (SET)** à l'ère moderne est confrontée à plusieurs défis majeurs qui menacent leur continuité et leur pertinence. Ces défis peuvent être analysés à travers quatre dimensions principales :

Pressions socio-économiques et urbanisation

L'un des principaux défis qui menacent la préservation des savoirs écologiques traditionnels (SET) est la transformation socio-économique rapide et l'urbanisation croissante. Ces changements modifient profondément les modes de vie des communautés rurales et limitent l'accès des jeunes générations aux environnements naturels où les SET sont historiquement transmises. Dans de nombreuses régions semi-arides, la migration rurale vers les villes ou vers des zones industrielles entraîne une rupture de l'apprentissage expérientiel, car les jeunes sont éloignés des terrains agricoles, des forêts ou des pâturages où se pratiquent les techniques traditionnelles de gestion des ressources naturelles (**Berkes F. , 2008**)

La migration économique est souvent motivée par la recherche d'emplois mieux rémunérés, l'accès à l'éducation moderne ou aux services de santé. Cependant, cette mobilité réduit la disponibilité de la main-d'œuvre locale pour les activités traditionnelles telles que la rotation des cultures, la gestion des systèmes d'irrigation ancestraux ou l'entretien des terrasses agricoles, qui sont essentielles à la préservation de la biodiversité et de la qualité des sols

De plus, l'urbanisation rapide entraîne une pression foncière sur les terres agricoles et les écosystèmes locaux, avec des conséquences directes sur les pratiques écologiques traditionnelles. L'expansion urbaine conduit souvent à la fragmentation des habitats et à la conversion des terres agricoles en zones résidentielles ou industrielles, réduisant ainsi les zones où les SET peuvent être appliquées et testées de manière pratique (**Mistry & Berardi, 2016**). Cette situation accentue le risque que les connaissances traditionnelles deviennent obsolètes ou marginalisées, car elles ne peuvent plus être exercées dans leur contexte d'origine.

En parallèle, les transformations socio-économiques modifient la structure sociale des communautés rurales. Les anciens, qui sont les principaux détenteurs des savoirs locaux, voient leur rôle diminué, et la hiérarchie traditionnelle de transmission est perturbée. Les jeunes générations, exposées à des modes de vie urbains et à des systèmes de valeurs différents,

peuvent percevoir ces savoirs comme moins pertinents ou moins attractifs, ce qui contribue à leur perte progressive (**Maffi, 2001, p. 51**)

Face à ces défis, il devient crucial de développer des stratégies qui permettent de maintenir un lien entre les générations, même dans un contexte de mobilité et de modernisation. Cela peut inclure la mise en place de programmes de mentorat entre anciens et jeunes, des ateliers communautaires, ou l'intégration des SET dans des initiatives de développement durable qui valorisent à la fois les connaissances traditionnelles et les objectifs économiques contemporains. Ces mesures contribuent à ce que les savoirs écologiques continuent de jouer un rôle actif dans la gestion durable des ressources naturelles, malgré les pressions socio-économiques et l'urbanisation (**Maffi, 2001, p. 51**)

Standardisation de l'éducation et marginalisation des savoirs locaux

Un autre défi majeur dans la préservation des savoirs écologiques traditionnels (SET) réside dans la standardisation des systèmes éducatifs modernes, qui tend à valoriser les connaissances scientifiques formelles au détriment des savoirs locaux. Dans de nombreux pays, les programmes scolaires sont construits autour de contenus nationaux uniformisés, centrés sur des disciplines académiques comme les mathématiques, les sciences exactes et la technologie. Cette approche réduit la reconnaissance institutionnelle des SET et leur rôle dans la formation des jeunes générations (**Agrawal, 2002, p. 338**)

La marginalisation des savoirs locaux dans l'éducation a plusieurs conséquences. Premièrement, elle crée un écart cognitif entre la connaissance académique et la connaissance traditionnelle, rendant difficile l'intégration des deux systèmes. Les jeunes générations, formées principalement à l'école ou à l'université, peuvent percevoir les pratiques locales comme désuètes ou non pertinentes face aux défis modernes de gestion des ressources naturelles (**Battiste & Henderson, 2002, pp. 42-45**)

Deuxièmement, la standardisation contribue à la perte progressive de compétences pratiques. Par exemple, des techniques traditionnelles de gestion de l'eau, d'agroforesterie ou de préservation des sols, transmises de génération en génération, sont moins enseignées ou pratiquées, car elles ne font pas partie du programme officiel. Cette situation est particulièrement critique dans les zones semi-arides, où ces savoirs sont essentiels pour la résilience écologique et l'adaptation au changement climatique (**Berkes F. , 2008**)

En outre, la standardisation favorise souvent une uniformisation culturelle, réduisant la diversité des approches locales face aux problèmes environnementaux. Les savoirs écologiques traditionnels sont souvent spécifiques à des contextes géographiques et climatiques précis ; leur suppression ou marginalisation peut entraîner une perte de solutions adaptées aux écosystèmes locaux (**Shiva, 2000**)

Pour pallier ces défis, plusieurs stratégies sont proposées. La revalorisation des SET dans les programmes éducatifs peut inclure des modules spécifiques sur la gestion durable des ressources naturelles, des activités pratiques sur le terrain et des échanges intergénérationnels. De plus, l'intégration des savoirs traditionnels dans les projets de développement et les initiatives communautaires permet aux jeunes d'appréhender l'importance de ces connaissances dans la vie réelle, tout en favorisant un dialogue entre science moderne et savoirs locaux (**Berkes F. , 2008**)

Ces mesures contribuent à ce que la transmission et l'application des SET ne soient pas uniquement des pratiques culturelles mais deviennent également des éléments intégrés dans la planification environnementale et la gestion durable des ressources naturelles, garantissant ainsi leur survie face aux pressions éducatives et sociales contemporaines.

Changements environnementaux rapides

Les changements environnementaux rapides représentent un défi majeur pour la préservation des savoirs écologiques traditionnels (SET), car ces connaissances ont été développées et affinées sur des décennies, voire des siècles, dans des contextes environnementaux relativement stables. Avec l'accélération du changement climatique, la désertification, la déforestation, et les modifications de la disponibilité des ressources naturelles, les pratiques traditionnelles peuvent devenir moins efficaces ou inadaptées, ce qui menace leur transmission et leur utilisation (**IPCC., 2014**)

Les zones semi-arides, comme celles concernées par l'étude de cas dans la wilaya de Saïda, sont particulièrement vulnérables. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses perturbe les cycles agricoles traditionnels, modifie la répartition des pâturages et affecte les systèmes hydriques locaux. Dans ce contexte, les SET, qui incluent des techniques de gestion de l'eau, de rotation des cultures, ou de collecte de biomasse, doivent souvent être adaptées rapidement, ce qui peut être difficile pour les communautés locales, surtout

lorsqu'elles manquent de ressources scientifiques ou techniques pour compléter leur savoir **(Berkes F. , 2008)**

De plus, les catastrophes naturelles récurrentes, telles que les tempêtes de sable, les inondations soudaines, ou l'érosion accélérée des sols, compromettent la continuité de l'apprentissage expérientiel. Ces phénomènes peuvent endommager les infrastructures traditionnelles (terrasses, systèmes d'irrigation ancestraux) et réduire la disponibilité des habitats naturels où les pratiques SET sont appliquées **(Folke, 2003, p. 364)**

L'adaptation aux changements environnementaux rapides nécessite donc un mécanisme de flexibilité et de résilience dans la transmission des savoirs. Les communautés doivent ajuster leurs pratiques tout en préservant les principes fondamentaux des SET. Par exemple, l'utilisation de semences locales résistantes à la sécheresse, la diversification des cultures ou l'adoption d'indicateurs environnementaux locaux pour anticiper les risques climatiques sont autant de stratégies qui combinent savoir traditionnel et adaptation aux nouvelles conditions **(Mistry & Berardi, 2016, p. 5)**

En parallèle, l'intégration de technologies modernes, telles que les systèmes d'information géographique (SIG), la télédétection ou même l'intelligence artificielle, peut renforcer l'efficacité des SET. Ces outils permettent de suivre en temps réel la dégradation des sols, la disponibilité de l'eau et les variations climatiques, fournissant ainsi des informations complémentaires qui enrichissent la prise de décision traditionnelle **(Eriksen & Kelly, 2005, p. 158)**

En somme, les changements environnementaux rapides représentent un défi mais aussi une opportunité. Ils obligent les communautés à réviser, adapter et documenter leurs savoirs, tout en encourageant le dialogue entre connaissances traditionnelles et scientifiques, ce qui peut conduire à des approches plus robustes et durables de gestion des ressources naturelles.

Perte de langues et transmission culturelle

La perte de langues locales constitue un obstacle majeur à la préservation des savoirs écologiques traditionnels (SET), car ces connaissances sont souvent codifiées, transmises et interprétées à travers la langue maternelle des communautés. La langue joue un rôle central dans la communication des pratiques agricoles, des techniques de gestion de l'eau, des

calendriers saisonniers et des rituels liés à l'environnement. Lorsque la langue disparaît ou devient minoritaire, les termes précis décrivant des phénomènes naturels ou des procédés écologiques peuvent se perdre, entraînant une dilution du savoir **(Harrison, 2007, p. 7)**

Dans de nombreuses régions semi-arides, comme certaines zones rurales de la wilaya de Saïda, les jeunes générations tendent à adopter des langues dominantes, notamment le français ou l'arabe standard, sous l'influence de l'école, des médias et de la mobilité. Cette transition linguistique réduit l'exposition des enfants aux expressions et concepts locaux, qui contiennent souvent des informations écologiquement pertinentes, telles que les indicateurs de maturité des sols, les cycles de reproduction de certaines espèces ou les stratégies locales de conservation de l'eau **(Grenier, 1998, p. 5)**

La transmission culturelle est intimement liée à la pratique et à l'expérience directe. Les récits oraux, chansons, proverbes et contes sont des vecteurs essentiels de l'enseignement intergénérationnel des savoirs. La disparition de la langue affaiblit ces vecteurs, car la traduction dans une langue dominante peut ne pas transmettre fidèlement les nuances écologiques ou les observations fines des anciens **(Maffi, 2001, p. 433)**

En réponse à ce défi, plusieurs stratégies ont été mises en œuvre pour préserver et revitaliser les langues locales tout en maintenant la transmission des SET. La documentation systématique des langues, la création de lexiques spécialisés en écologie traditionnelle, et l'intégration des langues locales dans les programmes éducatifs permettent de renforcer la transmission culturelle. Par exemple, des projets communautaires dans le Sahel ont montré que l'enseignement bilingue, combinant langue locale et langue nationale, favorise non seulement la conservation linguistique mais aussi la compréhension et l'application des savoirs écologiques **(Berkes F. , 2008, p. 112)**

Par ailleurs, la numérisation et les technologies de l'information offrent des outils modernes pour préserver et diffuser ces savoirs. L'enregistrement audio et vidéo des pratiques traditionnelles, la création de bases de données multilingues et l'utilisation d'applications éducatives interactives permettent de documenter les savoirs dans leur contexte culturel et linguistique, tout en facilitant leur apprentissage pour les jeunes générations **(UNESCO., 2010, p. 28)** technologies, il est possible de préserver les SET tout en les adaptant aux exigences de la modernité et aux changements environnementaux rapides.

5. Conflits avec la modernisation technologique

L'essor rapide des technologies modernes dans la gestion des ressources naturelles a apporté de nombreux avantages, mais il a également créé des tensions importantes avec les savoirs écologiques traditionnels (SET). Ces conflits se manifestent à différents niveaux : culturel, technique et institutionnel. La compréhension de ces tensions est essentielle pour élaborer des stratégies de préservation et d'intégration efficaces.

5.1 Tensions culturelles et sociales

L'introduction des technologies modernes, telles que la télédétection, l'irrigation mécanisée ou les logiciels de modélisation des écosystèmes, peut marginaliser les pratiques locales considérées comme dépassées. Cela entraîne (Agrawal, 2002, p. 412)

- Une **désaffection des jeunes générations** pour les savoirs ancestraux, perçus comme moins efficaces ou prestigieux
- Une **rupture intergénérationnelle**, où les anciens se sentent exclus des décisions environnementales, fragilisant la transmission des SET.
- Une **dévalorisation symbolique** des pratiques locales, ce qui peut conduire à la perte de la mémoire écologique d'une communauté.

Ces tensions montrent que la modernisation technologique ne se limite pas à un problème technique, mais touche aussi les structures sociales et culturelles des communautés.

5.2 Incompatibilités techniques et écologiques

Les technologies modernes ne sont pas toujours adaptées aux spécificités locales. Parmi les principaux conflits (Berkes F. , 2008, p. 127)

- L'irrigation intensive ou l'utilisation d'engins agricoles lourds peut modifier les cycles hydriques, dégrader les sols et perturber les écosystèmes fragiles, contredisant les pratiques durables basées sur l'observation locale
- Les modèles scientifiques avancés nécessitent des compétences techniques que les communautés locales peuvent ne pas posséder, ce qui crée une barrière à l'adoption et accentue la dépendance envers des experts extérieurs.

- L'usage d'équipements et de technologies importés peut être mal adapté au climat, au sol ou à la biodiversité locale, entraînant des résultats non optimaux et parfois contre-productifs.

5.3 Défis liés à la gouvernance et aux politiques

La gouvernance environnementale peut amplifier les conflits entre SET et technologies modernes. Les principaux défis sont (**Agrawal, 2002, p. 6**)

- Les politiques top-down qui privilégient des approches technologiques au détriment des connaissances locales.
- La sous-estimation des savoirs locaux dans la planification et la gestion des ressources naturelles.
- Une perte d'autonomie des communautés dans la prise de décisions, pouvant générer des tensions sociales et des conflits d'usage

Ces conflits montrent que la modernisation technologique, si elle est mal intégrée, peut affaiblir les pratiques durables et la résilience des systèmes socio-écologiques.

6. Stratégies de préservation et adaptation

Face aux conflits entre savoirs écologiques traditionnels (SET) et modernisation technologique, plusieurs stratégies ont été développées pour préserver ces savoirs tout en les adaptant aux exigences contemporaines. Ces stratégies reposent sur la documentation, la transmission, l'intégration technologique et le renforcement institutionnel.

6.1 Documentation et enregistrement

La documentation des SET est une étape cruciale pour éviter leur disparition. Elle comprend (**Berkes F. , 2008, p. 140**)

- **Enregistrements oraux et écrits** des pratiques locales et des connaissances sur les cycles naturels, les sols, l'eau et la biodiversité
- **Création de bases de données numériques** et de cartes SIG permettant de conserver et de visualiser les savoirs à différentes échelles spatiales et temporelles.

- **Archivage multimédia** : photos, vidéos et enregistrements audio qui capturent les techniques de gestion des ressources naturelles.

Ces démarches permettent de transmettre les savoirs aux générations futures et d'offrir un support pour l'intégration dans les projets de développement durable.

6.2 Éducation et transmission intergénérationnelle

La transmission des SET peut être renforcée par (Maffi, 2001, pp. 599-617)

- **Éducation formelle et informelle**, intégrant la langue et les pratiques locales dans les programmes scolaires et communautaires.
- **Ateliers et formations pour les jeunes**, dirigés par les anciens, afin de reproduire les méthodes traditionnelles adaptées aux conditions modernes .
- **Mentorat et apprentissage par l'expérience**, où les jeunes apprennent directement sur le terrain à observer les écosystèmes et à prendre des décisions durables.

Cette approche favorise la continuité culturelle et maintient la pertinence des savoirs locaux face aux changements environnementaux.

6.3 Intégration avec la technologie

L'hybridation des SET avec les technologies modernes permet de combiner savoirs locaux et outils scientifiques pour une gestion plus efficace des ressources (Moller & Kislalioglu, 2004, p. 35)

- **Co-conception de projets** utilisant IA, SIG et drones pour suivre les écosystèmes et la désertification.
- **Systèmes de surveillance participative**, où les communautés locales utilisent des applications numériques pour signaler les changements environnementaux.
- **Adaptation des pratiques traditionnelles** aux défis contemporains, comme le changement climatique et la dégradation des sols .

Cette combinaison permet de tirer parti de la précision scientifique tout en valorisant l'expérience locale, assurant une gestion durable et résiliente.

6.4 Politiques et cadres institutionnels

Pour garantir la durabilité de ces stratégies, les cadres institutionnels jouent un rôle (**Agrawal, 2002, p. 12**)

- **Reconnaissance officielle des SET** dans les politiques de gestion des ressources naturelles.
- **Financement de programmes de documentation et de transmission** des savoirs locaux.
- **Promotion de la co-gestion** des ressources entre communautés et autorités locales, permettant une meilleure adaptation aux besoins écologiques et sociaux

Ces politiques renforcent l'acceptation sociale des SET et facilitent leur intégration dans les projets de conservation et de lutte contre la désertification.

6.5 Résilience écologique et sociale

En combinant documentation, transmission, intégration technologique et cadres institutionnels, les stratégies de préservation permettent :

- La **résilience écologique**, en conservant les pratiques adaptées aux cycles naturels locaux.
- La **résilience sociale**, en maintenant le rôle des communautés locales dans la gestion durable des ressources.
- La **durabilité à long terme**, en conciliant modernisation et savoirs traditionnels pour relever les défis environnementaux contemporains.

2- Intégration entre intelligence artificielle et savoirs traditionnels

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) avec les savoirs écologiques traditionnels (SET) représente une approche innovante et prometteuse pour relever les défis environnementaux contemporains, notamment la lutte contre la désertification dans les zones semi-arides. Alors que l'IA offre des outils puissants pour la collecte et l'analyse massive de données environnementales, les SET apportent une connaissance fine et contextualisée des écosystèmes basée sur l'expérience locale et la transmission intergénérationnelle.

Cette combinaison permet de tirer parti des forces complémentaires des deux systèmes de connaissance, tout en identifiant leurs divergences, leurs limites et les conditions nécessaires à une cohabitation harmonieuse. La recherche de modèles d'intégration efficaces soulève des questions sociales, éthiques et politiques, tout en nécessitant une méthodologie rigoureuse pour fusionner ces savoirs dans la pratique de la gestion durable des ressources naturelles.

2-1- Similarités et différences entre les deux systèmes de connaissance

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et des savoirs écologiques traditionnels (SET) nécessite une compréhension fine de leurs points communs et de leurs divergences, afin de construire des approches de gestion durable plus efficaces et adaptées aux réalités locales.

1. Similarités entre IA et SET (Pachot, A., & Patissier, 2022, p. 45)

1. Observation et compréhension de l'environnement

Les deux systèmes sont fondamentalement centrés sur la compréhension des écosystèmes. L'IA permet l'analyse de grandes quantités de données issues de satellites, capteurs in situ et modèles numériques pour détecter des changements dans les sols, la végétation et l'eau. Les SET, quant à eux, reposent sur l'observation directe de l'environnement, souvent sur de longues périodes, permettant d'identifier les interactions complexes entre éléments naturels, cycles hydriques, saisonnalité des plantes et comportement animal. Ces deux approches convergent donc dans leur finalité : comprendre les dynamiques écologiques pour mieux les gérer. (Pachot, A., & Patissier, 2022, p. 45)

2. Finalité pratique et orientée vers la durabilité

L'IA et les SET visent toutes deux à préserver les ressources naturelles et à anticiper les risques environnementaux. Par exemple, l'IA peut prédire la dégradation des sols ou la progression de la désertification en zones semi-arides, tandis que les SET proposent des pratiques locales éprouvées telles que les techniques de régénération des sols, la rotation des cultures et la gestion durable de l'eau. Cette convergence pratique permet d'envisager une cohabitation fructueuse entre technologie et connaissance traditionnelle.

3. Capacité d'apprentissage et d'adaptation

L'IA apprend à partir des données via des algorithmes de machine learning et de deep learning, améliorant constamment la précision de ses modèles (LeCun, 2019). De

même, les SET évoluent par apprentissage empirique et retour d'expérience sur plusieurs générations, s'adaptant aux variations climatiques et aux changements dans l'environnement local. Cette capacité d'adaptation est un point de convergence essentiel, car elle permet aux deux systèmes de réagir face à des perturbations environnementales.

4. Approche systémique et interdisciplinaire

Les SET adoptent une vision holistique, intégrant connaissances sur la biodiversité, les sols, l'eau et la société locale. De même, l'IA permet de traiter simultanément de multiples variables environnementales (données satellitaires, topographiques, climatiques) et de générer des modèles systémiques de prévision écologique. Ainsi, les deux systèmes partagent une logique d'interconnexion entre les éléments de l'écosystème, même si leurs méthodes diffèrent. (Pachot, A., & Patissier, 2022, p. 45)

2. Différences entre IA et SET

1. Nature et source des données

L'IA repose sur des données quantitatives et numériques, faciles à reproduire et à analyser statistiquement. Les données incluent images multispectrales, mesures climatiques, indices de végétation (NDVI, EVI) et données hydrologiques (INRAE, 2023). Les SET, à l'inverse, utilisent des données qualitatives et contextuelles, transmises oralement et basées sur l'expérience locale (pratiques agricoles, rotation pastorale, gestion de l'eau). Cette différence pose des défis pour la combinaison des deux approches.

2. Méthodologie et traitement de l'information

L'IA applique des méthodes formelles, telles que l'apprentissage automatique, le deep learning et les modèles prédictifs spatio-temporels, tandis que les SET reposent sur l'intuition, l'expérience pratique et la connaissance empirique. Par exemple, un agriculteur local peut détecter un signe précurseur de sécheresse ou de dégradation du sol avant que les modèles numériques ne le prévoient, grâce à l'observation directe des plantes ou des sols.

3. Temporalité et perspective historique

Les modèles IA peuvent traiter des données à différentes échelles temporelles (quotidienne, mensuelle, annuelle, décennale) mais leur efficacité dépend de la disponibilité et de la qualité des données. Les SET, quant à eux, offrent une perspective

historique et longitudinale, intégrant les cycles écologiques sur plusieurs décennies ou générations, ce qui permet d'identifier des tendances de long terme et des réponses adaptatives aux changements climatiques. (Pachot, A., & Patissier, 2022, p. 45)

4. Flexibilité et contextualisation

Les SET sont hautement contextualisés, adaptées à des micro-écosystèmes spécifiques et à des conditions locales particulières. L'IA, bien que très performante, nécessite des calibrations locales pour être efficace, et peut manquer de sensibilité aux nuances micro-environnementales si elle est appliquée de manière générique (Pretty, 2009, p. 22)

5. Modes de validation et fiabilité

La validation des résultats IA repose sur des **indicateurs statistiques et des benchmarks** comparables à grande échelle. Les SET, en revanche, s'appuient sur l'expérience pratique et la reproduction réussie de techniques sur le terrain, ce qui rend leur validation plus empirique et contextuelle.

2-2- Modèles théoriques d'intégration et de cohabitation

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et des savoirs écologiques traditionnels (SET) ne se fait pas de manière intuitive : elle repose sur des modèles théoriques structurés permettant de combiner les forces des deux systèmes tout en respectant leurs spécificités. Ces modèles visent à créer une cohabitation harmonieuse, où les technologies avancées soutiennent et enrichissent les pratiques locales, et non les supplantent.

1. Modèle complémentaire (Complementarity Model) (BERKES, 2012)

Ce modèle repose sur l'idée que l'IA et les SET possèdent des compétences complémentaires. L'IA offre des capacités de traitement massif de données, d'anticipation et de prédiction à grande échelle, tandis que les SET apportent une connaissance fine du terrain, contextualisée et historiquement validée.

Par exemple, dans la lutte contre la désertification en zones semi-arides, l'IA peut identifier des zones à risque via des images satellitaires et des modèles prédictifs (NDVI, indices de sécheresse), tandis que les agriculteurs locaux peuvent confirmer ou ajuster ces résultats en fonction de leur observation directe et de leur expérience des sols et des cycles climatiques .

L'efficacité de ce modèle repose sur la reconnaissance mutuelle des forces et limites de chaque système, ainsi que sur la mise en place de protocoles de communication clairs entre chercheurs et communautés locales.

2. Modèle d'intégration adaptative (Adaptive Integration Model) (Pretty, 2009, p. 22)

Dans ce modèle, l'accent est mis sur l'apprentissage continu et l'adaptation mutuelle. L'IA et les SET interagissent dynamiquement : les données et prédictions fournies par l'IA sont ajustées grâce aux retours des détenteurs de savoirs traditionnels, et les pratiques locales peuvent être optimisées en fonction des nouvelles informations générées par les technologies numériques. Ce modèle s'inscrit dans une logique de co-construction, où chaque itération améliore la précision des interventions environnementales. Par exemple, l'ajustement des pratiques d'irrigation ou de reforestation peut se baser sur les prédictions de stress hydrique fournies par l'IA, tout en tenant compte des observations locales sur l'humidité du sol ou la vigueur des espèces végétales

3. Modèle de cohabitation harmonieuse (Harmonious Coexistence Model (Moller & Kislalioglu, 2004, p. 38)

Le modèle de cohabitation met l'accent sur le respect de l'autonomie de chaque système de connaissance. L'objectif n'est pas de fusionner l'IA et les SET, mais de les faire fonctionner en parallèle, de manière complémentaire.

Par exemple, l'IA peut générer des cartes de dégradation des sols ou de biodiversité à haute résolution, tandis que les communautés locales continuent à appliquer leurs pratiques traditionnelles pour la régénération des sols ou la conservation des espèces. La cohabitation est alors basée sur des protocoles de partage d'information, où les données numériques servent de support décisionnel sans remplacer les savoirs locaux

4. Modèle participatif ou co-construction (Participatory/Co-construction Model)

Ce modèle se fonde sur la participation active des communautés locales dans le processus d'analyse et de décision. Les détenteurs de savoirs traditionnels ne sont pas seulement des consultants, mais des acteurs à part entière du processus.

Par exemple, dans la gestion des ressources en eau ou la lutte contre la désertification, les habitants peuvent identifier les indicateurs clés sur le terrain (zones d'érosion, points d'eau critiques, périodes de sécheresse) qui seront ensuite intégrés dans des modèles prédictifs IA. Cette approche favorise l'appropriation locale et la durabilité des interventions (**Pachot, A., & Patissier, 2022, p. 112**)

5. Modèle d'intégration multi-échelle (Multi-scale Integration Model)

Certaines problématiques environnementales nécessitent des approches multi-niveaux : locale, régionale et globale. L'IA peut traiter des données globales (satellites, modélisation climatique) et fournir des tendances à large échelle, tandis que les SET offrent un niveau local précis et contextualisé.

Ce modèle est particulièrement pertinent pour les zones semi-arides, où la combinaison de données satellitaires, SIG et pratiques locales permet de détecter les changements précoces et de planifier des actions ciblées de restauration écologique (INRAE, 2023, p. 21)

2-3- Enjeux sociaux, éthiques et politiques liés à cette intégration

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et des savoirs écologiques traditionnels (SET) ne se limite pas à une dimension technique ou scientifique. Elle soulève des enjeux sociaux, éthiques et politiques majeurs qui doivent être pris en compte pour garantir la pertinence, la légitimité et la durabilité des interventions environnementales.

1. Enjeux sociaux

Les SET sont profondément ancrés dans les communautés locales et constituent un élément central de l'identité culturelle et sociale des populations. L'introduction de l'IA peut modifier les relations sociales si elle n'est pas accompagnée d'une participation active et équitable des acteurs locaux.

Par exemple, l'utilisation de modèles prédictifs pour la gestion des ressources en eau ou la surveillance de la désertification peut redistribuer le pouvoir décisionnel vers des experts externes, marginalisant les communautés détentrices de savoirs traditionnels (BERKES, 2012, p. 105) La co-construction et le dialogue constant entre chercheurs et populations locales permettent d'atténuer ces risques et de promouvoir l'appropriation locale des outils technologiques.

2. Enjeux éthiques

L'intégration IA – SET soulève également des questions éthiques complexes. L'une des principales est la propriété des connaissances : les données collectées par l'IA peuvent inclure des informations sensibles sur l'environnement, les pratiques agricoles ou les sites sacrés. Le

risque de biopiraterie ou d'exploitation non autorisée est réel si les protocoles de consentement et de protection des savoirs ne sont pas respectés (**Pachot, A., & Patissier, 2022, p. 128**)

Un autre enjeu éthique concerne la transparence et l'explicabilité des modèles IA. Les algorithmes complexes de machine learning ou de deep learning peuvent produire des recommandations difficiles à comprendre pour les communautés locales. Or, pour que l'intégration soit respectueuse et efficace, il est essentiel que les acteurs aient la possibilité de comprendre et contester les décisions suggérées par les systèmes numériques.

3. Enjeux politiques (Pretty, 2009, p. 22)

Au niveau politique, l'intégration IA – SET peut influencer les politiques de gestion des ressources naturelles et de conservation. Les États et institutions internationales doivent établir des cadres réglementaires pour encadrer l'usage des technologies et protéger les droits des communautés locales. Par exemple, dans les projets de lutte contre la désertification en Afrique du Nord, la collecte de données satellitaires et l'analyse IA nécessitent des autorisations et des collaborations avec les autorités locales, tout en respectant les pratiques coutumières et les traditions locales

Les enjeux politiques incluent également la coordination entre différents niveaux de gouvernance : local, régional et national. L'adoption d'outils numériques sans prise en compte des SET peut provoquer des conflits d'intérêts et des tensions autour de l'accès aux ressources ou aux informations environnementales.

4. Vers une intégration responsable

Pour répondre à ces enjeux, les chercheurs et praticiens doivent adopter une approche responsable et inclusive. Cela inclut :

- La consultation systématique des communautés locales avant et pendant le déploiement des technologies.
- L'établissement de protocoles éthiques pour la collecte, le stockage et l'utilisation des données.
- La formation et le renforcement des capacités locales pour permettre l'utilisation autonome des outils numériques.

- La documentation et la valorisation des SET dans les décisions de gestion environnementale.

Ces pratiques garantissent que l'intégration IA – SET n'est pas seulement efficace d'un point de vue technique, mais également socialement acceptable, éthiquement légitime et politiquement soutenable.

2-4- Méthodologie adoptée pour intégrer ces savoirs dans la lutte contre la désertification

L'intégration des savoirs écologiques traditionnels (SET) avec l'intelligence artificielle (IA) dans la lutte contre la désertification représente un défi méthodologique majeur. Elle nécessite une démarche rigoureuse et systématique, alliant recueil de connaissances locales, analyse scientifique et modélisation informatique, afin de proposer des solutions durables adaptées aux spécificités environnementales et sociales des zones semi-arides.

1. Recensement et documentation des savoirs traditionnels

La première étape cruciale consiste à identifier et documenter les SET présents dans les communautés locales. Cela passe par **(BERKES, 2012, pp. 115-120)**

- **Entretiens semi-directifs et focus groups** avec les anciens, les agriculteurs et les éleveurs pour capturer les connaissances sur la gestion de l'eau, la fertilité des sols, la conservation de la végétation et la prévention de l'érosion. Cette approche qualitative permet de mettre en évidence les pratiques efficaces et éprouvées depuis des générations.
- **Observation participante** sur le terrain, permettant aux chercheurs de comprendre les nuances pratiques que les informateurs peuvent omettre lors des entretiens. Cela inclut l'étude des techniques de rotation des cultures, l'usage de haies protectrices ou la gestion des points d'eau saisonniers.
- **Cartographie participative** grâce aux outils SIG et GPS, localisant les zones où les pratiques traditionnelles sont appliquées et évaluant leur impact spatial sur l'environnement. Cette cartographie sert de base à la modélisation ultérieure et facilite la visualisation des zones sensibles à la désertification

2. Collecte et intégration des données environnementales via l'IA

Simultanément, les données environnementales numériques sont collectées et analysées pour compléter et valider les savoirs traditionnels :

- **Télédétection satellitaire** : images multispectrales et radar (Sentinel-2, Landsat, SMOS/SMAP) utilisées pour observer la couverture végétale, les changements de l'usage des sols et l'état de dégradation.
- **Données climatiques historiques et en temps réel** : précipitations, température, humidité, permettant de modéliser les tendances de la désertification et de détecter les facteurs anthropiques et climatiques.
- **Modèles de machine learning et deep learning** : appliqués pour analyser les séries temporelles, prévoir les zones à risque et générer des cartes d'alerte précoces. Les modèles intègrent des paramètres environnementaux et socio-économiques, assurant une modélisation réaliste et contextuelle (Pachot, A., & Patissier, 2022, pp. 142-148)

3. Modélisation hybride IA – SET

Une fois les données collectées, la méthodologie inclut la création de modèles hybrides combinant IA et SET (Pretty, 2009, p. 22)

- Les règles et pratiques traditionnelles sont intégrées dans des algorithmes pour simuler leur impact sur la désertification.
- Les modèles prédictifs IA permettent de comparer l'efficacité des pratiques traditionnelles avec les dynamiques environnementales observées.
- Cette approche permet de détecter les synergies entre savoirs locaux et analyses numériques, mais aussi de mettre en évidence les divergences qui nécessitent des ajustements contextuels.
- Les modèles intègrent également des variables socio-économiques, comme le rôle des communautés locales, les pratiques pastorales et agricoles, et l'impact des décisions politiques sur l'utilisation des ressources naturelles

4. Validation participative et ajustements

Pour garantir la pertinence sociale et culturelle des recommandations, une phase de validation participative est essentielle :

- Les résultats des modèles sont présentés aux communautés locales pour recueillir des retours sur la faisabilité et l'acceptabilité des pratiques proposées.
- Des ajustements itératifs sont réalisés en fonction des contraintes locales, des habitudes culturelles et des connaissances tacites des habitants.
- Cette approche favorise la co-construction de solutions durables, permettant aux communautés de participer activement à la gestion de la désertification et de renforcer leur résilience.

5. Suivi et évaluation continue (FAO, 2016, pp. 12-20)

Enfin, la méthodologie comprend un système de suivi et d'évaluation :

- Utilisation de capteurs, drones et imagerie satellite pour suivre en continu l'évolution des sols et de la végétation.
- Comparaison des données réelles avec les prédictions des modèles hybrides pour ajuster les interventions en temps réel.
- Documentation des pratiques les plus efficaces pour créer une base de connaissances évolutive, qui pourra servir à d'autres régions confrontées à des phénomènes similaires

Conclusion

Le premier chapitre a permis d'explorer les concepts fondamentaux de l'intelligence artificielle et des savoirs écologiques traditionnels, ainsi que leurs applications respectives dans la gestion et la protection des ressources naturelles. L'IA se révèle être un outil puissant pour la surveillance environnementale, l'analyse des sols, de l'eau et de la végétation, tandis que les savoirs locaux assurent des pratiques adaptées aux spécificités culturelles et écologiques des communautés.

L'intégration de ces deux systèmes de connaissance constitue une approche innovante et complémentaire pour lutter contre la désertification. Elle offre non seulement des solutions techniques efficaces, mais elle prend également en compte les dimensions sociales, éthiques et culturelles, garantissant ainsi une gestion durable et participative des écosystèmes.

***Chapitre II : La désertification
dans les zones semi-arides***

Introduction

La désertification constitue l'un des défis environnementaux majeurs auxquels sont confrontées les zones semi-arides, affectant à la fois les écosystèmes et les communautés humaines. Ce phénomène, résultant de l'interaction entre facteurs climatiques et pressions anthropiques, entraîne une dégradation progressive des sols, une diminution de la biodiversité et une réduction des ressources disponibles, en particulier l'eau et la végétation.

Le présent chapitre se propose d'analyser la définition, les causes et les impacts de la désertification, tout en mettant en évidence les stratégies de lutte existantes aux niveaux international et national. L'étude se concentrera sur les indicateurs environnementaux et sociaux de dégradation, les facteurs de vulnérabilité et les politiques mises en œuvre pour prévenir ou limiter la progression de ce phénomène. Cette analyse constitue une étape fondamentale pour préparer l'étude empirique qui sera menée dans la wilaya de Saïda, en intégrant à la fois les données scientifiques modernes et les savoirs écologiques traditionnels.

1- Définition et impacts environnementaux et sociaux de la désertification

La désertification représente un phénomène de dégradation progressive des terres qui affecte particulièrement les zones semi-arides. Elle constitue un enjeu majeur pour l'environnement et le développement durable, en raison de ses conséquences sur les sols, la végétation et les conditions de vie des populations.

1-1- Définitions et types de désertification

La désertification est un phénomène complexe et multidimensionnel, qui se manifeste par la dégradation progressive des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches. Elle résulte de l'interaction de facteurs naturels, tels que la variabilité climatique, les sécheresses prolongées, l'érosion hydrique et éolienne, et de pressions anthropiques, notamment le surpâturage, la déforestation, l'agriculture intensive non durable et l'urbanisation non planifiée (UNCCD, 2017). Ce phénomène affecte directement la fertilité des sols, entraîne la perte de matière organique, la compaction et la salinisation, et conduit à une réduction de la capacité des terres à soutenir la végétation et l'agriculture.

La désertification ne se limite pas aux aspects physiques des sols ; elle englobe également des dimensions écologiques, économiques et sociales. D'un point de vue écologique, elle se traduit

par une diminution de la biodiversité, la disparition d'espèces végétales et animales adaptées aux conditions locales, et une perturbation des cycles naturels de l'eau et des nutriments (**López-Santos & Lana-Renault, 2019, pp. 110-125**) Sur le plan économique et social, elle menace les moyens de subsistance des populations rurales, provoque des migrations environnementales et accroît la vulnérabilité des communautés face aux aléas climatiques.

La désertification est donc considérée comme un obstacle majeur au développement durable, notamment dans les zones semi-arides où les écosystèmes sont fragiles et les ressources naturelles limitées.

La littérature scientifique souligne également que la désertification est un processus dynamique et réversible dans certaines conditions, si des stratégies de gestion durable des terres et de restauration écologique sont mises en œuvre. Par exemple, la restauration de la couverture végétale, la conservation de l'eau et l'utilisation de techniques agricoles adaptées peuvent ralentir, voire inverser, certains processus de dégradation. Cependant, la complexité des interactions entre facteurs naturels et humains rend cette lutte particulièrement difficile, nécessitant une approche intégrée et multisectorielle (**Bai & Schaepman, 2008**)

Ainsi, la désertification peut être conceptualisée comme un phénomène multidimensionnel, combinant des aspects environnementaux, sociaux et économiques, dont la compréhension détaillée est essentielle pour élaborer des politiques de prévention efficaces et pour intégrer des outils modernes, tels que l'intelligence artificielle et les savoirs écologiques traditionnels, dans la surveillance et la gestion des terres affectées.

Types de désertification

La désertification se manifeste sous différentes formes, selon les processus prédominants et les facteurs responsables. La littérature spécialisée identifie généralement trois principaux types de désertification : éolienne, hydrique et anthropique, chacun ayant des causes, des mécanismes et des impacts spécifiques sur les écosystèmes et les communautés humaines.

1. Désertification éolienne

La désertification éolienne se caractérise par l'érosion des sols par le vent, particulièrement dans les zones semi-arides et arides. Les sols dénudés, fragiles et pauvres en matière organique deviennent vulnérables aux vents violents, ce qui entraîne le transport de particules fines sur de

longues distances et la formation de dunes mobiles ou la dégradation des terres cultivables **(Reynolds, 2007, pp. 874-851)** Ce type de désertification est fortement accentué par les pratiques anthropiques telles que le surpâturage, la déforestation et le labour excessif, qui réduisent la couverture végétale protectrice. Les conséquences écologiques incluent la perte de nutriments, la réduction de la capacité de rétention en eau des sols et la perturbation des habitats pour la faune locale.

2. Désertification hydrique

La désertification hydrique résulte de l'action de l'eau, principalement sous forme d'érosion par ruissellement, d'inondations ponctuelles ou de sécheresses prolongées. Les pluies intenses, souvent concentrées sur de courtes périodes, provoquent le lessivage et l'export de la couche arable, accentuant la perte de fertilité des sols **(Bai & Schaepman, 2008, p. 226)** . Dans les zones semi-arides, la gestion inadéquate des ressources hydriques, comme le drainage insuffisant, l'irrigation non durable ou l'absence de couverture végétale, accélère la dégradation. Ce type de désertification impacte non seulement les sols mais également la végétation et les sources d'eau locales, réduisant la résilience des écosystèmes face aux variations climatiques.

3. Désertification anthropique ou socio-économique

La désertification anthropique, également appelée dégradation socio-économique des terres, est directement liée aux activités humaines. Les pratiques agricoles intensives, la surpopulation, l'urbanisation non planifiée, le défrichement et l'exploitation excessive des ressources naturelles contribuent à l'appauvrissement des sols et à la diminution de la biodiversité **(Zribi & Leconte, 2016, p. 49)** Les pressions socio-économiques créent un cercle vicieux où la dégradation des terres limite les opportunités économiques, provoquant des migrations et accentuant la pression sur les ressources restantes. Ce type de désertification illustre l'importance de l'intégration des savoirs locaux et de la gouvernance participative pour prévenir et atténuer la dégradation des terres.

5. Formes mixtes et interactions

Dans la pratique, la désertification résulte souvent de l'interaction de plusieurs facteurs. Par exemple, une sécheresse prolongée combinée au surpâturage et à l'érosion éolienne peut

entraîner une dégradation accélérée des sols et de la végétation. La complexité de ces interactions nécessite des approches multidimensionnelles pour la surveillance et la gestion des terres, intégrant des données climatiques, écologiques et socio-économiques. Ces approches sont renforcées par l'utilisation de technologies modernes telles que l'intelligence artificielle et la télédétection pour cartographier et analyser les zones vulnérables **(Benslimane & Mederbal, 2008, p. 12)**

Ainsi, la compréhension des types de désertification est essentielle pour identifier les zones à risque, choisir les stratégies d'intervention appropriées et développer des politiques de gestion durable des terres. Chaque type de désertification présente des défis spécifiques, mais leur combinaison souligne l'urgence d'une approche intégrée et systémique pour la protection des écosystèmes et la résilience des communautés humaines.

1-2- Indicateurs environnementaux de dégradation des sols

La dégradation des sols est un processus complexe qui affecte non seulement les propriétés physiques et chimiques du sol mais également sa biodiversité et sa capacité à soutenir les écosystèmes. Pour suivre et comprendre cette dégradation, il est crucial d'utiliser des indicateurs environnementaux fiables et variés, capables de refléter les changements progressifs ou accélérés dans les zones affectées par la désertification. Ces indicateurs peuvent être classés en physiques, chimiques, biologiques et spatiaux/intégrés, chacun ayant des méthodes de mesure spécifiques et des implications pour la gestion durable des ressources naturelles. **(Bai & Schaepman, 2008)**

1. Indicateurs physiques

Les indicateurs physiques constituent l'un des piliers principaux pour évaluer l'état et la dégradation des sols dans les zones semi-arides. Ces indicateurs permettent de mesurer directement les changements structurels du sol et de détecter les signes précoces de dégradation, avant même que des effets chimiques ou biologiques ne deviennent apparents. Leur importance réside dans le fait qu'ils reflètent la capacité du sol à soutenir la végétation, à retenir l'eau et à maintenir les fonctions écologiques essentielles. On distingue plusieurs catégories d'indicateurs physiques majeurs, chacune ayant des méthodes de mesure spécifiques et des implications pour la gestion durable des terres. **(Bai & Schaepman, 2008)**

a) Érosion hydrique et éolienne

L'érosion constitue l'un des phénomènes les plus visibles de la dégradation des sols. Elle se manifeste sous deux formes principales :

- **Érosion hydrique** : Provoquée par le ruissellement des eaux de pluie, elle entraîne le transport des particules superficielles et la formation de ravines, réduisant la profondeur utile du sol pour la végétation. L'intensité de l'érosion hydrique dépend de la pente, de la texture du sol et de la couverture végétale. Les méthodes d'évaluation incluent le piégeage des sédiments, les mesures de profondeur de ravines, et plus récemment l'imagerie satellitaire et la photogrammétrie aérienne pour la cartographie à grande échelle (Lal, 2001, pp. 519-539)
- **Érosion éolienne** : Courante dans les zones semi-arides et arides, elle est causée par le vent qui transporte les particules fines, provoquant la dénudation du sol et l'accumulation de dunes. Les indicateurs incluent l'analyse granulométrique du sol, l'observation des dépôts de sable et les mesures de vitesse du vent couplées à des modèles de transport de particules (Bai & Schaepman, 2008, p. 230)

Ces deux formes d'érosion sont souvent interconnectées, et leur suivi régulier est essentiel pour planifier les interventions de restauration et de conservation.

b) Compaction et densité apparente

La compaction du sol réduit la porosité et la capacité d'infiltration de l'eau, affectant directement la croissance des racines et la productivité végétale. Les sols fortement compactés favorisent le ruissellement superficiel et augmentent le risque d'érosion.

- **Mesure de la densité apparente** : Elle se fait en prélevant des carottes de sol et en calculant le rapport masse volumique / volume total. Des seuils critiques de densité sont utilisés pour identifier les sols soumis à un stress mécanique excessif (Benslimane & Mederbal, 2008, p. 15)
- **Impact du surpâturage et des activités agricoles** : L'intensification des pratiques agricoles et l'élevage intensif augmentent la compaction, particulièrement dans les pâturages où le piétinement des animaux réduit la porosité.

La densité apparente et la compaction sont des indicateurs essentiels pour guider les mesures de réhabilitation, comme le paillage, la couverture végétale ou le labour adapté.

c) Couverture végétale et dénudation du sol

La couverture végétale joue un rôle protecteur contre l'érosion et la dégradation. Sa diminution est un indicateur direct de la vulnérabilité du sol (Zribi & Leconte, 2016, p. 55)

- **Indices de végétation** : Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et l'EVI (Enhanced Vegetation Index) sont utilisés pour quantifier la densité et la santé de la végétation à partir d'images satellitaires (Sentinel-2, Landsat). Ces indices permettent d'identifier les zones dégradées, d'analyser les variations saisonnières et de suivre l'évolution sur plusieurs années .
- **Dénudation et fragmentation** : La perte de couverture végétale entraîne la fragmentation des habitats et la réduction de la résilience des écosystèmes. La cartographie des zones dénudées permet d'évaluer la pression anthropique et de planifier les actions de restauration écologique.

Ces indicateurs sont essentiels pour anticiper les risques de désertification et pour adapter les pratiques de gestion durable des sols, en intégrant des mesures préventives et correctives.

2. Indicateurs chimiques

Les indicateurs chimiques des sols jouent un rôle crucial dans l'évaluation de leur fertilité, de leur santé et de leur susceptibilité à la désertification. Alors que les indicateurs physiques mesurent la structure et la compaction, les indicateurs chimiques révèlent les changements dans la composition du sol, sa capacité à retenir les nutriments et son acidité ou alcalinité. Ces paramètres sont essentiels pour comprendre comment les pratiques humaines et les phénomènes naturels affectent la productivité et la durabilité des écosystèmes.

a) pH et acidité/alcalinité du sol (Ferreira & Silva, 2014, p. 112)

Le pH du sol est un indicateur fondamental de sa qualité chimique. Il influence la disponibilité des nutriments essentiels (azote, phosphore, potassium) pour la végétation et la microfaune du sol.

- **Sol acide** : Un pH inférieur à 6 peut limiter la disponibilité de certains nutriments et favoriser la toxicité d'ions tels que l'aluminium.
- **Sol alcalin** : Un pH supérieur à 8 peut provoquer la précipitation du phosphore et réduire la biodisponibilité des micronutriments .

La mesure du pH se fait via des électrodes spécifiques ou des indicateurs colorimétriques, et elle est souvent combinée avec d'autres analyses chimiques pour évaluer la qualité globale du sol.

b) Teneur en matières organiques

La matière organique est un composant clé des sols fertiles. Elle améliore la structure, la capacité de rétention d'eau et la biodiversité microbienne. Une diminution significative de la matière organique est un signe de dégradation avancée (**Lal, 2001, p. 54**)

- **Indicateur de fertilité** : Des sols pauvres en matière organique ont une capacité réduite à supporter la végétation et à stocker le carbone.
- **Sources et gestion** : La matière organique provient de la décomposition de la végétation et des résidus animaux. Les pratiques agricoles et le surpâturage accélèrent sa perte, rendant nécessaire des techniques de compostage, d'agroforesterie et de rotation des cultures

c) Teneur en éléments nutritifs essentiels (Bationo & Kimetu, 2007, p. 87)

Les sols des zones semi-arides peuvent souffrir de carences en éléments essentiels : azote (N), phosphore (P), potassium (K), calcium (Ca), magnésium (Mg) et micronutriments. Ces carences affectent directement la croissance des plantes et la résilience des écosystèmes.

- **Analyse chimique** : Des prélèvements réguliers et des analyses en laboratoire permettent d'évaluer les concentrations de ces éléments et d'adapter les amendements nécessaires.
- **Impacts anthropiques** : L'épuisement dû à l'agriculture intensive, la monoculture ou l'érosion chimique entraîne un appauvrissement rapide du sol, contribuant à la désertification

d) Salinité et alcalinisation (Qadir, 2007, p. 210)

La salinité est un facteur critique dans les zones semi-arides. Une accumulation excessive de sels solubles (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) compromet la croissance des plantes et la biodiversité du sol.

- **Causes naturelles et anthropiques** : La salinisation peut résulter d'évaporation intense, de remontées capillaires ou de pratiques d'irrigation inadaptées.
- **Indicateur de dégradation** : La mesure de la conductivité électrique (EC) et des concentrations ioniques permet d'identifier les zones à risque et de mettre en place des stratégies de drainage et de restauration

3. Indicateurs biologiques

Les indicateurs biologiques des sols sont essentiels pour évaluer l'état écologique et la résilience des écosystèmes face à la désertification. Ils reflètent la diversité, l'abondance et l'activité des organismes vivants (micro-organismes, macrofaune et végétation) dans le sol. Contrairement aux indicateurs physiques et chimiques, les indicateurs biologiques permettent de détecter les changements subtils dans la santé du sol avant que des signes visibles de dégradation ne se manifestent.

a) Diversité microbienne (van Elsas, 2007, p. 215)

La diversité microbienne comprend bactéries, champignons, actinomycètes et protozoaires, qui jouent un rôle crucial dans la décomposition de la matière organique, le cycle des nutriments et la formation de l'humus.

- **Importance écologique** : Une diversité élevée améliore la stabilité et la résilience des sols, en facilitant la récupération après des perturbations climatiques ou anthropiques
- **Méthodes de mesure** : La diversité peut être évaluée via des analyses de l'ADN du sol (séquençage métagénomique), la culture sur milieu sélectif ou les bioindicateurs enzymatiques.
- **Applications** : Ces mesures permettent d'identifier les zones de dégradation avancée ou les sols à fort potentiel de restauration écologique.

b) Faune du sol (Lavelle, 2001, p. 98)

La macrofaune et mésofaune du sol, telles que les lombrics, acariens, collemboles et insectes du sol, influencent la structure, l'aération et la fertilité du sol.

- **Rôle écologique** : La bioturbation par les lombrics favorise l'infiltration de l'eau et la formation de granulats stables. Les acariens et collemboles participent à la fragmentation de la matière organique.
- **Indicateurs de dégradation** : Une diminution significative de la faune indique une perte de fertilité et une vulnérabilité accrue à l'érosion et à la désertification

c) Végétation du sol et couverture végétale

La végétation constitue un indicateur biologique direct de la santé de l'écosystème. Elle influence la protection contre l'érosion, la production de biomasse et le maintien de la biodiversité (Huete, 2002, p. 98)

- **Mesures** : Les indices de végétation (NDVI, EVI) obtenus par télédétection permettent d'évaluer la densité et la vigueur de la couverture végétale sur de vastes zones semi-arides
- **Signes de dégradation** : La régression de la végétation, la perte de diversité des espèces et l'apparition d'espèces envahissantes sont des indicateurs précoces de désertification.

d) Activité enzymatique et biomasse microbienne (Dick, 1994, p. 369)

L'activité enzymatique du sol (phosphatases, déshydrogénases, ureases) et la biomasse microbienne sont des indicateurs sensibles aux changements environnementaux.

- **Utilité** : Ces paramètres permettent de détecter la perturbation des cycles nutritifs avant que les modifications physiques ou chimiques ne deviennent évidentes.
- **Exemples** : Une baisse de l'activité déshydrogénase signale une diminution de la respiration microbienne et de la décomposition organique, ce qui prédit la dégradation progressive du sol

4. Indicateurs combinés et spatiaux

Les indicateurs combinés et spatiaux représentent une approche intégrée qui fusionne plusieurs types de données — physiques, chimiques, biologiques et climatiques — afin d’obtenir une image complète de l’état des sols et des écosystèmes dans les zones semi-arides. Cette approche est particulièrement utile pour la lutte contre la désertification, car elle permet de détecter les processus de dégradation à différentes échelles spatiales et temporelles.

a) Indicateurs combinés

Les indicateurs combinés regroupent des paramètres issus de différentes disciplines pour produire des indices synthétiques. Par exemple (Oldeman, 1991, p. 21)

- **Indice de dégradation du sol (Soil Degradation Index, SDI)** : intègre la texture, la teneur en matière organique, l’érosion et la couverture végétale pour évaluer la santé globale du sol
- **Indice de productivité biologique** : combine la biomasse végétale, la diversité microbienne et l’activité enzymatique pour évaluer la résilience des écosystèmes
- **Indice de stress hydrique** : intègre la précipitation, l’évapotranspiration, la capacité de rétention en eau et l’humidité du sol pour identifier les zones vulnérables à la sécheresse et à la désertification

Ces indices combinés permettent une lecture multidimensionnelle de la dégradation, contrairement aux indicateurs simples qui peuvent ne refléter qu’une seule dimension du phénomène.

b) Indicateurs spatiaux

Les indicateurs spatiaux exploitent la géomatique, la télédétection et les systèmes d’information géographique (SIG) pour cartographier la dégradation à l’échelle régionale, nationale ou globale. Parmi les principaux outils et méthodes (Huete, 2002, p. 85)

- **Télédétection optique et radar** : l’utilisation d’images satellites (Sentinel-2, Landsat, MODIS) permet d’évaluer la couverture végétale, l’érosion des sols et les changements dans l’usage des terres.

- **Indices de végétation (NDVI, EVI)** : mesurent la densité et la vigueur de la végétation sur de grandes surfaces, permettant de détecter précocement les zones stressées ou dégradées
- **Analyse spatiale SIG** : combine les données topographiques, hydrologiques et climatiques pour créer des cartes de vulnérabilité à la désertification et identifier les zones prioritaires pour l'intervention
- **Modèles prédictifs** : l'intégration de l'apprentissage automatique avec les données spatiales permet de prédire l'évolution de la dégradation du sol et d'anticiper les zones à risque

c) Avantages des indicateurs combinés et spatiaux

1. **Vision holistique** : ces indicateurs permettent de prendre en compte simultanément plusieurs facteurs environnementaux et humains.
2. **Détection précoce** : les combinaisons d'indices biologiques, physiques et climatiques détectent les changements avant qu'ils ne deviennent visibles à l'œil nu.
3. **Priorisation des actions** : les cartes spatiales aident les décideurs à identifier les zones nécessitant une intervention urgente et à optimiser l'allocation des ressources

1-3- Impacts sur la biodiversité et les communautés humaines

La désertification constitue une menace majeure pour les écosystèmes et les sociétés humaines, particulièrement dans les zones semi-arides où les ressources naturelles sont déjà limitées. Ses impacts sont multiples, touchant à la fois la biodiversité, les services écosystémiques et la vie des communautés locales.

a) Impacts sur la biodiversité

La désertification entraîne une perte de la diversité biologique, affectant les espèces végétales et animales à plusieurs niveaux (**Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis., 2005, p. 62**)

1. **Réduction de la couverture végétale** : la diminution progressive de la végétation entraîne une perte d'habitat pour de nombreuses espèces. Certaines plantes endémiques, adaptées à des microclimats particuliers, disparaissent rapidement

2. **Diminution de la faune** : la fragmentation des habitats réduit la disponibilité de nourriture et d'abris pour les animaux, provoquant des migrations, un stress écologique et parfois l'extinction locale de certaines espèces
3. **Perturbation des interactions écologiques** : la désertification modifie les cycles de pollinisation, de dispersion des graines et des chaînes trophiques, entraînant un déséquilibre des écosystèmes
4. **Vulnérabilité aux espèces invasives** : les zones dégradées sont plus sensibles à l'invasion par des espèces exotiques, ce qui accentue la perte de biodiversité locale

b) Impacts sur les communautés humaines

Les communautés locales subissent des conséquences directes et indirectes de la désertification, particulièrement celles qui dépendent fortement des ressources naturelles pour leur subsistance (The Global Land Outlook: First edition., 2017, p. 22)

1. **Sécurité alimentaire menacée** : la dégradation des sols et la diminution de la végétation entraînent une baisse des rendements agricoles et pastoraux, affectant l'accès à la nourriture
2. **Pression socio-économique** : la diminution des ressources entraîne une augmentation des conflits pour l'eau et les terres, la migration rurale et la perte de moyens de subsistance traditionnels
3. **Santé humaine** : la désertification favorise l'érosion éolienne, la poussière et la pollution de l'air, ce qui peut causer des maladies respiratoires et des problèmes de santé publique
4. **Dégradation culturelle et sociale** : l'érosion des paysages et des ressources naturelles affecte également les pratiques culturelles et les savoirs traditionnels liés à la gestion des terres et des ressources, compromettant la résilience des communautés

c) Approches pour évaluer ces impacts

Pour comprendre et quantifier ces effets, plusieurs méthodes sont utilisées :

- **Indices de biodiversité** : calcul de la richesse et de l'abondance des espèces végétales et animales.

- **Suivi spatial via SIG et télédétection** : détection des changements dans l'occupation du sol et la couverture végétale.
- **Enquêtes sociologiques et ethnographiques** : étude des perceptions et pratiques des communautés locales face à la dégradation des terres.

Ces approches combinées permettent de saisir l'ampleur des impacts écologiques et sociaux et d'orienter les stratégies de lutte contre la désertification.

2- Causes de la désertification dans les zones semi-arides

La désertification dans les zones semi-arides résulte d'un ensemble complexe de facteurs naturels et anthropiques qui interagissent à différentes échelles spatiales et temporelles. Ces facteurs modifient l'équilibre fragile des écosystèmes, accélérant la dégradation des sols, la diminution de la couverture végétale et la perte de biodiversité. Comprendre les causes de la désertification est essentiel pour identifier des stratégies efficaces de prévention et de gestion durable des ressources naturelles. Ce chapitre examine ces causes en les classant principalement en facteurs climatiques, facteurs anthropiques, et pressions démographiques et urbanisation, afin de fournir un cadre analytique clair pour l'étude des zones semi-arides.

2-1- Facteurs climatiques

Les facteurs climatiques jouent un rôle central dans le processus de désertification, particulièrement dans les zones semi-arides où les écosystèmes sont déjà vulnérables. Ces facteurs incluent la variabilité des précipitations, l'augmentation des températures, l'intensité des vents, et la fréquence accrue des phénomènes extrêmes. La combinaison de ces éléments contribue à la dégradation des sols et à la diminution de la productivité écologique.

a) Variabilité et déficit des précipitations

La sécheresse est l'un des principaux moteurs de la désertification. Dans les zones semi-arides, les précipitations annuelles sont souvent irrégulières et insuffisantes pour maintenir une couverture végétale continue. Les périodes prolongées de déficit hydrique entraînent une réduction de l'humidité du sol, favorisant l'érosion et la perte de matière organique (Nicholson, 2013, p. 41) Les études climatiques menées en Afrique du Nord montrent que les cycles de sécheresse prolongés sont corrélés avec la dégradation des pâturages et la désertification progressive des terres cultivables (Feng, 2013, p. 118)

b) Élévation des températures et stress thermique

L'augmentation des températures moyenne annuelle intensifie l'évaporation de l'eau du sol et des surfaces végétales, réduisant la disponibilité en eau pour les plantes et les activités agricoles. Ce stress thermique entraîne la perte de productivité des cultures et favorise l'apparition de sols nus, vulnérables à l'érosion éolienne et hydrique (**D'Odorico, 2013, p. 51**) Les modèles climatiques prévoient que cette tendance pourrait s'accroître dans les prochaines décennies, amplifiant les risques de désertification dans les zones semi-arides.

c) Épisodes extrêmes : tempêtes de sable et vents violents

Les vents intenses et les tempêtes de sable accentuent l'érosion superficielle des sols, en particulier lorsque la végétation est clairsemée. Ces phénomènes contribuent à la dégradation rapide des sols en emportant les particules fines et en réduisant la fertilité naturelle des terres (**Middleton, 1997, p. 211**) L'exposition répétée à ces événements extrêmes peut transformer des zones marginales en terres impropres à l'agriculture ou au pâturage.

d) Changement climatique global

Le changement climatique global modifie la distribution saisonnière des précipitations et augmente la fréquence des vagues de chaleur, aggravant la vulnérabilité des zones semi-arides. Les projections climatiques pour le Maghreb et l'Afrique du Nord indiquent une baisse significative des précipitations hivernales et un allongement des périodes de sécheresse estivale, ce qui accentue les risques de désertification (**IPCC., Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability., 2022, p. 145**)

2-2- Facteurs anthropiques

Les facteurs anthropiques désignent toutes les activités humaines susceptibles de modifier l'état naturel des sols et des écosystèmes dans les zones semi-arides, accélérant ainsi les processus de désertification. Contrairement aux facteurs climatiques qui échappent partiellement au contrôle humain, ces facteurs peuvent être modulés ou régulés par des politiques environnementales, des pratiques agricoles durables et la gestion des ressources naturelles. Leur étude est cruciale pour comprendre les dynamiques de dégradation et pour proposer des stratégies adaptées de lutte contre la désertification.

a) Surpâturage et pression pastorale (Benslimane & Mederbal, 2008, p. 50)

Le surpâturage, défini comme l'occupation excessive des pâturages par un nombre d'animaux supérieur à la capacité de charge écologique de la terre, constitue l'une des causes principales de la dégradation des sols. Il provoque une réduction significative de la couverture végétale, l'appauvrissement de la matière organique, la compaction du sol et l'accroissement de l'érosion éolienne et hydrique. Ces effets cumulatifs diminuent la fertilité du sol et perturbent l'équilibre des écosystèmes.

Les pratiques pastorales traditionnelles, telles que la rotation inadéquate des pâturages et le pâturage intensif tout au long de l'année, aggravent le phénomène. Selon Reynolds et Stafford Smith, ces pressions entraînent la disparition progressive des espèces végétales les plus sensibles, ce qui réduit la biodiversité et fragilise les communautés locales dépendantes de ces ressources pour leur subsistance.

b) Défrichement et conversion agricole (Ghazoul, 2015, p. 213)

Le défrichement systématique des zones naturelles pour l'agriculture constitue un facteur anthropique majeur. Il entraîne la perte de la couverture végétale, augmente la susceptibilité du sol à l'érosion et modifie les cycles hydrologiques naturels. L'agriculture intensive, combinée à l'usage excessif de produits chimiques tels que les engrais et les pesticides, perturbe les équilibres nutritifs et biologiques du sol.

La transformation des sols naturels en terres cultivables sans techniques de conservation adéquates, comme les terrasses, les bandes enherbées ou le semis direct, accélère la dégradation et contribue à la désertification. Les terres cultivées dans les zones semi-arides deviennent souvent plus vulnérables aux sécheresses, car elles perdent la capacité de stockage en eau et la résilience naturelle face aux perturbations climatiques.

c) Urbanisation et infrastructures (Lambin, 2006, pp. 90-105)

L'expansion des zones urbaines et des infrastructures (routes, industries, bâtiments) provoque l'artificialisation des sols et réduit la surface disponible pour l'agriculture et le pâturage. Selon Lambin & Geist, l'urbanisation modifie le régime hydrique local, fragmente les habitats naturels et contribue à la perte de biodiversité.

Les projets d'urbanisation non planifiés entraînent également un accroissement du ruissellement et de l'érosion des sols périphériques. Les espaces verts et les zones agricoles sont souvent convertis en zones bâties, ce qui accentue l'exposition des sols à la dégradation et limite leur capacité à absorber les précipitations, augmentant le risque d'inondation et de salinisation.

d) Exploitation forestière et incendies

L'exploitation forestière non durable, combinée aux incendies accidentels ou intentionnels, représente un facteur critique de dégradation des sols. La coupe illégale et le prélèvement excessif de bois de chauffe réduisent la capacité des écosystèmes à maintenir la fertilité et l'humidité des sols. Les forêts dégradées sont moins capables de régénérer naturellement, ce qui augmente la vulnérabilité aux phénomènes de désertification (FAO, 2018)

Les incendies, souvent liés à des pratiques agricoles ou pastorales mal maîtrisées, détruisent la biomasse et accélèrent la perte de matière organique, réduisant la capacité du sol à retenir l'eau et à soutenir la végétation, ce qui contribue directement à l'érosion et à la désertification.

e) Pressions socio-économiques et démographiques (UNCCD, The Global Land Outlook: First edition*, 2017, p. 34)

L'augmentation démographique et la croissance des besoins en terres cultivables exercent une pression supplémentaire sur les écosystèmes semi-arides. La fragmentation des terres et l'intensification des pratiques agricoles provoquent une surexploitation des ressources, fragilisant les sols et réduisant la biodiversité

Les migrations vers les zones semi-arides et l'augmentation des populations rurales accentuent la demande en eau, en bois de chauffe et en terres arables, aggravant les processus de dégradation. Les interactions entre la densité humaine, l'exploitation agricole et le pâturage contribuent à créer des cercles vicieux de dégradation environnementale difficile à inverser sans interventions structurées.

2-3- Pressions démographiques et urbanisation

Les pressions démographiques et l'urbanisation constituent des facteurs anthropiques majeurs qui influencent directement la dégradation des sols et la désertification dans les zones semi-arides. L'accroissement démographique, associé à l'extension urbaine rapide, modifie

profondément les usages du sol, réduit les surfaces naturelles et fragilise les écosystèmes déjà vulnérables.

a) Croissance démographique et expansion des besoins en ressources

L'augmentation de la population rurale et semi-urbaine dans les régions arides entraîne une demande croissante en terres cultivables, en pâturages et en ressources en eau (**UNCCD, The Global Land Outlook: First edition*, 2017, pp. 30-45**) chaque hectare supplémentaire exploité pour l'agriculture ou le logement réduit la capacité naturelle du sol à se régénérer, accélérant l'érosion et la perte de fertilité.

Cette pression démographique est souvent combinée à des pratiques agricoles intensives, sans rotation adéquate des cultures ni techniques de conservation des sols. Dans certaines wilayas algériennes, la population rurale a augmenté de près de 25 % au cours des deux dernières décennies, intensifiant la surexploitation des sols et le stress hydrique (**Benslimane & Mederbal, 2008, p. 52**)

b) Urbanisation et transformation des paysages

L'urbanisation rapide conduit à l'artificialisation des sols, à la fragmentation des habitats naturels et à la réduction de la biodiversité. Les zones périphériques des villes sont souvent converties en lotissements, zones industrielles ou infrastructures routières, privant les sols de leur couverture végétale et réduisant leur capacité à absorber les précipitations.

Les travaux de montrent que l'urbanisation non planifiée augmente la vulnérabilité des zones semi-arides aux inondations et à l'érosion, tout en aggravant la pression sur les ressources en eau pour l'usage domestique et agricole. Dans les zones urbaines émergentes, le ruissellement augmente, les nappes phréatiques s'épuisent et la salinisation des sols devient un problème croissant (**Lambin, 2006, p. 98**)

c) Migration et concentration humaine

Les mouvements migratoires internes, notamment des zones rurales vers les villes et villages périphériques, intensifient la pression sur les terres disponibles. La concentration humaine entraîne une exploitation plus intensive des ressources locales, notamment le bois de chauffe, l'eau et les pâturages, créant un cercle vicieux de dégradation.

ces dynamiques démographiques modifient également les pratiques traditionnelles de gestion des terres, en réduisant la transmission des savoirs écologiques locaux et en introduisant des méthodes agricoles moins adaptées aux conditions semi-arides, ce qui amplifie le risque de désertification. **(Reynolds, 2007, p. 115)**

d) Impact combiné sur la désertification

La combinaison de la croissance démographique, de l'urbanisation et des migrations internes accélère les processus de désertification. Les sols deviennent plus vulnérables à l'érosion éolienne et hydrique, les zones cultivables s'appauvrissent rapidement et les écosystèmes naturels subissent un stress important. Les indicateurs de dégradation tels que la réduction de la biomasse, la perte de fertilité et la fragmentation des habitats sont directement liés à ces pressions humaines **(Ghazoul, 2015, p. 128)**

3- Stratégies de lutte contre la désertification aux niveaux international et national

3-1- Conventions et initiatives internationales

La désertification constitue un défi environnemental, économique et social majeur à l'échelle mondiale, affectant des millions de personnes, particulièrement dans les zones arides et semi-arides. La prise de conscience de cette problématique a conduit la communauté internationale à élaborer des conventions, programmes et initiatives qui visent à structurer la coopération entre États, institutions scientifiques, organisations non gouvernementales et communautés locales. Ces instruments visent à harmoniser les stratégies de lutte contre la désertification, à promouvoir la gestion durable des ressources naturelles et à garantir la sécurité alimentaire et hydrique.

1. La Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULD)

Adoptée en 1994 et entrée en vigueur en 1996, la CNULD représente le cadre légal et institutionnel principal de la coopération internationale contre la désertification. Cette convention repose sur trois objectifs stratégiques **(UNCCD, The Global Land Outlook: First edition*, 2017, p. 5)**

1. **Prévention et atténuation de la dégradation des terres** : identification des zones vulnérables, mise en place de systèmes de surveillance et adoption de pratiques de gestion durable.
2. **Restauration des terres dégradées** : reforestation, régénération des sols, protection contre l'érosion et la salinisation.
3. **Participation active des populations locales** : intégration des savoirs écologiques traditionnels et mobilisation communautaire pour l'efficacité des interventions

La CNULD a également introduit des mécanismes d'échange de connaissances et de transfert technologique, permettant aux pays affectés par la désertification d'accéder à des outils scientifiques avancés et à des méthodes innovantes de gestion durable. Ces mécanismes favorisent l'adoption de techniques comme l'irrigation goutte-à-goutte, la surveillance des sols via la télédétection et la mise en œuvre de systèmes d'alerte précoce pour la sécheresse (Toulmin, 2003, p. 22)

2. Initiatives régionales et programmes complémentaires

En parallèle à la CNULD, plusieurs initiatives régionales et programmes complémentaires ont été mis en place (FAO, 2016, p. 33)

- **Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)** : il développe des projets pilotes visant à surveiller la dégradation des sols et à promouvoir la gestion intégrée des ressources naturelles. Ces projets incluent des campagnes de cartographie des zones vulnérables, des projets de reforestation et des actions de sensibilisation des populations locales.
- **Le Fonds pour l'Environnement Mondial (FEM)** : il finance des projets de restauration écologique, de conservation de la biodiversité et de lutte contre la salinisation, particulièrement en Afrique subsaharienne et au Maghreb.
- **Le Partenariat pour la gestion durable des terres arides (Drylands Partnership)** : initiative qui met l'accent sur la collaboration entre scientifiques, ONG et communautés locales pour développer des pratiques agricoles résilientes face au changement climatique et à la dégradation des sols.

Ces initiatives fournissent non seulement des financements et des compétences techniques, mais également des lignes directrices et des normes internationales pour la planification et

l'évaluation des projets de lutte contre la désertification. Elles contribuent à créer un cadre de gouvernance environnementale cohérent à l'échelle régionale et internationale

3. Impacts et pertinence pour l'Algérie

Pour l'Algérie, l'adhésion à ces conventions et la participation à ces initiatives internationales revêtent une importance stratégique majeure. Elles permettent de : **(Benslimane & Mederbal, 2008)**

- Définir des orientations nationales alignées sur les normes internationales, facilitant ainsi la mise en œuvre de programmes de gestion durable des sols et de protection des écosystèmes.
- Accéder à des technologies avancées de suivi environnemental, telles que la télédétection par satellite et les systèmes d'information géographique (SIG), pour cartographier et surveiller la dégradation des terres
- Évaluer l'efficacité des politiques et projets de lutte contre la désertification à travers des mécanismes d'audit et de suivi internationaux, permettant une amélioration continue des stratégies adoptées.

Ainsi, ces conventions et initiatives internationales ne constituent pas seulement un cadre réglementaire, mais offrent également des instruments opérationnels concrets, des réseaux de coopération et des opportunités de financement, tous essentiels pour renforcer l'action nationale contre la désertification et promouvoir une gestion durable des ressources naturelles.

3-2- Politiques et stratégies nationales algériennes

Face à l'ampleur et à la complexité de la désertification, l'Algérie a développé un ensemble de politiques et stratégies nationales structurées sur plusieurs niveaux, afin de répondre aux enjeux environnementaux, sociaux et économiques associés à la dégradation des terres. Ces stratégies combinent législation, programmes opérationnels, partenariats institutionnels et implication des communautés locales. L'approche adoptée est systémique et intégrée, reconnaissant la nécessité de préserver les écosystèmes tout en soutenant le développement humain et agricole.

1. Cadre législatif et institutionnel

La lutte contre la désertification en Algérie s'appuie sur un cadre législatif et institutionnel structuré, conçu pour organiser, coordonner et superviser les actions de protection des sols, de l'eau, de la végétation et de la biodiversité. Ce cadre repose sur des textes de loi nationaux, des plans directeurs, ainsi que sur un réseau d'institutions spécialisées à différents niveaux de compétence.

1.1 Cadre législatif

Le cadre législatif algérien comprend plusieurs textes fondamentaux qui définissent les obligations de l'État, des collectivités locales et des acteurs privés :

- **La loi n° 03-10 du 19 juillet 2003** relative à la protection de l'environnement constitue le texte central régissant la prévention de la dégradation des terres et la lutte contre la désertification. Cette loi définit les responsabilités de chaque acteur dans la préservation des sols, des forêts et des ressources hydriques, en insistant sur la gestion durable des ressources naturelles (Algérienne, 2003)
- **Le décret exécutif n° 06-130 du 9 mai 2006** précise les modalités d'application de la loi environnementale, notamment en matière de suivi et de contrôle des projets de restauration écologique et de reboisement (Algérie..., 2006)
- **Les plans sectoriels** tels que le Plan National de Lutte Contre la Désertification (PNLCD) sont des instruments légaux qui traduisent la loi en programmes concrets, fixant les priorités d'intervention et les indicateurs de suivi

Ces textes législatifs constituent le socle juridique permettant de coordonner les actions environnementales à l'échelle nationale et de garantir la légitimité des interventions des différentes institutions.

1.2 Institutions nationales impliquées

Plusieurs institutions algériennes sont chargées de la mise en œuvre des politiques de lutte contre la désertification ((MEER)..., 2024)

- **Le Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables (MEER)** supervise la politique environnementale nationale, coordonne les projets de restauration écologique et assure le suivi des initiatives internationales dans le pays.
- **L'Agence Nationale de la Conservation des Forêts (ANCF)** joue un rôle central dans la protection des forêts et la reforestation, ainsi que dans la prévention de l'érosion et la régénération des sols dégradés.
- **Le Centre de Recherche Forestière de l'Ouest Algérien** et d'autres centres régionaux apportent l'expertise scientifique et technique nécessaire pour concevoir, évaluer et améliorer les programmes de lutte contre la désertification

Ces institutions travaillent en réseau et coopèrent avec des organismes internationaux, des ONG et les collectivités locales pour renforcer la cohérence des interventions et favoriser l'intégration des savoirs traditionnels dans les stratégies modernes de gestion des sols.

1.3 Coordination et mécanismes de gouvernance

- La gouvernance de la lutte contre la désertification repose sur des mécanismes de coordination interinstitutionnelle et de suivi régulier des projets (**République Algérienne Démocratique et Populaire, 2023**)

Les comités nationaux de pilotage rassemblent les représentants du MEER, de l'ANCF, des universités et des organisations de la société civile pour assurer la planification stratégique et la priorisation des interventions.

- Les mécanismes de suivi et d'évaluation permettent de mesurer l'efficacité des programmes de reforestation, de stabilisation des dunes et de protection des pâturages, tout en identifiant les zones nécessitant des ajustements techniques ou organisationnels.
- L'articulation avec les conventions internationales, telles que la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD), renforce le cadre institutionnel en introduisant des standards internationaux de suivi et d'évaluation

Ainsi, le cadre législatif et institutionnel algérien constitue une base solide pour la mise en œuvre de stratégies intégrées de lutte contre la désertification, en articulant réglementation, expertise scientifique et coordination interinstitutionnelle.

2. Programmes et initiatives opérationnelles

Au-delà du cadre légal et institutionnel, l'Algérie a développé plusieurs programmes et initiatives opérationnelles visant à mettre en œuvre concrètement la lutte contre la désertification. Ces programmes mobilisent des ressources humaines, techniques et financières pour restaurer les sols, protéger la végétation et soutenir les communautés locales vulnérables.

2.1 Programmes nationaux de reforestation et de restauration des sols

L'un des piliers de la lutte contre la désertification en Algérie repose sur la reforestation et la restauration des sols dégradés. Des programmes tels que le Programme National de Lutte contre la Désertification (PNLCD) et le Programme de Reboisement et de Stabilisation des Dunes ont été mis en place pour : **(Direction Générale des Forêts (DGF). . Synthèse du Plan National de Reboisement. Alger : Ministère de l'Agriculture, 2019)**

- Restaurer les sols érodés par le vent et l'eau, notamment dans les zones semi-arides et arides.
- Réhabiliter les pâturages et les zones de parcours pour les activités pastorales.
- Prévenir l'avancée du désert et la perte de fertilité des terres agricoles.

Ces programmes intègrent des techniques modernes de génie écologique, telles que les plantations de haies anti-érosives, le traitement des sols par amendements organiques et l'utilisation de pépinières locales pour produire des plants adaptés aux conditions climatiques régionales

2.2 Initiatives de gestion intégrée des ressources en eau

L'eau étant un facteur limitant crucial dans les zones semi-arides, l'Algérie a lancé des programmes de gestion intégrée des ressources hydriques :

- Construction de retenues collinaires et barrages de petite taille pour capter et stocker l'eau de pluie.
- Techniques d'irrigation optimisées (goutte-à-goutte, micro-aspiration) pour réduire le gaspillage.
- Suivi hydrologique grâce à des stations de mesure et des modèles numériques pour anticiper les périodes de sécheresse

Ces initiatives combinent savoirs locaux (techniques traditionnelles de collecte et de stockage de l'eau) avec les méthodes modernes de gestion hydrique, ce qui permet de maximiser l'efficacité et de renforcer la résilience des communautés rurales.

2.3 Projets de lutte contre la désertification en partenariat avec des acteurs internationaux

L'Algérie collabore également avec des organisations internationales pour renforcer l'efficacité de ses actions (PNUD., 2023)

- **Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD)** : soutien à des projets pilotes de reforestation et de stabilisation des dunes.
- **Union Européenne (UE)** : financement de projets de lutte contre l'érosion et de restauration des terres agricoles vulnérables.
- **FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)** : assistance technique pour la mise en place de systèmes de suivi de la dégradation des sols et la formation des acteurs locaux

Ces partenariats permettent de mobiliser des ressources financières et techniques additionnelles et favorisent l'adoption de meilleures pratiques basées sur l'expérience internationale.

2.4 Implication des communautés locales et des savoirs traditionnels

Un élément clé des initiatives opérationnelles est l'implication des communautés locales. Les programmes encouragent :

- La participation active des agriculteurs et éleveurs dans la reforestation et la gestion des parcours.
- La valorisation des savoirs écologiques traditionnels, par exemple pour l'identification des espèces résistantes à la sécheresse et l'organisation des rotations culturales pour préserver la fertilité des sols.
- La mise en place de formations et de sensibilisations pour promouvoir des pratiques durables

Cette approche participative améliore la durabilité des projets et facilite la co-construction des solutions adaptées aux conditions locales.

3. Approches intégrées et participatives

Les approches intégrées et participatives représentent une dimension essentielle dans la lutte contre la désertification, particulièrement dans les zones semi-arides comme la wilaya de Saïda. Ces approches visent à combiner l'expertise scientifique moderne, les technologies avancées (télédétection, SIG, intelligence artificielle) et les savoirs écologiques traditionnels détenus par les communautés locales afin de développer des stratégies de gestion durable des terres et des ressources naturelles.

3.1 Définition et fondements théoriques

L'approche intégrée se base sur l'idée que la gestion des écosystèmes ne peut se limiter à un seul facteur environnemental ou social. Elle prend en compte l'ensemble des composantes d'un territoire : sols, eau, végétation, climat, et activités humaines. L'intégration consiste à articuler les dimensions écologiques, économiques et sociales afin de garantir une résilience durable face à la désertification. Elle combine également les outils de suivi moderne (données satellitaires, modélisation prédictive) avec les pratiques locales d'utilisation des ressources, créant un dialogue entre science et tradition (**FAO, 2016, pp. 72-88**)

L'approche participative se concentre sur l'inclusion active des populations locales dans toutes les étapes du processus de gestion : identification des zones vulnérables, conception des interventions, mise en œuvre et suivi. **Tschakert (2007)** souligne que la participation locale accroît l'appropriation des projets, réduit les conflits d'usage et améliore l'efficacité des interventions sur le long terme.

3.2 Objectifs et avantages

L'intégration et la participation répondent à plusieurs objectifs stratégiques :

1. **Renforcement de la résilience écologique et sociale** : en combinant la connaissance locale avec les technologies modernes, les communautés peuvent mieux anticiper les risques liés à la sécheresse, à la dégradation des sols ou aux feux de végétation.
2. **Optimisation de l'utilisation des ressources naturelles** : les approches intégrées permettent de planifier de manière rationnelle l'usage de l'eau, la rotation des pâturages et la protection des zones forestières, limitant la surexploitation.

3. **Gouvernance inclusive** : la participation des acteurs locaux (agriculteurs, éleveurs, associations environnementales) renforce la transparence et l'adaptabilité des mesures.

3.3 Méthodes et outils d'intégration

Pour assurer l'efficacité des approches intégrées et participatives, plusieurs outils sont mobilisés : (FAO, 2016, pp. 72-88)

- **Télédétection et SIG** : permettent de cartographier les zones vulnérables et de suivre l'évolution de la dégradation des sols sur plusieurs années.
- **Intelligence artificielle et modélisation** : analyses prédictives pour anticiper l'érosion, la désertification et les risques de perte de biodiversité.
- **Ateliers communautaires et entretiens semi-directifs** : recueil des savoirs locaux, évaluation des pratiques traditionnelles et co-conception des mesures de gestion.

Ces outils combinent données quantitatives et qualitatives, assurant ainsi une vision complète et contextualisée de la dynamique environnementale et sociale.

3.4 Exemples de mise en œuvre

- **Algérie, Wilaya de Saïda** : projets pilotes intégrant la cartographie Sentinel-2 et les savoirs pastoraux pour identifier les zones sensibles à la désertification et planifier des interventions adaptées.
- **Sahel, Burkina Faso** : programmes de restauration de terres dégradées qui associent comités villageois, experts scientifiques et ONG internationales pour développer des solutions durables et acceptées localement.
- **Initiatives internationales** : le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD) promeuvent des approches participatives comme modèles d'intervention adaptative dans les zones arides (UNCCD, *The Global Land Outlook: First edition**, 2017, pp. 101-115)

3.5 Limites et défis

Malgré leurs avantages, ces approches rencontrent plusieurs contraintes :

- **Coordination complexe** entre institutions, ONG et communautés locales.
- **Ressources limitées** pour la formation continue et le suivi des interventions.
- **Différences culturelles et technologiques** : certaines communautés peuvent hésiter à adopter des outils modernes ou à modifier leurs pratiques traditionnelles.
- **Durabilité** : les projets nécessitent un engagement à long terme pour garantir l'efficacité des mesures.

4. Résultats obtenus et limites

L'évaluation des approches de lutte contre la désertification, qu'elles soient internationales, nationales ou locales, permet de dresser un bilan des résultats obtenus tout en identifiant les limites et les défis persistants. Cette analyse est essentielle pour ajuster les stratégies et améliorer la résilience écologique et sociale des territoires affectés. (FAO, 2016, pp. 72-88)

4.1 Résultats obtenus

4.1.1 Amélioration de la couverture végétale et de la fertilité des sols

Les programmes intégrés et participatifs ont permis d'observer une amélioration notable de la couverture végétale et de la fertilité des sols dans certaines zones pilotes. Par exemple, en Algérie, les projets combinant techniques modernes (télédétection, SIG) et pratiques traditionnelles de gestion pastorale ont conduit à une réduction de l'érosion et à un meilleur maintien de la matière organique dans les sols (Benslimane et al., 2008)

4.1.2 Renforcement de la participation communautaire

La participation des communautés locales aux projets de gestion durable des terres a permis un renforcement de la gouvernance locale et une meilleure appropriation des interventions. Les populations ont acquis des compétences en suivi écologique et en gestion des ressources naturelles, améliorant ainsi la durabilité des mesures mises en place

4.1.3 Production de données et outils de suivi

L'utilisation de l'intelligence artificielle et des technologies satellitaires a permis de produire des cartes détaillées de l'occupation des sols, de la couverture végétale et des zones à risque.

Ces outils offrent une vision multi-temporelle et spatiale qui permet de suivre les progrès et d'identifier les zones nécessitant une intervention urgente (UNCCD, 2017)

4.2 Limites et contraintes

4.2.1 Limites techniques

Malgré les progrès, certaines limites techniques persistent. Les modèles prédictifs dépendent fortement de la qualité et de la disponibilité des données locales, et l'accès aux images satellitaires à haute résolution reste parfois restreint. De plus, l'intégration des savoirs traditionnels avec les outils modernes nécessite des méthodologies adaptées, encore en développement dans de nombreux projets (FAO, 2015).

4.2.2 Contraintes institutionnelles et financières

La coordination entre différents acteurs (État, ONG, communautés locales) reste un défi majeur. Les projets sont souvent limités par des budgets restreints, ce qui affecte la durée, le suivi et la pérennité des interventions. L'absence de politiques stables sur le long terme peut également compromettre les résultats obtenus

4.2.3 Défis sociaux et culturels

Certaines communautés peuvent hésiter à modifier leurs pratiques traditionnelles ou à adopter de nouvelles technologies, ce qui limite l'efficacité des interventions. La diversité culturelle et les différences dans la perception du risque environnemental nécessitent des approches adaptatives et contextuelles pour maximiser l'adhésion locale (Benslimane et al., 2008)

4.3 Perspectives et recommandations

Pour améliorer l'efficacité des stratégies de lutte contre la désertification, il est recommandé de (Reij, 2009)

1. **Renforcer les capacités locales** : formation continue des acteurs locaux à la gestion durable des terres et aux outils technologiques.
2. **Améliorer la collecte et le partage des données** : développer des bases de données ouvertes et accessibles pour la planification et le suivi.

3. **Favoriser l'intégration science-tradition** : combiner les savoirs écologiques traditionnels avec les technologies modernes pour des solutions plus contextualisées.
4. **Assurer un financement stable et durable** : garantir la continuité des projets sur le long terme pour consolider les résultats obtenus.

3-3- **Évaluation des forces et faiblesses des approches existantes**

L'analyse des stratégies de lutte contre la désertification, à la fois au niveau international et national, permet de dresser un bilan critique des forces et limites des approches mises en œuvre. Cette évaluation est essentielle pour identifier les bonnes pratiques, les lacunes, et proposer des ajustements adaptés aux contextes écologiques et socio-économiques spécifiques.

1. Forces des approches existantes

L'évaluation des approches actuelles de lutte contre la désertification révèle un certain nombre de points forts qui contribuent à l'efficacité et à la durabilité des interventions. Ces forces concernent principalement l'intégration multidimensionnelle des approches, la participation des communautés locales et la disponibilité de données fiables pour le suivi environnemental.

1.1 Approches intégrées et multidimensionnelles

L'un des principaux atouts des stratégies existantes réside dans leur capacité à combiner plusieurs dimensions de l'action environnementale. Les approches intégrées permettent de considérer simultanément les aspects écologiques, économiques et sociaux, favorisant ainsi des interventions plus cohérentes et adaptées aux complexités des écosystèmes vulnérables (**Le Houérou, 2000, p. 45**) Par exemple, la Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification (CNULCD) fournit un cadre pour coordonner les actions au niveau mondial, en combinant les programmes de restauration des sols, la prévention de l'érosion et le soutien aux moyens de subsistance des communautés locales (**UNCCD, The Global Land Outlook: First edition*, 2017**) Cette approche multidimensionnelle est essentielle pour anticiper les effets indirects de la désertification et pour réduire les conflits d'usage des terres.

1.2 Participation communautaire et appropriation locale

La participation des populations locales constitue un facteur déterminant de succès. Les projets qui incluent les communautés dans la planification, la mise en œuvre et le suivi des

interventions favorisent l'appropriation des mesures et renforcent la résilience sociale , La reconnaissance et l'intégration des savoirs écologiques traditionnels permettent d'adapter les solutions aux pratiques locales et aux conditions environnementales spécifiques. Les expériences en Afrique du Nord et dans le Sahel ont montré que les programmes de restauration participative, lorsqu'ils sont bien conçus, augmentent la durabilité des projets et réduisent les risques de rejet par les populations concernées **(Behnke, 2011, p. 63)**

1.3 Production et utilisation de données fiables

L'accès à des données environnementales précises et actualisées constitue une autre force majeure des approches modernes. L'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG), des images satellitaires et des modèles d'intelligence artificielle permet de cartographier les zones vulnérables, de suivre les changements dans la couverture végétale et d'évaluer l'efficacité des mesures de lutte contre la désertification **(Rossi, 2014, p. 186)** Ces outils fournissent des indicateurs fiables pour la planification et la gestion des ressources naturelles, tout en permettant une analyse spatio-temporelle fine des dynamiques environnementales.

2. Faiblesses et limites des approches existantes

Malgré les forces reconnues, les stratégies de lutte contre la désertification présentent également des faiblesses qui limitent leur efficacité et leur durabilité. Ces limites concernent principalement la dépendance aux financements externes, les contraintes techniques et méthodologiques, les limites institutionnelles et les défis socio-culturels.

2.1 Dépendance aux financements externes

Un des principaux obstacles à la pérennité des projets réside dans la forte dépendance aux financements internationaux ou nationaux, souvent instables et temporaires. Cette dépendance fragilise la continuité des interventions et réduit la capacité des communautés locales à maintenir les actions de restauration des sols ou de gestion des ressources naturelles à long terme **(Mortimore, 2009, p. 101)** En Algérie comme dans plusieurs pays semi-arides, les programmes financés par l'ONU ou par l'Union Européenne ont parfois été interrompus à cause de contraintes budgétaires ou de changements politiques, ce qui affecte directement la durabilité des acquis sur le terrain **((FIDA)., 2023)**

2.2 Limites techniques et méthodologiques

Les approches actuelles sont parfois limitées par des contraintes techniques et méthodologiques. L'utilisation de modèles prédictifs, d'images satellitaires et de SIG exige des compétences spécialisées, souvent absentes au niveau local, et peut se heurter à des données incomplètes ou peu actualisées (**Benslimane & Mederbal, 2008**). De plus, l'intégration des savoirs traditionnels avec les méthodes scientifiques modernes reste encore peu systématisée, ce qui entraîne un déficit de cohérence et de fiabilité dans l'analyse des dynamiques environnementales.

2.3 Contraintes institutionnelles et coordination

Les limites institutionnelles représentent un autre facteur de fragilité des interventions. La multiplicité des acteurs étatiques, non étatiques et communautaires engendre souvent un manque de coordination, des chevauchements d'actions et des conflits de compétence (**UNCCD, The Global Land Outlook: First edition*, 2017**). L'absence d'une structure centrale de gestion intégrée et d'une politique claire pour harmoniser les efforts limite l'efficacité des projets, surtout dans les zones périphériques et isolées où la désertification est la plus marquée.

2.4 Défis socio-culturels

Enfin, les facteurs socio-culturels constituent un défi important. Les changements rapides dans les modes de vie, l'exode rural, et la perte progressive des savoirs écologiques traditionnels réduisent la participation effective des communautés (**Reij, 2009**). L'adoption des techniques modernes peut se heurter à des résistances culturelles ou à un manque de sensibilisation, compromettant ainsi la durabilité des projets de lutte contre la désertification.

3. Perspectives d'amélioration

Pour répondre aux limites identifiées dans les approches actuelles de lutte contre la désertification, plusieurs perspectives d'amélioration sont envisagées. Ces recommandations visent à renforcer l'efficacité, la durabilité et l'appropriation locale des stratégies de gestion des terres dans les zones arides et semi-arides.

3.1 Renforcer la coordination institutionnelle

La coordination entre les différentes institutions publiques, ONG, agences internationales et communautés locales est un facteur clé pour assurer une action cohérente et intégrée. La création de plateformes interinstitutionnelles permettrait de partager les informations, harmoniser les interventions et réduire les chevauchements de projets (**UNCCD, The Global Land Outlook: First edition*, 2017, p. 42**) L'expérience du Maroc et du Burkina Faso a montré que des comités de pilotage multi-acteurs permettent d'optimiser les ressources et d'assurer un suivi régulier des initiatives de lutte contre la désertification

3.2 Assurer la durabilité financière

La pérennité des projets nécessite des mécanismes financiers stables et diversifiés. Il est recommandé de combiner financements publics, fonds internationaux et contributions communautaires pour réduire la dépendance aux aides externes (**FAO, 2016, p. 89**). L'instauration de fonds dédiés à long terme et l'intégration des activités génératrices de revenus au sein des projets (agroforesterie, pâturage durable, éco-tourisme) contribuent également à renforcer l'autonomie financière des communautés locales.

3.3 Intégrer pleinement les savoirs locaux et traditionnels

La reconnaissance et l'intégration des savoirs écologiques traditionnels permettent d'adapter les stratégies de lutte contre la désertification aux contextes locaux. Les connaissances sur la rotation des cultures, la gestion des pâturages, l'identification des espèces résistantes à la sécheresse ou la conservation de l'eau de pluie offrent des solutions efficaces et éprouvées (**Reij, 2009, p. 36**). L'implication active des communautés dans la conception et la mise en œuvre des projets garantit non seulement l'acceptabilité sociale, mais aussi l'efficacité des interventions.

3.4 Renforcer les capacités techniques locales

Le renforcement des capacités locales constitue un levier essentiel pour améliorer la collecte, l'analyse et l'utilisation des données environnementales. La formation des techniciens locaux aux systèmes d'information géographique (SIG), à la télédétection et aux techniques de gestion durable des sols permet de renforcer l'autonomie des communautés et d'assurer la continuité des actions après la fin des projets financés (**Mortimore, 2009, p. 112**). De plus, le transfert de

technologies adaptées au contexte local, telles que les capteurs mobiles pour la surveillance des sols ou les modèles de prévision de la sécheresse, constitue un atout supplémentaire.

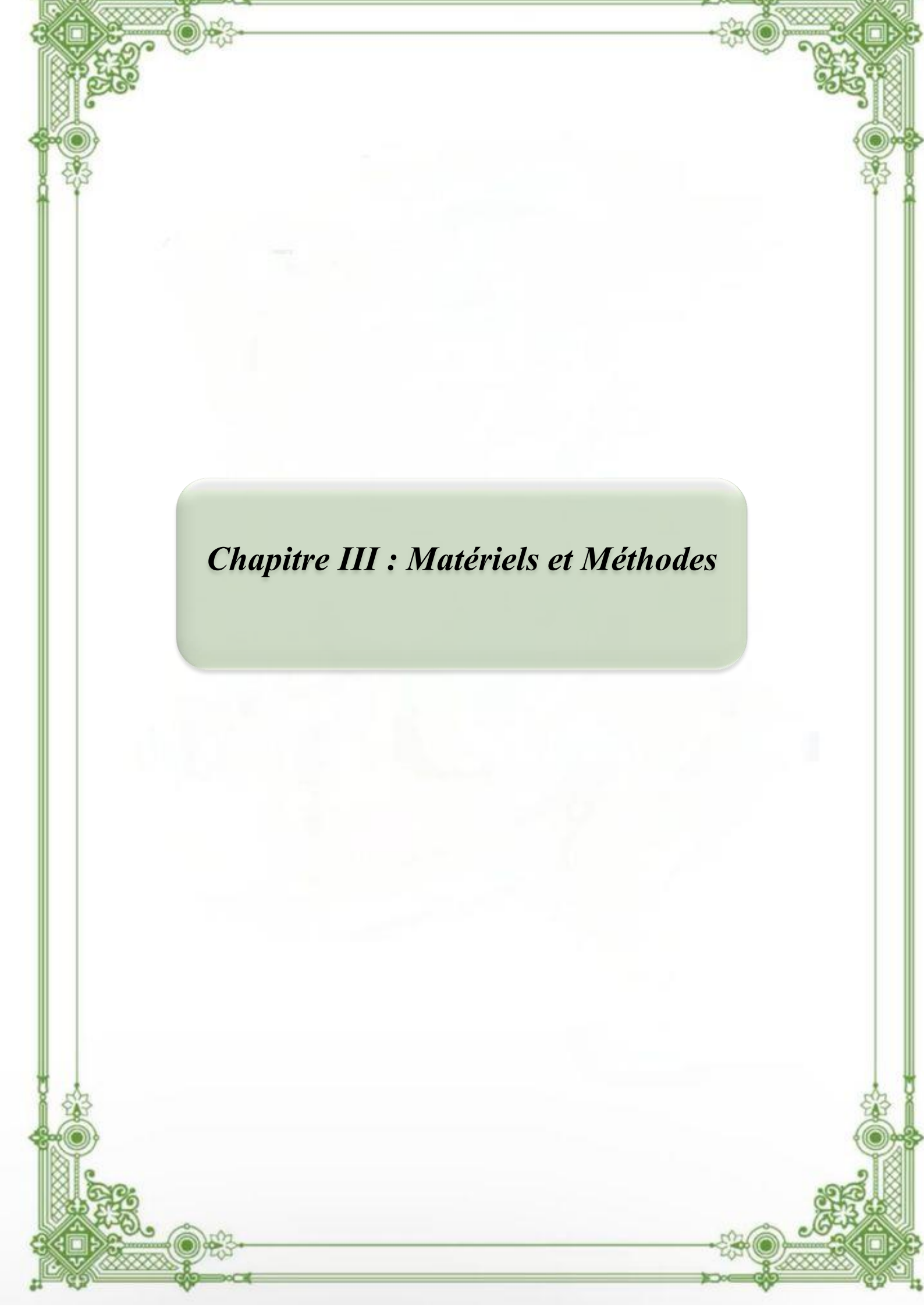
Conclusion

Le présent chapitre a permis d'examiner de manière approfondie le phénomène de la désertification dans les zones semi-arides, en mettant en évidence ses dimensions environnementales, sociales et économiques. Les définitions et typologies de la désertification ont montré que ce processus n'est pas uniquement la conséquence de facteurs climatiques, mais résulte également d'interactions complexes entre pressions anthropiques, pratiques agricoles inadéquates, surexploitation des ressources naturelles et urbanisation croissante. L'analyse des indicateurs environnementaux et des impacts sur la biodiversité et les communautés locales a souligné l'urgence d'adopter des stratégies de prévention et de gestion adaptées aux réalités locales.

Par ailleurs, l'étude des politiques et stratégies de lutte, tant à l'échelle internationale que nationale, a permis de mettre en lumière les forces et les limites des approches existantes. Si les conventions internationales et les programmes nationaux fournissent des cadres de coordination et des outils méthodologiques pertinents, leur efficacité demeure conditionnée par la durabilité financière, la participation communautaire et l'intégration des savoirs locaux. Cette réflexion prépare ainsi le terrain pour le chapitre suivant, qui explorera l'articulation entre intelligence artificielle et savoirs traditionnels pour renforcer les actions de lutte contre la désertification dans un cadre intégré et innovant.



PARIE PRATIQUE



Chapitre III : Matériels et Méthodes

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à la délimitation de la zone d'étude, qui constitue le cadre spatial de la recherche. Il vise à situer géographiquement la wilaya de Saïda ainsi que les communes retenues, considérées comme une unité d'analyse cohérente.

Il permet également de mettre en évidence les principales caractéristiques physiques et environnementales du milieu étudié, notamment le climat, le relief, les sols, la géologie, le réseau hydrographique et le couvert végétal. Ces éléments constituent des facteurs déterminants dans la compréhension des dynamiques de désertification dans la zone d'étude.

III.1 Situation géographique de la wilaya de Saïda

La wilaya de Saïda est située dans le Nord-Ouest de l'Algérie, au sein de la zone des Hautes Plaines occidentales et des espaces steppiques. Elle occupe une position de transition entre le domaine tellien au nord et les zones steppiques et semi-arides au sud, ce qui lui confère un caractère géographique intermédiaire et stratégique.

Elle s'étend sur une superficie d'environ 6765 km² et est limitée :

- au nord par la wilaya de Mascara
- à l'ouest par la wilaya de Sidi Bel Abbès
- à l'est par la wilaya de Tiaret
- au sud par la wilaya d'El Bayadh

Cette position de transition explique la diversité des conditions naturelles au sein de la wilaya, marquée par un gradient climatique allant de conditions relativement plus favorables au nord vers des conditions plus arides au sud. Cette configuration contribue à une hétérogénéité écologique qui se traduit par une sensibilité variable aux phénomènes de dégradation des terres et de désertification. **(Berchiche, 2000)**

III. 1.2. Délimitation de la zone d'étude

La zone d'étude retenue dans le cadre de ce travail concerne quatre communes situées dans la partie méridionale et sud-est de la wilaya de Saïda, à savoir : Aïn Skhoune, El Maâmora, Sidi Ahmed et Moulay Larbi. Cet ensemble territorial constitue un espace relativement homogène

sur le plan biogéographique, appartenant aux Hautes Plaines steppiques occidentales, caractérisées par une transition progressive entre les milieux steppiques et les zones semi-arides à tendance présaharienne.

Sur le plan administratif, ces communes sont réparties entre deux daïras :

- Aïn Skhouna et El Maâmora relèvent de la daïra de Hassasna
- Sidi Ahmed et Moulay Larbi dépendent de la daïra de Youb

Cette organisation administrative traduit une structuration territoriale étendue, marquée par de vastes superficies communales et une faible densité de population, caractéristiques des espaces steppiques algériens. (B.N.E.D.E.R., 1992)

Sur le plan géographique, la zone d'étude est limitée :

- au nord par les communes centrales de la wilaya de Saïda, où les activités agricoles sont relativement plus diversifiées
- au sud par la wilaya d'El Bayadh, relevant du domaine présaharien
- à l'est par la wilaya de Tiaret, zone de transition agro-pastorale
- à l'ouest par la wilaya de Sidi Bel Abbès et les extensions steppiques occidentales

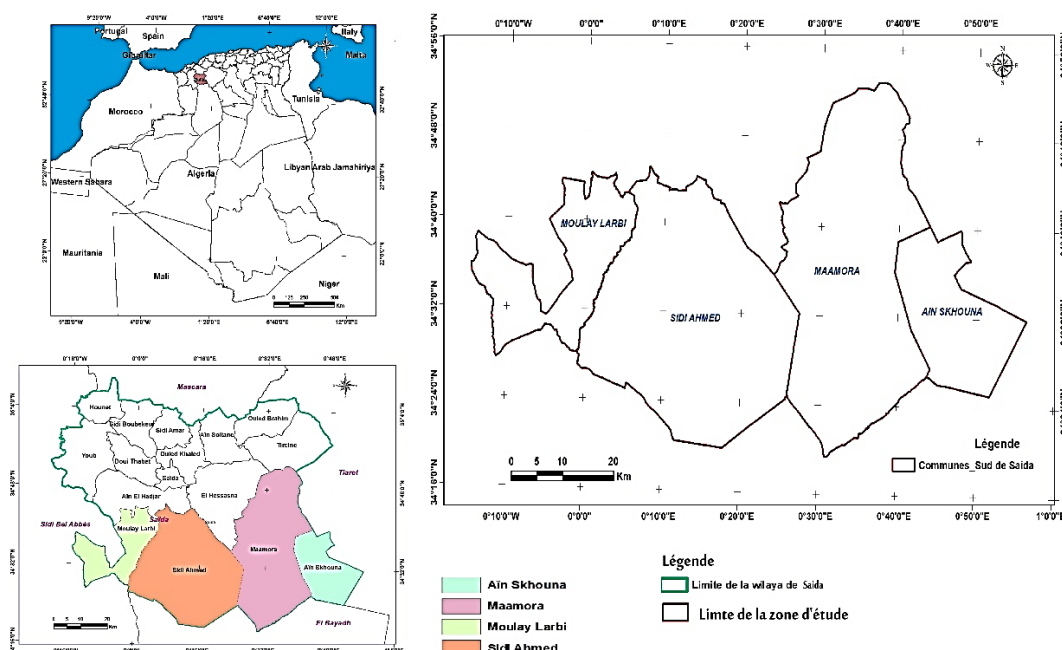
Cette position confère à la zone un rôle de **zone de transition écologique et socio-économique**, où s'interpénètrent les influences steppiques et arides. Elle constitue ainsi un espace particulièrement sensible aux déséquilibres environnementaux, notamment à la dégradation des terres et à la désertification. (B.N.E.D.E.R., 2010)

Du point de vue biogéographique, l'ensemble des communes étudiées appartient aux Hautes Plaines steppiques occidentales, caractérisées par des paysages ouverts, un couvert végétal discontinu et des conditions climatiques semi-arides. Cette homogénéité relative des contraintes naturelles explique la forte vulnérabilité de la zone, notamment en raison de la rareté des ressources hydriques, de la fragilité des sols et de la dépendance des systèmes agro-pastoraux.

Ainsi, la délimitation de la zone d'étude met en évidence un espace cohérent sur le plan physique et fonctionnel, justifiant son choix pour l'analyse des processus de dégradation environnementale et de désertification. (D.P.A.T., 2011)

Tableau III .1 : Présentation administrative des communes

Commune	Daïra	Wilaya	Position géographique
Aïn Skhouna	Hassasna	Saïda	Sud-est
El Maâmora	Hassasna	Saïda	Sud-est
Sidi Ahmed	Youb	Saïda	Sud-ouest
Moulay Larbi	Youb	Saïda	Sud



Carte III .1 : Cadre géographique et administratif des communes étudiées dans le sud de la wilaya de Saïda

III.1.3. Caractéristiques physiques et environnementales de la zone d'étude

Les caractéristiques physiques et environnementales de la zone d'étude constituent un ensemble déterminant pour comprendre les dynamiques naturelles et les processus de dégradation qui affectent les communes d'Aïn Skhouna, El Maâmora, Sidi Ahmed et Moulay Larbi. Situées dans les Hautes Plaines steppiques occidentales, ces communes présentent des conditions naturelles globalement homogènes mais fortement contraignantes, marquées par un climat semi-aride à tendance aride, un relief peu accidenté, des sols fragiles, une hydrologie limitée et un couvert végétal steppique en régression.

L'analyse de ces paramètres permet de mettre en évidence les principaux facteurs de vulnérabilité environnementale et d'expliquer les mécanismes de désertification observés dans la zone d'étude. (D.P.A.T., 2011)

III. 1.3.1. Climat

La zone d'étude, regroupant les communes d'Aïn Skhouna, El Maâmoura, Sidi Ahmed et Moulay Larbi, appartient au domaine bioclimatique des **Hautes Plaines steppiques occidentales**, caractérisé par un climat **semi-aride à tendance aride**. Ce type de climat constitue l'un des principaux facteurs explicatifs des dynamiques environnementales observées dans la région, notamment la dégradation des sols et la régression du couvert végétal.

Sur le plan général, le climat est dominé par un **déficit hydrique quasi permanent**, résultant de la combinaison entre faibles précipitations, évapotranspiration élevée et irrégularité interannuelle des pluies. Cette situation place la zone dans une forte dépendance aux conditions climatiques pour la gestion des ressources naturelles et des activités agro-pastorales.

Pluviométrie :

Les précipitations constituent la principale source d'eau dans la zone d'étude. Elles sont **faibles et très irrégulières**, avec une moyenne annuelle estimée à environ **353 mm** dans certains secteurs proches d'El Maâmoura (station de Rebahia), tandis que d'autres communes comme Aïn Skhouna ou Moulay Larbi peuvent enregistrer des valeurs inférieures selon les années.

La répartition des pluies est également déséquilibrée :

- concentration en automne, hiver et début du printemps
- saison estivale quasiment sèche
- forte variabilité d'une année à l'autre

Cette irrégularité engendre une instabilité des systèmes agricoles et pastoraux, rendant la production fortement dépendante des aléas climatiques. (G.C.A., 2010)

Températures :

Le régime thermique est caractérisé par une **forte amplitude saisonnière et journalière**, typique des zones continentales semi-arides.

- **Étés chauds et secs :**

Les températures peuvent dépasser **40 °C** lors des épisodes de sirocco. Les moyennes estivales élevées favorisent une évaporation intense, entraînant un dessèchement rapide des sols et une réduction importante de la productivité végétale.

Hivers froids :

Les températures minimales peuvent descendre jusqu'à **3–4 °C**, avec apparition de gelées dans certaines zones ouvertes et dépressions. Ces conditions ralentissent l'activité biologique et affectent certaines cultures sensibles. (G.C.A., 2010)

Vents et évaporation

L'action des vents constitue un élément climatique majeur dans la zone. Le **sirocco**, vent chaud et sec provenant du sud ou du sud-est, est particulièrement fréquent durant la saison estivale.

Ses effets sont multiples :

- augmentation brutale des températures
- baisse de l'humidité atmosphérique
- accélération de l'évaporation
- stress hydrique des cultures et du cheptel

En parallèle, l'évaporation élevée, combinée à la faible pluviométrie, accentue le déficit hydrique global et limite la disponibilité en eau dans les sols. (G.C.A., 2010)

Conséquences environnementales du climat

Le climat semi-aride à tendance aride agit comme **facteur structurant des dynamiques environnementales** de la zone. Il contribue directement à :

- la fragilisation du couvert végétal
- la limitation de la régénération naturelle des steppes
- l'augmentation du stress hydrique
- l'accélération de la désertification
- l'intensification de l'érosion éolienne

Ainsi, le climat constitue le facteur de base sur lequel s'articulent les autres processus de dégradation environnementale. (Kefifa, 2005)

Tableau III.2 Caractéristiques climatiques générales de la zone d'étude

Élément climatique	Caractéristiques principales
Type de climat	Semi-aride à tendance aride
Précipitations	Faibles (≈ 353 mm/an) et irrégulières
Saison sèche	Longue (6 à 7 mois)
Été	Chaud et sec (> 40 °C possible)
Hiver	Froid avec gelées ($\approx 3-4$ °C)
Vents dominants	Sirocco fréquent
Évaporation	Très élevée

III. 1.3.2. Relief

Le relief de la zone d'étude, englobant les communes d'Aïn Skhoua, El Maâmora, Sidi Ahmed et Moulay Larbi, s'inscrit dans le cadre morphologique des **Hautes Plaines steppiques occidentales**. Il est caractérisé par une topographie globalement **plane à faiblement ondulée**, constituée essentiellement de vastes plaines, de plateaux peu inclinés et de glacis d'érosion.

Cette configuration morphologique constitue un élément fondamental dans la structuration des paysages locaux et influence directement l'occupation des sols ainsi que les dynamiques environnementales. (Kefifa, 2005)

Dominance des plaines et plateaux

Le relief est dominé par de larges étendues planes ou légèrement ondulées. Ces surfaces occupent la majorité de l'espace communal et se présentent sous forme de terrains ouverts, peu accidentés et continus.

Dans l'ensemble des communes étudiées :

- les pentes sont généralement faibles
- les dénivellations restent limitées
- les formes de relief sont peu contrastées

Cette homogénéité facilite les déplacements pastoraux et l'extension des activités agricoles, notamment la céréaliculture pluviale et le pastoralisme extensif.

Pentes faibles et organisation du territoire

Les pentes sont majoritairement **inférieures à 5 %**, ce qui confirme le caractère quasi-horizontale de la zone. Cette faible inclinaison est une caractéristique dominante des Hautes Plaines steppiques.

Les effets de cette morphologie sont doubles :

- facilitation des activités humaines (agriculture, circulation, pâturage)
- mais forte exposition aux vents et à l'érosion éolienne

Dans certains secteurs, les données montrent que les pentes faibles dominent largement :

- Aïn Skhouna : environ 99 % des superficies entre 0 et 5 %
- El Maâmora : environ 90,8 % de pentes faibles
- Sidi Ahmed : près de 90 % de pentes inférieures à 5 %

Ces valeurs confirment la généralisation d'un relief peu accidenté. **(Kefifa, 2005)**

Formes secondaires du relief

Malgré la dominance des plaines, la zone présente quelques formes secondaires :

- dépressions locales
- sebkhas (notamment à Aïn Skhouna)
- talwegs et lits d'oueds temporaires

Ces éléments restent localisés mais participent à la diversité morphologique du territoire. Ils jouent également un rôle dans la concentration temporaire des eaux de ruissellement. **(O.N.M., 2012)**

Influence du relief sur les dynamiques environnementales

La simplicité du relief joue un rôle important dans les processus environnementaux. L'absence d'obstacles topographiques significatifs favorise :

- la circulation libre des vents
- l'intensification de l'érosion éolienne
- le transport des particules fines
- la dégradation des sols nus

Ainsi, le relief, bien que favorable aux activités humaines, constitue également un facteur aggravant de vulnérabilité environnementale lorsqu'il est combiné à la sécheresse et à la faible couverture végétale. (O.N.M., 2012)

Tableau III.3 Caractéristiques morphologiques générales de la zone

Élément	Description
Type de relief	Plaines et plateaux faiblement ondulés
Pentes dominantes	< 5 %
Formes principales	Glacis, plaines, dépressions
Particularités	Sebkhas locales (Aïn Skhouana)
Impact principal	Favorise activités humaines mais augmente l'érosion éolienne

III.3.3. Sols

Les sols de la zone d'étude, regroupant les communes d'Aïn Skhouana, El Maâmoura, Sidi Ahmed et Moulay Larbi, sont représentatifs des milieux **steppiques semi-arides des Hautes Plaines occidentales**. Ils résultent de l'interaction entre un climat sec, un relief relativement plat, une couverture végétale clairsemée et des formations géologiques calcaires.

Ces sols se caractérisent globalement par leur **fragilité**, leur faible évolution pédologique et leur forte sensibilité aux processus de dégradation.

Dominance des sols steppiques calcaires

Les sols dominants dans la zone sont des **sols steppiques calcaires**, développés sur des matériaux marno-calcaires et alluviaux riches en carbonate de calcium.

On les retrouve sous différentes formes selon les communes :

- Aïn Skhouna : sols sur dépôts alluviaux calcaires à texture limono-argilo-sableuse
- El Maâmora : sols bruns calcaires steppiques
- Sidi Ahmed : sols steppiques calcaires à texture sablo-limoneuse à limono-sableuse

Cette homogénéité pédologique traduit une forte influence du substrat géologique calcaire.
(O.N.M., 2012)

Pauvreté en matière organique

Un trait majeur des sols est leur **faible teneur en matière organique**, liée à :

- faibles apports végétaux
- décomposition rapide sous climat chaud
- surpâturage
- faible couverture végétale permanente

Cette pauvreté entraîne :

- baisse de fertilité naturelle
- réduction de l'activité biologique du sol
- faible capacité de rétention en eau
- diminution des rendements agricoles

Faible profondeur des sols

Les sols de la zone sont souvent **peu profonds à moyennement profonds**, avec une forte présence d'horizons superficiels.

Les facteurs explicatifs sont :

- proximité de la roche mère
- présence de croûtes calcaires ou gypseuses
- érosion ancienne
- faible évolution pédologique

Cette faible profondeur limite :

- l'enracinement des plantes
- la réserve en eau
- la capacité nutritive du sol

la résistance aux sécheresses(O.N.M., 2012)

Sensibilité à la salinisation et à la dégradation

Les sols présentent une **forte sensibilité à la salinisation**, surtout dans les zones basses et mal drainées (dépressions et sebkhas).

Ce phénomène est favorisé par :

- évaporation intense
- faible lessivage des sols
- stagnation temporaire des eaux

Les conséquences sont :

- diminution de la fertilité
- difficulté de germination
- abandon progressif de certaines terres

En parallèle, les sols subissent plusieurs formes de dégradation :

- érosion éolienne
- croûtes superficielles
- tassement lié au piétinement du cheptel
- perte de structure

Dynamique de dégradation

Les processus de dégradation sont souvent **cumulatifs et interactifs** :

- un sol appauvri retient moins l'eau
- un sol sec favorise la disparition de la végétation
- un sol nu devient plus sensible à l'érosion

Cela crée un **cycle de dégradation progressif** contribuant à la désertification. (P.A.T.W., 2008)

Tableau III.4: Caractéristiques principales des sols de la zone d'étude

Caractéristique	Description
Type dominant	Sols steppiques calcaires
Texture	Limono-sableuse à sablo-limoneuse
Matière organique	Très faible
Profondeur	Faible à moyenne
Fertilité	Limitée
Sensibilité	Salinisation + érosion + dégradation
Facteur principal	Climat semi-aride + surpâturage

III. 1.3.4. Géologie

La géologie de la zone d'étude, englobant les communes d'Aïn Skhouana, El Maâmora, Sidi Ahmed et Moulay Larbi, s'inscrit dans le cadre général des **Hautes Plaines steppiques occidentales**. Elle est caractérisée par des formations essentiellement **sédimentaires**, qui jouent un rôle déterminant dans la nature des sols et la dynamique des paysages.

Dominance des formations sédimentaires

Le substrat géologique de la zone est dominé par des **formations marno-calcaires**, associées à des dépôts alluviaux et colluviaux. Ces formations résultent de processus géologiques anciens liés à l'accumulation de sédiments dans des bassins continentaux.

Ces matériaux sont riches en carbonates de calcium, ce qui explique la nature calcaire dominante des sols observés dans la région. (P.A.T.W., 2008)

Dépôts alluviaux et colluviaux

En plus des formations marno-calcaires, la zone présente des **dépôts alluviaux et colluviaux** issus de l'érosion des reliefs environnants et de l'accumulation progressive des matériaux transportés par les eaux de ruissellement et les processus gravitaires.

Ces dépôts sont généralement :

- hétérogènes
- peu consolidés
- variables en texture

Ils participent à la formation des sols steppiques observés dans les différentes communes.

Influence sur les sols et les paysages

La nature géologique de la zone influence directement :

- la composition des sols (dominance calcaire)
- leur alcalinité
- leur faible évolution pédologique
- la formation de croûtes calcaires en profondeur

Ainsi, la géologie constitue le **socle explicatif principal** de la pédologie locale.

Lien avec la fragilité environnementale

La prédominance de formations sédimentaires meubles et calcaires contribue à la **fragilité globale du milieu**. En effet, ces matériaux sont facilement altérables sous l'effet combiné :

- de l'érosion éolienne
- du ruissellement limité mais concentré
- de la sécheresse climatique

Cela favorise la dégradation progressive des terres et renforce la sensibilité de la zone aux processus de désertification. (P.A.T.W., 2008)

Tableau III.5: Caractéristiques géologiques de la zone d'étude

Élément géologique	Description
Type principal	Formations sédimentaires
Nature dominante	Marno-calcaires
Dépôts associés	Alluviaux et colluviaux

Composition	Riche en carbonates de calcium
Influence principale	Formation de sols calcaires
Sensibilité	Altération et érosion

III. 1.3.5. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la zone d'étude (communes d'Aïn Skhouna, El Maâmora, Sidi Ahmed et Moulay Larbi) se caractérise par une organisation simple, peu développée et fortement dépendante des conditions climatiques. Il s'agit d'un système hydrologique typique des régions steppiques semi-arides, où l'eau de surface est rare, temporaire et irrégulièrement répartie dans le temps et dans l'espace. Cette configuration influence directement les activités agricoles, pastorales ainsi que la dynamique de la désertification.

a. Dominance d'un réseau temporaire

Le réseau hydrographique est essentiellement constitué d'**oueds intermittents**, c'est-à-dire des cours d'eau qui ne fonctionnent que lors des épisodes pluvieux. Ces oueds restent secs durant la majeure partie de l'année et ne s'activent que pendant les pluies automnales, hivernales ou printanières. Leur régime est donc dit **éphémère ou pluvial irrégulier**.

Cette situation est directement liée à :

- la faiblesse des précipitations annuelles ;
- leur forte variabilité interannuelle ;
- l'évaporation élevée ;
- la nature des sols peu infiltrants dans certains secteurs.

Résultat : l'écoulement est rapide, court et peu structuré. (P.A.T.W., 2008)

b. Présence des sebkhas et zones de stagnation

Les **sebkhas** constituent un élément hydrologique important dans la zone, notamment dans la commune d'Aïn Skhouna où elles occupent une part significative du territoire (environ 15 % selon les données utilisées dans le document).

Ces dépressions jouent un rôle hydrologique particulier :

- accumulation temporaire des eaux de ruissellement ;
- évaporation rapide après les pluies ;
- concentration des sels en surface ;
- formation de sols salins peu exploitables.

Elles constituent donc des zones hydrologiques fermées, sans exutoire, ce qui accentue les phénomènes de salinisation. (Saidi, 2012)

c. Fonction hydrologique des oueds

Même s'ils sont temporaires, les oueds jouent plusieurs rôles écologiques et fonctionnels :

- **drainage des eaux de pluie** vers les zones basses ;
- alimentation ponctuelle des nappes superficielles ;
- création de micro-zones humides temporaires ;
- concentration de la végétation le long des lits d'oueds ;
- soutien limité mais important pour le pastoralisme.

Dans certains cas, les lits d'oueds deviennent des axes privilégiés pour les déplacements humains et animaux.

d. Faible structuration du drainage

Le réseau hydrographique est globalement **peu hiérarchisé** :

- absence de grands cours d'eau permanents ;
- faible densité de drainage ;
- écoulements dispersés ;
- infiltration limitée ou rapide selon la nature des sols.

Cette faiblesse hydrologique est cohérente avec le contexte climatique semi-aride et le relief peu accidenté déjà décrit. (Saidi, 2012)

III. 1.3.6. Couvert végétal

Le couvert végétal constitue un indicateur écologique essentiel pour comprendre l'état de dégradation ou de stabilité des écosystèmes steppiques. Dans la zone d'étude regroupant les

communes d'Aïn Skhoua, El Maâmore, Sidi Ahmed et Moulay Larbi, la végétation reflète directement les contraintes climatiques, édaphiques et anthropiques. Elle se caractérise globalement par une faible densité, une forte discontinuité spatiale et une nette tendance à la régression dans plusieurs secteurs.

a. Dominance de la steppe xérophile

La végétation naturelle appartient principalement au domaine **steppique semi-aride**, dominé par des espèces adaptées à la sécheresse et aux sols pauvres. Les formations végétales les plus représentatives sont :

- l'**alfa** (*Stipa tenacissima*) ;
- l'**armoïse** (*Artemisia herba-alba*) ;
- le **sparte** (*Lygeum spartum*) ;
- des espèces herbacées annuelles à cycle court.

Ces espèces possèdent des adaptations morphologiques et physiologiques (racines profondes, faible consommation hydrique, résistance à la chaleur) qui leur permettent de survivre dans un environnement contraignant. (Saidi, 2012)

b. Répartition spatiale du couvert végétal

Le couvert végétal n'est pas homogène dans la zone d'étude. Il varie selon :

- la nature des sols ;
- la topographie ;
- la pression pastorale ;
- la disponibilité en eau.

On observe généralement :

- des zones relativement plus végétalisées dans les secteurs peu accessibles ou moins exploités ;
- des zones fortement dégradées autour des axes de pâturage intensif ;
- des surfaces nues ou quasi désertifiées dans les espaces surexploités.

Cette fragmentation du couvert végétal traduit une pression écologique croissante sur les écosystèmes steppiques. (Saidi, 2012)

c. Régression du couvert végétal

Les données du chapitre sur la désertification montrent une **régression progressive du couvert végétal naturel**. Cette diminution est particulièrement visible à travers :

- la réduction des steppes à alfa ;
- la disparition locale de certaines espèces pérennes ;
- la transformation des steppes en formations dégradées ;
- l'augmentation des surfaces nues.

Cette régression est liée à plusieurs facteurs combinés :

- sécheresse répétée ;
- surpâturage ;
- défrichement des parcours ;
- érosion éolienne ;

faible capacité de régénération naturelle. (Labani, 2005)

d. Rôle écologique du couvert végétal

Malgré sa fragilité, le couvert végétal joue un rôle fondamental dans l'équilibre écologique :

- protection des sols contre l'érosion ;
- limitation du ruissellement et de l'érosion éolienne ;
- amélioration de la structure du sol ;
- maintien de la biodiversité locale ;
- alimentation du cheptel (ressource pastorale principale).

Sa dégradation entraîne donc un effet en chaîne sur l'ensemble du système écologique.

En résumé, le couvert végétal de la zone d'étude est dominé par des formations steppiques xérophiles peu denses et fortement fragilisées. Malgré leur rôle écologique essentiel, ces formations connaissent une régression progressive sous l'effet combiné de la sécheresse, du

surpâturage et de la pression anthropique, contribuant ainsi à l'accélération des processus de désertification. (Labani, 2005)

III. 2. Matériels utilisés

Dans le cadre de cette étude consacrée à l'intégration de l'intelligence artificielle et des savoirs écologiques traditionnels dans la gestion durable des ressources naturelles dans la wilaya de Saïda, plusieurs matériels, outils et types de données ont été mobilisés afin de garantir une analyse environnementale complète et cohérente. Ces ressources ont permis de collecter, traiter, analyser et interpréter les différentes informations relatives à l'état des écosystèmes et aux phénomènes de dégradation environnementale observés dans la région étudiée.

III.2-1- Images satellitaires utilisées

Les images satellitaires représentent un outil essentiel dans les études environnementales modernes, notamment dans l'analyse des changements spatiaux et le suivi des ressources naturelles. Dans cette étude, des images issues des programmes Sentinel-2 et Landsat ont été exploitées afin d'observer les variations de la couverture végétale, l'état des sols ainsi que certaines transformations environnementales dans la wilaya de Saïda.

Le choix de ces images repose sur plusieurs avantages, notamment leur disponibilité gratuite, leur résolution spatiale adaptée aux études environnementales ainsi que leur actualisation régulière. Les données satellitaires permettent d'obtenir une vision globale et détaillée du territoire étudié et facilitent l'identification des zones touchées par la dégradation des sols, la diminution de la couverture végétale ou les pressions anthropiques.

Ces images ont également servi de support pour l'analyse spatiale et la réalisation de cartes thématiques permettant de mieux représenter les phénomènes environnementaux observés dans la région d'étude.

III .2-2- Logiciels et outils SIG

L'exploitation des données spatiales et environnementales a nécessité l'utilisation de plusieurs logiciels et outils de systèmes d'information géographique (SIG). Ces outils jouent un rôle important dans le traitement, l'analyse et la représentation cartographique des données.

Le logiciel QGIS a été utilisé pour le traitement des données géographiques, la réalisation des cartes et l'analyse spatiale des phénomènes étudiés. Ce logiciel permet d'intégrer différentes couches d'informations géographiques et de faciliter l'interprétation des données environnementales.

Google Earth a également été utilisé pour l'observation visuelle détaillée de certaines zones de la wilaya de Saïda et pour comparer les transformations environnementales observées à différentes périodes.

Par ailleurs, Google Earth Engine a constitué un outil complémentaire permettant l'accès à certaines données satellitaires et facilitant le traitement simplifié des informations géospatiales. L'ensemble de ces outils a contribué à améliorer la qualité de l'analyse environnementale réalisée dans cette étude.

III .2-3- Données climatiques

Les données climatiques utilisées dans cette étude concernent principalement les températures, les précipitations, les périodes de sécheresse et certaines variations saisonnières observées dans la wilaya de Saïda.

Ces données sont particulièrement importantes dans les régions semi-arides où les conditions climatiques influencent fortement l'état des ressources naturelles et la dynamique des écosystèmes. L'analyse des paramètres climatiques permet de mieux comprendre les facteurs responsables de la dégradation des sols, de la réduction de la couverture végétale et de la pression exercée sur les ressources hydriques.

Les informations climatiques exploitées dans cette étude ont servi à interpréter les changements environnementaux observés et à établir une relation entre les phénomènes climatiques et les transformations écologiques enregistrées dans la région étudiée.

III .2-4- Données de terrain

Les données de terrain constituent une source complémentaire importante dans cette recherche. Elles permettent de confronter les informations théoriques et spatiales à la réalité observée sur le terrain.

Ces données reposent principalement sur l'observation directe de certaines zones de la wilaya de Saïda afin d'identifier les formes de dégradation environnementale, l'état de la végétation et certaines pratiques locales liées à l'exploitation des ressources naturelles.

Les observations de terrain ont également permis d'obtenir une meilleure compréhension des conditions écologiques locales et de compléter les informations fournies par les images satellitaires et les données bibliographiques.

III .2-5- Observations et enquêtes locales

Dans le but d'intégrer les savoirs écologiques traditionnels dans l'analyse environnementale, plusieurs observations locales ainsi que des informations liées aux pratiques communautaires ont été prises en considération.

Ces observations concernent notamment les méthodes traditionnelles de gestion des ressources naturelles, les techniques locales de préservation des sols et de l'eau ainsi que les connaissances relatives aux cycles climatiques et à la végétation locale.

Les informations locales constituent un élément important dans cette étude, car elles permettent de mieux comprendre les interactions entre les communautés locales et leur environnement naturel. Elles contribuent également à valoriser les savoirs écologiques traditionnels comme complément aux approches scientifiques et technologiques modernes.

III .2-6- Outils d'intelligence artificielle utilisés

Dans cette étude, l'intelligence artificielle a été mobilisée à travers l'utilisation de la plateforme Google Earth Engine et de l'algorithme de Machine Learning Random Forest afin d'améliorer l'analyse des données environnementales et spatiales.

L'approche adoptée repose sur une classification supervisée appliquée aux images satellitaires Sentinel-2 et aux indices de végétation (NDVI). Cette méthode permet d'identifier et de classer les zones sensibles à la désertification selon différents niveaux de dégradation environnementale.

L'utilisation de l'algorithme Random Forest présente plusieurs avantages dans les études environnementales, notamment :

- une bonne capacité de traitement des données géospatiales ;
- une amélioration de la précision de classification ;
- une meilleure détection des zones dégradées ;
- une gestion efficace des données environnementales complexes.

L'intégration de ces outils d'intelligence artificielle a permis de renforcer l'approche méthodologique adoptée dans cette étude en combinant données satellitaires, analyse spatiale et savoirs écologiques traditionnels.

III .3- Méthodologie de travail

La méthodologie adoptée dans cette étude repose sur une approche intégrée combinant les données environnementales, les outils géospatiaux, les observations locales ainsi que les savoirs écologiques traditionnels afin d'analyser les phénomènes de dégradation environnementale dans la wilaya de Saïda. Cette démarche méthodologique vise à assurer une meilleure compréhension des dynamiques écologiques locales à travers l'exploitation de différentes sources de données et outils d'analyse.

Le travail méthodologique s'est déroulé en plusieurs étapes successives allant de la collecte des données jusqu'à l'interprétation des résultats et l'intégration des savoirs écologiques traditionnels dans l'analyse environnementale.

III .3-1- Collecte des données

La première étape de cette étude a consisté à collecter un ensemble de données environnementales, spatiales et documentaires nécessaires à l'analyse des ressources naturelles et des phénomènes de dégradation observés dans la wilaya de Saïda.

Les données collectées comprennent principalement :

- des images satellitaires issues des programmes Sentinel-2 et Landsat ;
- des données climatiques relatives aux températures, aux précipitations et aux périodes de sécheresse ;
- des documents scientifiques, rapports et études antérieures portant sur les ressources naturelles et les écosystèmes semi-arides ;

- des informations locales et des observations relatives aux pratiques traditionnelles de gestion des ressources naturelles.

Les données satellitaires ont été sélectionnées en fonction de leur qualité, de leur résolution spatiale et de leur disponibilité pour la région étudiée. Les données climatiques ont permis de mieux comprendre les facteurs environnementaux influençant la dégradation des sols et la dynamique de la couverture végétale.

Par ailleurs, les informations bibliographiques et les études antérieures ont servi de base théorique et méthodologique afin d'orienter l'analyse et de comparer les résultats obtenus avec d'autres travaux réalisés dans des contextes similaires.

III .3-2- Prétraitement et traitement des images

Après la collecte des données satellitaires, une étape de prétraitement et de traitement des images a été réalisée afin d'améliorer la qualité des données et de faciliter leur exploitation dans l'analyse spatiale.

Cette étape comprend plusieurs opérations techniques visant à corriger et organiser les données géospatiales avant leur analyse. Les images satellitaires ont été préparées à travers :

- la sélection des scènes couvrant la wilaya de Saïda ;
- la vérification de la qualité des images ;
- l'organisation des données géographiques ;
- l'amélioration de la lisibilité des images ;
- le découpage des zones correspondant au territoire étudié.

Le traitement des images a permis de mettre en évidence certains phénomènes environnementaux liés à la dégradation des sols, à la répartition de la végétation et aux pressions exercées sur les ressources naturelles.

Les logiciels SIG utilisés dans cette étape ont facilité l'exploitation des données spatiales et la préparation des cartes nécessaires à l'analyse environnementale.

III .3-3- Calcul des indices de végétation (NDVI)

Afin d'évaluer l'état de la couverture végétale dans la wilaya de Saïda, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) a été utilisé. Cet indice constitue l'un des outils les plus employés dans les études environnementales et écologiques pour analyser l'état de la végétation et suivre les variations de la biomasse végétale.

Le NDVI permet de mesurer l'activité chlorophyllienne de la végétation à partir des données satellitaires. Les valeurs élevées de l'indice indiquent généralement une végétation dense et en bon état, tandis que les valeurs faibles traduisent une faible couverture végétale ou des surfaces dégradées.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$$

L'exploitation de cet indice a permis d'identifier les zones où la couverture végétale est réduite ainsi que les espaces les plus vulnérables à la dégradation environnementale. L'analyse du NDVI contribue également à mieux comprendre l'impact des conditions climatiques et des activités humaines sur les écosystèmes locaux.

III .3-4- Classification et cartographie

La classification et la cartographie constituent une étape essentielle dans l'analyse spatiale des ressources naturelles et des phénomènes environnementaux observés dans la région étudiée.

Cette étape consiste à organiser les différentes informations spatiales afin de produire des cartes thématiques représentant :

- la répartition de la couverture végétale ;
- les zones dégradées ;
- les espaces soumis aux pressions anthropiques ;
- certaines caractéristiques environnementales de la wilaya de Saïda.

Les outils SIG ont permis de classer les données spatiales selon différentes catégories environnementales et de représenter les résultats sous forme cartographique afin de faciliter leur interprétation.

En complément des outils SIG classiques, une approche de classification supervisée basée sur l'algorithme Random Forest a été appliquée sous Google Earth Engine afin d'améliorer

l'identification des zones sensibles à la désertification et de renforcer la précision des résultats cartographiques.

La cartographie réalisée dans cette étude joue un rôle important dans la visualisation des dynamiques écologiques et dans l'identification des zones nécessitant des mesures de protection ou de gestion durable des ressources naturelles.

III .3-5- Analyse des zones dégradées

L'analyse des zones dégradées a été effectuée à partir des données satellitaires, des informations climatiques et des observations locales recueillies au cours de l'étude.

Cette analyse vise principalement à identifier les espaces touchés par :

- la diminution de la couverture végétale ;
- la dégradation des sols ;
- les effets de la sécheresse ;
- les pressions anthropiques liées aux activités humaines.

L'interprétation des données spatiales et environnementales a permis de localiser les zones les plus vulnérables et de comprendre les facteurs responsables de leur dégradation.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence combinée des conditions climatiques, des activités humaines et de la fragilité des écosystèmes semi-arides sur l'état des ressources naturelles dans la wilaya de Saïda.

III .3-6- Intégration des savoirs écologiques traditionnels

Dans cette étude, les savoirs écologiques traditionnels ont été intégrés comme élément complémentaire aux approches scientifiques et technologiques modernes.

Cette intégration repose sur la prise en considération des connaissances locales relatives :

- à la gestion des ressources naturelles ;
- aux techniques traditionnelles de conservation des sols et de l'eau ;
- aux pratiques agricoles adaptées aux conditions semi-arides ;
- à l'observation des changements climatiques et environnementaux.

Les savoirs locaux permettent d'apporter une compréhension plus fine des dynamiques écologiques observées dans la région étudiée. Ils contribuent également à renforcer les stratégies de gestion durable des ressources naturelles grâce à leur caractère empirique et adapté aux réalités locales.

L'approche intégrée adoptée dans cette étude vise ainsi à associer les outils modernes d'analyse environnementale, notamment les technologies géospatiales et l'intelligence artificielle, aux connaissances traditionnelles développées par les communautés locales afin de proposer une vision plus globale et durable de la gestion environnementale dans la wilaya de Saïda.

III .4- Méthodes d'analyse

Afin d'assurer une interprétation cohérente et fiable des données collectées dans cette étude, plusieurs méthodes d'analyse ont été utilisées. Ces méthodes reposent principalement sur l'analyse spatiale des données environnementales, l'approche comparative entre différentes informations recueillies ainsi que l'exploitation des outils d'intelligence artificielle comme support complémentaire d'analyse environnementale.

L'objectif principal de ces méthodes est de mieux comprendre les dynamiques écologiques observées dans la wilaya de Saïda et d'identifier les principaux facteurs influençant la dégradation des ressources naturelles.

III .4-1- Analyse spatiale

L'analyse spatiale constitue une étape fondamentale dans cette étude, car elle permet d'examiner la répartition géographique des phénomènes environnementaux observés dans la wilaya de Saïda.

Cette méthode repose sur l'exploitation des données géospatiales issues des images satellitaires ainsi que des outils de systèmes d'information géographique (SIG). Elle permet de représenter spatialement plusieurs éléments environnementaux tels que :

- la couverture végétale ;
- les zones dégradées ;
- les espaces soumis aux pressions anthropiques ;
- certaines variations environnementales observées dans la région étudiée.

L'analyse spatiale facilite également la compréhension des relations entre les différents facteurs environnementaux, notamment les conditions climatiques, les caractéristiques du territoire et les activités humaines.

Les cartes produites au cours de cette étude ont permis de visualiser les transformations environnementales et d'identifier les zones les plus vulnérables à la dégradation écologique.

III .4-2- Approche comparative

L'approche comparative a été utilisée afin de confronter les différentes données collectées et de mieux interpréter les résultats obtenus.

Cette méthode consiste à comparer :

- les données satellitaires avec les observations de terrain ;
- les informations climatiques avec l'état de la couverture végétale ;
- les données scientifiques avec les savoirs écologiques traditionnels ;
- les différentes zones de la wilaya selon leur niveau de dégradation environnementale.

Cette approche permet d'obtenir une vision plus globale des phénomènes étudiés et de mieux comprendre les différences spatiales et environnementales observées dans la région.

L'analyse comparative contribue également à renforcer la fiabilité des résultats en croisant plusieurs sources d'informations complémentaires.

III .4-3- Analyse par intelligence artificielle

Dans cette étude, l'intelligence artificielle a été utilisée comme outil complémentaire d'analyse environnementale à travers l'application d'un modèle de Machine Learning basé sur l'algorithme Random Forest sous la plateforme Google Earth Engine.

Cette approche repose sur une classification supervisée exploitant plusieurs variables environnementales issues des images satellitaires Sentinel-2, notamment :

- l'indice de végétation NDVI ;
- certaines caractéristiques de la couverture végétale ;
- les données spatiales relatives aux zones dégradées ;
- les informations environnementales observées dans la région étudiée.

L'algorithme Random Forest permet de traiter un volume important de données géospatiales et d'améliorer la classification des espaces selon leur niveau de sensibilité à la désertification.

L'analyse par intelligence artificielle a contribué à :

- améliorer la précision de l'analyse spatiale ;
- identifier les zones fortement dégradées ;
- faciliter l'interprétation des données environnementales ;
- produire une cartographie plus cohérente des espaces vulnérables.

Cette approche permet ainsi de renforcer l'intégration entre télédétection, systèmes d'information géographique et intelligence artificielle dans l'analyse des dynamiques environnementales des zones semi-arides.

III .4-4- Validation des résultats

La validation des résultats représente une étape importante dans cette étude afin d'assurer la cohérence et la crédibilité des analyses réalisées.

Cette validation repose sur plusieurs éléments complémentaires :

- la comparaison des résultats obtenus avec les observations de terrain ;
- la confrontation des données spatiales avec les informations climatiques ;
- l'exploitation des études et travaux scientifiques antérieurs ;
- la comparaison entre les analyses cartographiques et les réalités environnementales locales.

La validation permet de vérifier la pertinence des interprétations réalisées et de réduire les risques d'erreurs dans l'analyse des phénomènes environnementaux.

Elle contribue également à renforcer la qualité scientifique des résultats obtenus et à garantir une meilleure fiabilité des conclusions relatives à la gestion durable des ressources naturelles dans la wilaya de Saïda.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les principaux matériels et méthodes utilisés dans cette étude afin d'analyser les ressources naturelles et les phénomènes de dégradation environnementale dans la wilaya de Saïda. L'exploitation des images satellitaires, des outils SIG, des données

climatiques ainsi que des observations de terrain a contribué à mieux comprendre les dynamiques écologiques et les transformations environnementales observées dans la région étudiée.

Par ailleurs, l'intégration des approches d'intelligence artificielle et des savoirs écologiques traditionnels a permis d'adopter une méthodologie complémentaire associant outils technologiques modernes et connaissances locales. Cette démarche méthodologique constitue une base essentielle pour l'analyse et l'interprétation des résultats qui seront présentés dans le chapitre suivant.

***Chapitre IV : Traitement spatial
des données et élaboration des
cartes thématiques***

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente le traitement spatial des données et l'élaboration des cartes thématiques de la zone d'étude. Il repose sur l'utilisation des images satellitaires Sentinel-2 et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) afin d'analyser les facteurs environnementaux liés à la désertification dans le sud de la wilaya de Saïda.

Il expose d'abord les sources de données et les étapes de leur prétraitement, puis les méthodes de production des différentes cartes thématiques (relief, végétation, occupation du sol et indices environnementaux). Enfin, il met en évidence l'apport des SIG dans l'analyse multicritère et la compréhension spatiale du phénomène étudié.

IV.2 Sources et préparation des données

Cette étape constitue une phase fondamentale dans toute étude spatiale, car elle conditionne la qualité des analyses et des résultats obtenus. Elle regroupe l'ensemble des opérations relatives à la collecte, l'organisation et le traitement initial des données géographiques utilisées dans le cadre de cette recherche. L'objectif principal est de préparer des données fiables, cohérentes et exploitables afin d'analyser le phénomène de désertification dans la wilaya de Saïda.

IV.2.1 Images satellitaires utilisées

Dans le cadre de cette étude, les images satellitaires constituent la principale source d'information spatiale. Elles permettent d'observer et d'analyser les dynamiques de la surface terrestre à différentes échelles.

Les images utilisées proviennent principalement du satellite **Sentinel-2**, issu du programme européen Copernicus. Ce choix est justifié par plusieurs avantages scientifiques et techniques :

- Une résolution spatiale fine (jusqu'à 10 mètres), permettant une observation détaillée des éléments du paysage.
- Une richesse spectrale importante grâce à plusieurs bandes (visible, proche infrarouge, etc.), facilitant l'analyse du couvert végétal et des sols.
- Une disponibilité gratuite et régulière, garantissant un suivi temporel des changements environnementaux.

Le choix de la date des images a été effectué de manière à minimiser les variations saisonnières susceptibles d'influencer l'interprétation des résultats, notamment en ce qui concerne la végétation et l'humidité des sols. **(Burrough & McDonnell, 1998))**

Ces images ont été importées et traitées sous environnement SIG afin de servir de base à l'ensemble des analyses spatiales réalisées dans cette étude.

IV.2.2 Données topographiques et environnementales

En complément des images satellitaires, plusieurs données thématiques ont été mobilisées afin d'assurer une analyse multicritère du phénomène de désertification.

Ces données comprennent : **(Burrough & McDonnell, 1998))**

- **Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)**

Le MNT représente la structure altimétrique du terrain. Il permet d'extraire des informations essentielles telles que l'altitude, les pentes et les formes du relief. Ces éléments jouent un rôle déterminant dans les processus d'érosion et de dégradation des sols.

- **Les données géologiques**

Ces données décrivent la nature des formations rocheuses présentes dans la zone d'étude. Elles permettent d'identifier les zones fragiles ou résistantes à l'érosion et à la désertification.

- **Les données pédologiques (sols)**

Elles renseignent sur la composition et les caractéristiques des sols (texture, fertilité, perméabilité), qui influencent directement la vulnérabilité des terres à la dégradation.

- **Le réseau hydrographique**

Il s'agit de la représentation des cours d'eau, oueds et bassins versants. Ce réseau joue un rôle important dans la redistribution de l'eau et dans la limitation ou l'aggravation des phénomènes d'érosion.

- **L'occupation du sol**

Cette couche thématique décrit l'utilisation des terres (agriculture, urbanisation, végétation naturelle, zones dégradées). Elle permet d'évaluer la pression anthropique exercée sur les ressources naturelles.

L'ensemble de ces données permet de construire une base solide pour l'analyse des facteurs naturels et humains influençant la désertification.

IV.2.3 Prétraitement des données spatiales

Avant leur exploitation dans les analyses spatiales, les données ont subi plusieurs opérations de prétraitement afin d'assurer leur homogénéité, leur précision et leur compatibilité dans le système d'information géographique.

• Géoréférencement

Le géoréférencement consiste à attribuer des coordonnées géographiques précises à chaque image ou couche de données. Cette opération permet d'intégrer toutes les données dans un même système de référence spatial.

Elle garantit la superposition correcte des différentes couches thématiques (images, MNT, sols, etc.), ce qui est indispensable pour une analyse fiable.

• Correction

Les images satellitaires brutes contiennent souvent des erreurs liées aux conditions d'acquisition (angle de prise de vue, atmosphère, distorsions géométriques).

Ainsi, une correction radiométrique et géométrique a été appliquée afin de :

- améliorer la qualité visuelle des images,
- réduire les distorsions,
- uniformiser les valeurs des pixels,
- rendre les données exploitables pour l'analyse quantitative.

Cette étape est essentielle pour assurer la fiabilité des indices calculés ultérieurement, notamment le SAVI. (DeMERS, 2008)

• Découpage de la zone d'étude

Le découpage (ou extraction spatiale) consiste à isoler la zone d'étude correspondant à la wilaya de Saïda à partir des images et des couches de données globales.

Cette opération permet de :

- limiter l'analyse au périmètre géographique concerné,
- réduire le volume de données à traiter,
- améliorer la précision des résultats,
- faciliter la comparaison entre les différentes couches thématiques.

Le découpage a été réalisé à l'aide des outils SIG, en se basant sur les limites administratives officielles de la wilaya. **(DeMERS, 2008)**

IV.3 Élaboration des cartes thématiques

IV.3.1 Composition colorée en vraies couleurs (RVB)

La composition colorée en vraies couleurs (RVB) représente une image satellitaire de la zone d'étude de la wilaya de Saïda, offrant une visualisation proche de la perception humaine du paysage. Cette représentation constitue une base essentielle pour l'interprétation préliminaire de l'organisation spatiale du milieu.

1. Principe technique

Dans cette étude, j'ai utilisé la composition RVB à partir des bandes visibles du satellite Sentinel-2, en attribuant :

$$RVB = (B4, B3, B2)$$

- B4 : canal rouge
- B3 : canal vert
- B2 : canal bleu

Ce choix permet d'obtenir une image réaliste facilitant l'identification visuelle des différentes unités paysagères. **(Jensen, 2016)**

2. Analyse spatiale de la zone d'étude

À partir de l'observation de la carte obtenue, j'ai pu distinguer plusieurs éléments géographiques importants :

- **Relief et topographie :**

Les zones les plus élevées apparaissent avec des teintes plus sombres, ce qui met en évidence une variabilité du relief à l'intérieur de la zone étudiée.

- **Couvert végétal et sols :**

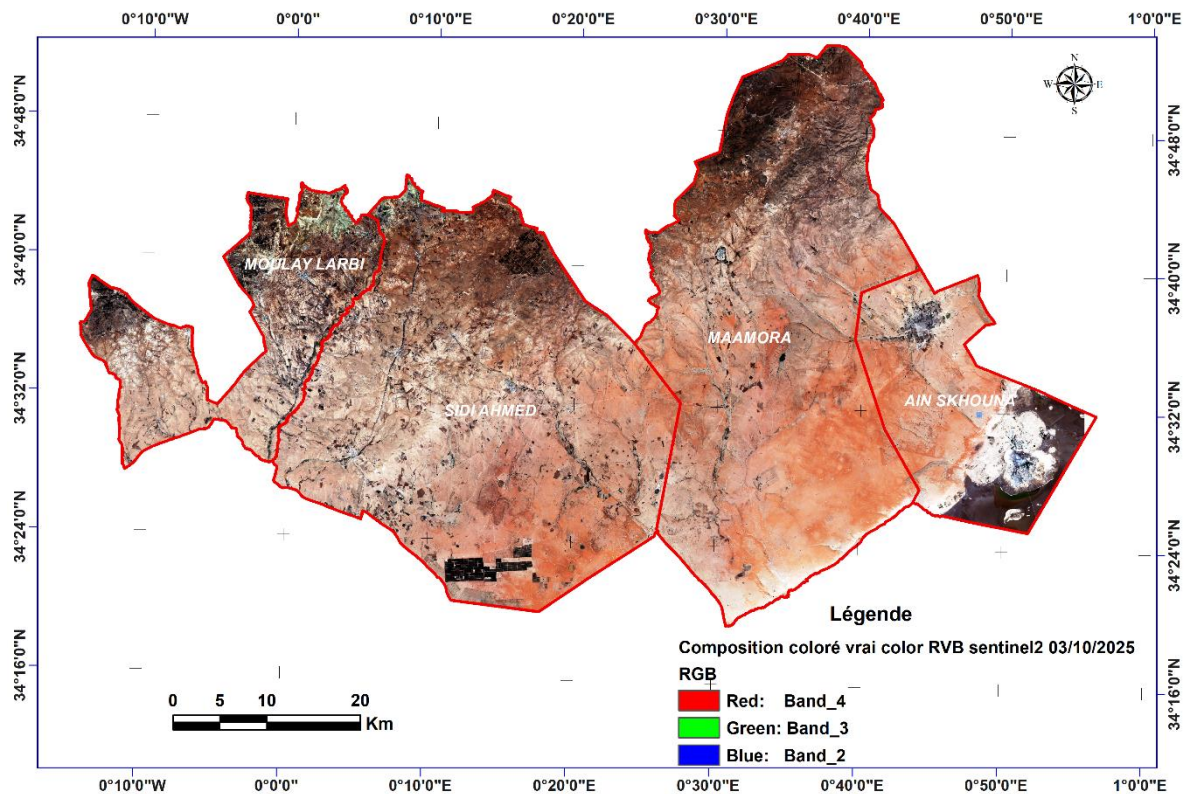
On observe une dominance de teintes brunâtres et ocres, ce qui indique une faible densité de la végétation et la présence de surfaces relativement nues, caractéristiques des milieux semi-arides.

- **Zones urbaines :**

Les espaces urbanisés se distinguent clairement sous forme de structures compactes aux tons gris clair, contrastant avec le milieu naturel environnant.

Zones humides ou salines :

Certaines zones apparaissent très claires ou très sombres, ce qui peut être interprété comme des surfaces salines (sebkhas) ou des zones présentant une humidité superficielle variable. **(Jensen, 2016)**



Carte IV.1: Composition colorée en vraies couleurs (RVB) de la zone d'étude (ArcGIS, 2026).

3. Interprétation et intérêt de la carte

À travers cette analyse visuelle, j'ai pu obtenir une première lecture globale de l'organisation spatiale du territoire étudié. Cette carte m'a permis de :

- mieux comprendre la structure générale du paysage,
- identifier les contrastes entre zones naturelles et anthropisées,
- préparer l'analyse des autres cartes thématiques plus spécifiques (SAVI, pente, sensibilité à la désertification),
- servir de référence visuelle pour la suite du travail cartographique.

En résumé, cette composition en vraies couleurs constitue une étape fondamentale dans mon analyse, car elle m'a permis d'avoir une première compréhension globale du terrain avant d'aborder les traitements plus spécialisés.

IV.3.2 Composition colorée fausse couleur RVB

La composition en fausses couleurs permet une meilleure discrimination des éléments de la surface terrestre, notamment la végétation, les sols et les zones humides. Elle constitue un outil important pour l'analyse visuelle des images satellitaires dans la zone d'étude de la wilaya de Saïda.

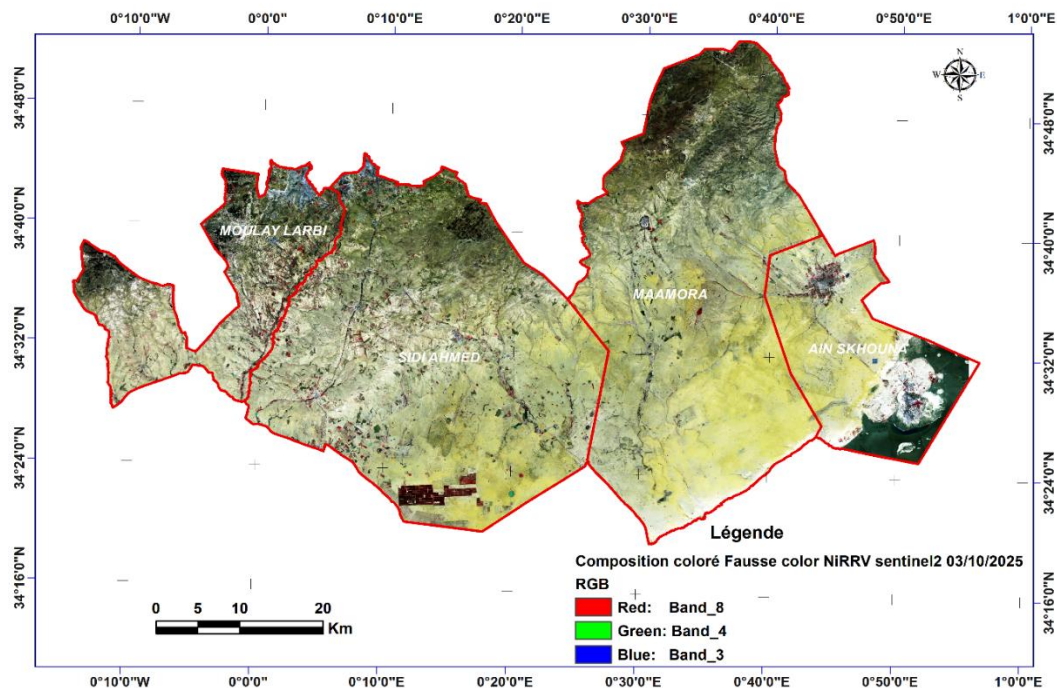
Principe technique

Cette composition repose sur l'intégration des bandes spectrales du satellite Sentinel-2 selon la combinaison suivante :

$$RVB = (B8, B4, B3)$$

- B8 : proche infrarouge (NIR)
- B4 : rouge
- B3 : vert

Cette combinaison permet de mettre en évidence la réponse spectrale de la végétation. (Jensen, 2016)



Carte IV.2: Composition colorée en fausses couleurs (RVB) de la zone d'étude(ArcGIS, 2026).

Description générale de l'image

L'analyse visuelle de la carte montre une forte variabilité spatiale des couleurs, traduisant l'hétérogénéité des unités paysagères de la zone d'étude. On observe une différenciation nette entre les zones naturelles, les espaces agricoles et les zones plus arides, ce qui permet une première lecture globale de l'occupation du sol.

Cette composition constitue une base importante pour l'analyse spatiale, car elle facilite la lecture des contrastes environnementaux et sert de support pour les traitements thématiques ultérieurs, notamment les indices de végétation et les cartes de sensibilité à la désertification.

IV.3.3 Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le modèle numérique de terrain (MNT) représente une surface continue des altitudes du terrain, permettant une description quantitative et précise de la morphologie de la zone d'étude. Il constitue un outil fondamental dans l'analyse des caractéristiques topographiques dans la wilaya de Saïda.

Caractéristiques techniques

Le MNT utilisé dans cette étude présente les caractéristiques suivantes :

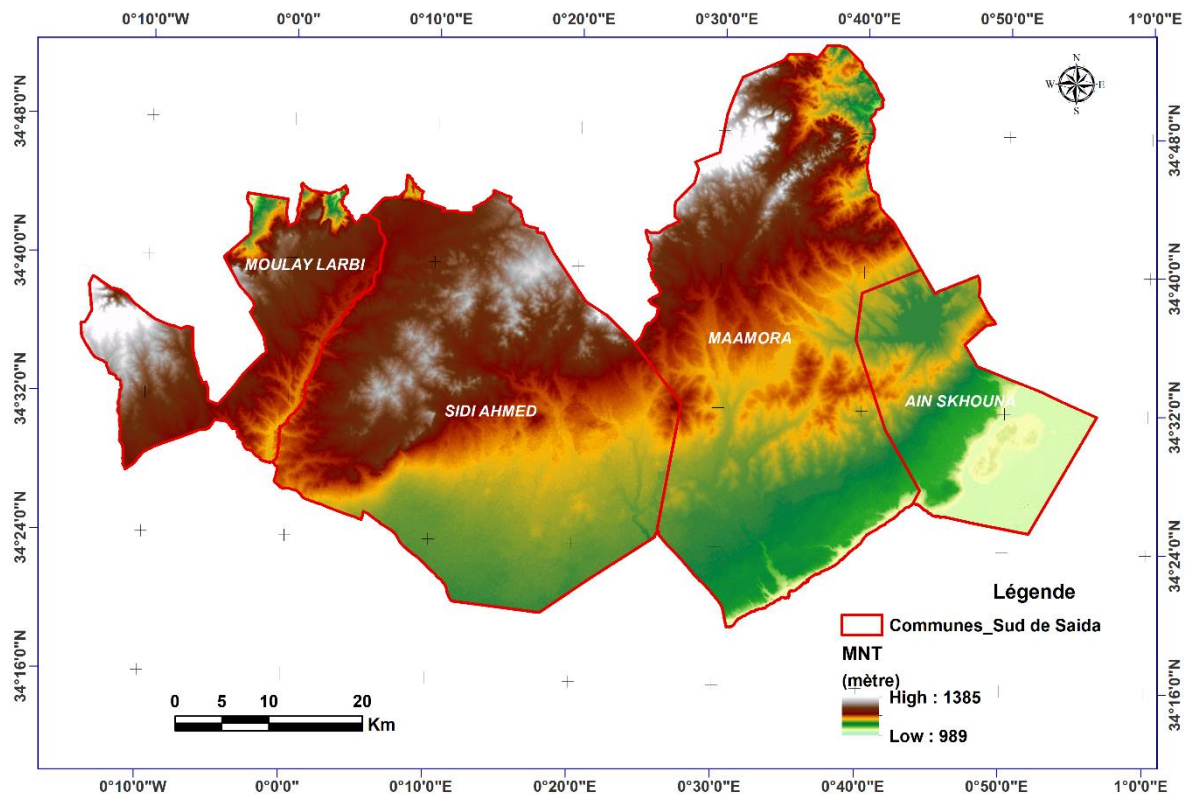
- **Unité de mesure** : mètre (m)
- **Plage altimétrique** : comprise entre 989 m et 1385 m
- **Zone couverte** : communes du sud de la wilaya de Saïda (Maamora, Sidi Ahmed, Moulay Larbi et Aïn Skhouna)

$$Altitude_{min} = 989 \text{ m}; Altitude_{max} = 1385 \text{ m}$$

Description générale du relief

L'analyse visuelle du MNT met en évidence une variation progressive des altitudes à l'intérieur de la zone d'étude. On observe une organisation spatiale hétérogène du relief, caractérisée par la présence de zones élevées, de secteurs intermédiaires et de zones relativement basses. (Longley et al., 2015)

Les altitudes les plus élevées sont localisées dans certaines parties du territoire, tandis que les zones de moindre altitude se situent dans les secteurs périphériques.



Carte IV.3: Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la zone d'étude (ArcGIS, 2026).

Le MNT constitue une base essentielle pour la production d'autres couches thématiques telles que la pente, l'exposition et l'analyse hydrologique. Il permet également d'assurer une meilleure compréhension de la structure physique du terrain et sert de support aux traitements spatiaux ultérieurs.

IV.3.4 Carte des pentes

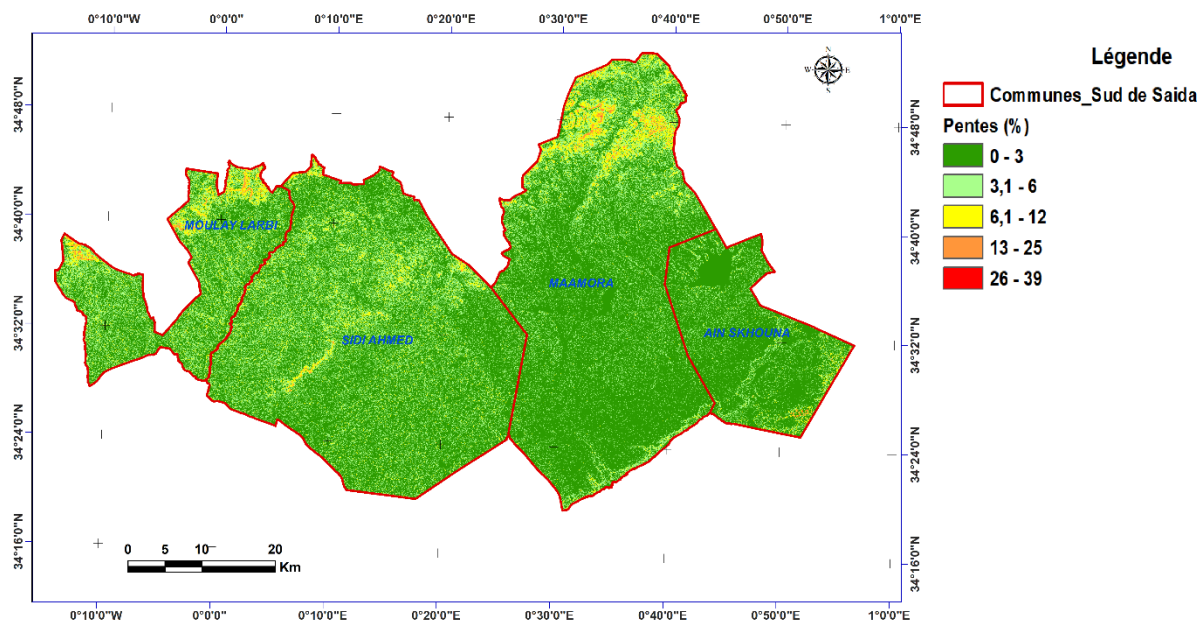
La carte des pentes constitue un produit dérivé du modèle numérique de terrain (MNT). Elle permet de représenter la variation de l'inclinaison du terrain en pourcentage, offrant ainsi une lecture précise de la morphologie du relief dans la zone d'étude de la wilaya de Saïda.

Classification des pentes

Les valeurs des pentes ont été classées en cinq classes principales : (Longley et al., 2015)

- 0 – 3 % : zones très faibles pentes
- 3.1 – 6 % : faibles pentes
- 6.1 – 12 % : pentes modérées
- 13 – 25 % : fortes pentes
- 26 – 39 % : pentes très fortes

$$Pente = \frac{\Delta h}{d} \times 100$$



Carte IV.4: Carte des pentes de la zone d'étude (ArcGIS, 2026).

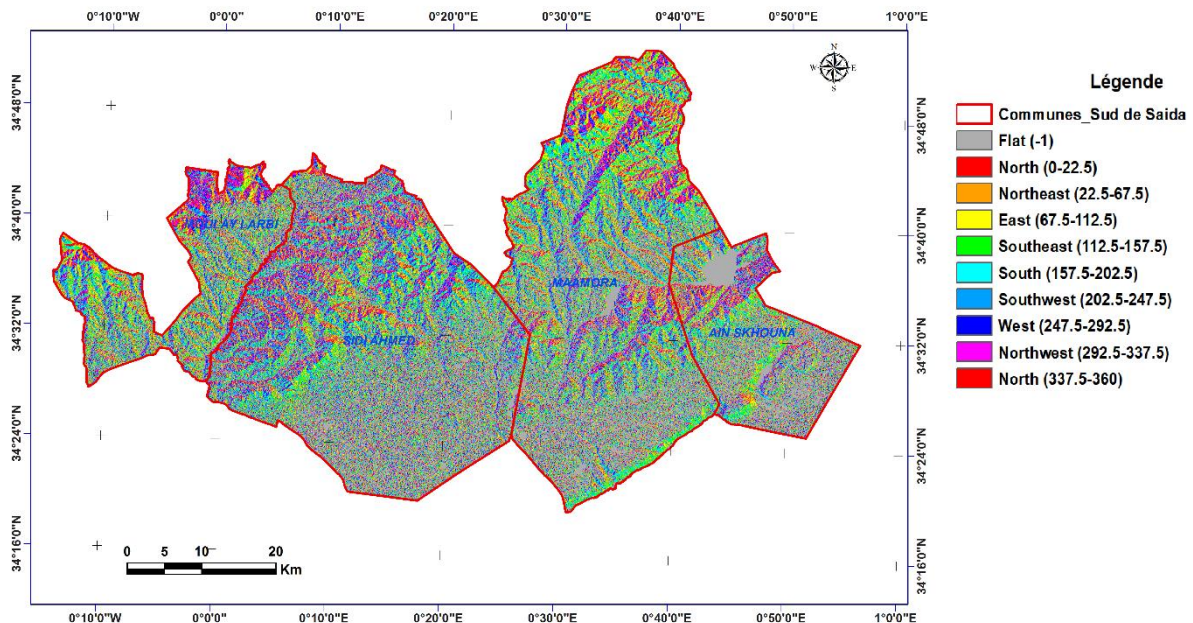
L'analyse de la carte montre une distribution hétérogène des pentes au sein de la zone d'étude. Les faibles pentes occupent une part importante des secteurs centraux et méridionaux, tandis que les zones à fortes pentes sont localisées principalement dans les secteurs en relief.

On observe ainsi une différenciation nette entre les zones planes et les zones accidentées à l'échelle des communes étudiées.

Cette carte constitue un élément fondamental pour la caractérisation morphologique du terrain. Elle représente une base essentielle pour les analyses spatiales ultérieures telles que la modélisation du relief et la comparaison avec d'autres couches thématiques.

IV.3.5 Carte de l'exposition (Aspect)

La carte de l'exposition (Aspect) représente l'orientation des pentes par rapport au nord géographique, exprimée en degrés de 0° à 360°. Elle constitue une variable morphologique importante permettant de décrire la configuration spatiale du relief dans la zone d'étude de la wilaya de Saïda.



Carte IV.5: Carte de l'exposition (Aspect) de la zone d'étude (ArcGIS, 2026).

Principe et classification

L'analyse de l'exposition repose sur la direction de la pente, classée selon les intervalles suivants :

- **Flat (-1)** : zones planes sans orientation définie
- **North** : 0° – 22.5° et 337.5° – 360°
- **East** : 67.5° – 112.5°
- **South** : 157.5° – 202.5°
- **West** : 247.5° – 292.5°
- **Directions intermédiaires** : NE, SE, SW, NW

IV.3.6 Carte géologique

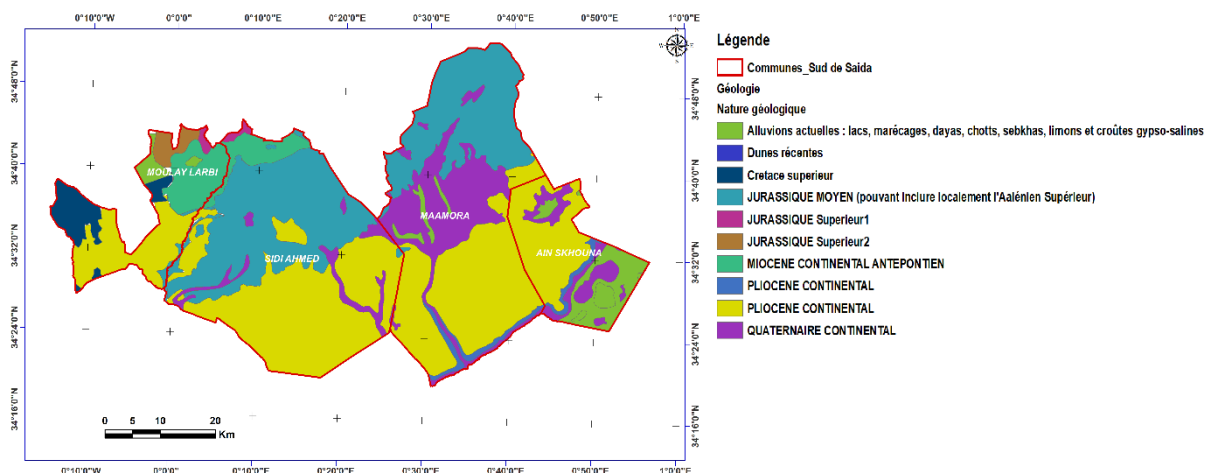
La carte géologique représente la distribution spatiale des formations géologiques dans la zone d'étude de la wilaya de Saïda. Elle permet d'identifier les différents types de formations rocheuses ainsi que leur répartition géographique à l'intérieur du territoire étudié. (DeMers, 2008)

Principales unités géologiques

L'analyse de la carte met en évidence plusieurs unités géologiques principales :

- Formations du **Jurassique** occupant principalement les zones de relief
- Formations du **Crétacé supérieur** localisées dans certaines parties occidentales
- Dépôts du **Miocène et du Pliocène continental** couvrant une grande partie des zones de plateau

Formations du **Quaternaire** correspondant aux dépôts récents et superficiels (DeMers, 2008)



Carte IV.6: Carte géologique de la zone d'étude (ArcGIS, 2026).

La répartition des unités géologiques montre une organisation spatiale différenciée entre les zones montagneuses, les plateaux et les dépressions. Chaque unité présente une extension géographique spécifique au sein de la zone d'étude.

Cette carte constitue une base essentielle pour la compréhension de la structure géologique du terrain. Elle permet de décrire la nature des formations présentes et sert de support pour les analyses spatiales ultérieures.

IV.3.7 Carte du réseau hydrographique

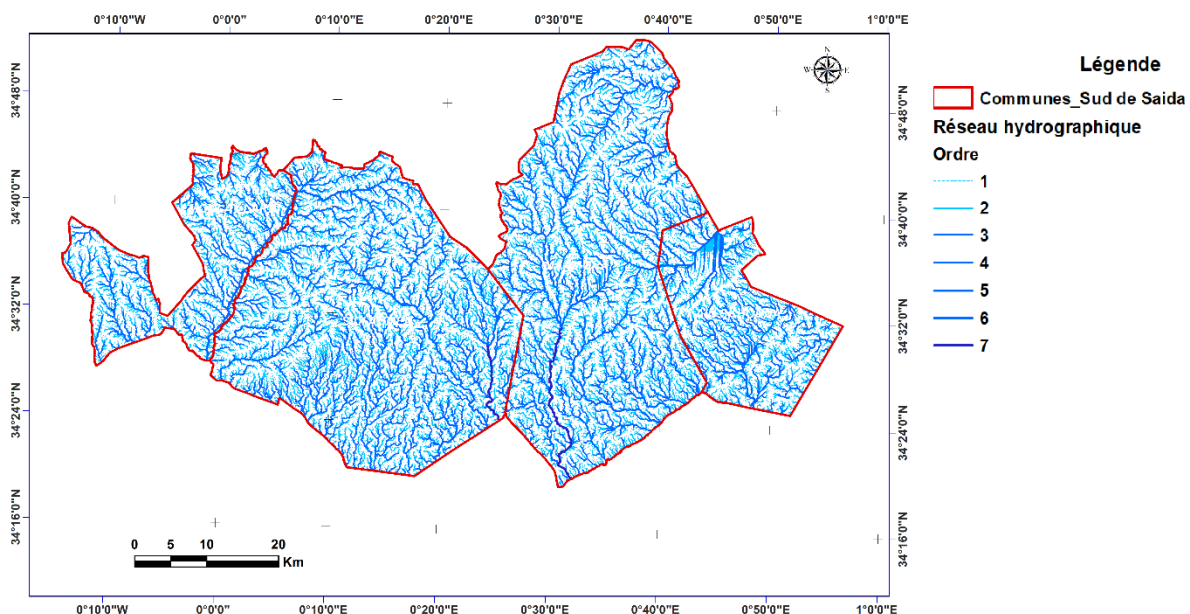
La carte du réseau hydrographique représente la distribution spatiale des cours d'eau et des oueds au sein de la zone d'étude de la wilaya de Saïda. Elle met en évidence l'organisation du système de drainage et sa structuration dans l'espace.

Caractéristiques du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique observé présente une organisation hiérarchisée selon les ordres de Strahler : (ESRI, 2023)

- **Ordres faibles (1 à 3) :** correspondants aux petits chenaux et ravines
- **Ordres élevés (4 à 7) :** correspondant aux oueds principaux et axes de drainage majeurs

$$Ordre_{Strahler} = 1 \rightarrow n$$



Carte IV.7: Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude(ArcGIS, 2026).

L'analyse de la carte montre une répartition non uniforme du réseau hydrographique au sein de la zone d'étude. Les cours d'eau de faible ordre sont largement distribués dans les zones de relief, tandis que les cours d'eau principaux se concentrent dans les axes de drainage majeurs.

On observe également une orientation générale des écoulements selon la configuration topographique du terrain.

Cette carte constitue un élément fondamental pour la compréhension de la structuration du drainage superficiel. Elle représente une base essentielle pour les analyses spatiales liées à l'hydrologie et à la morphologie du terrain.

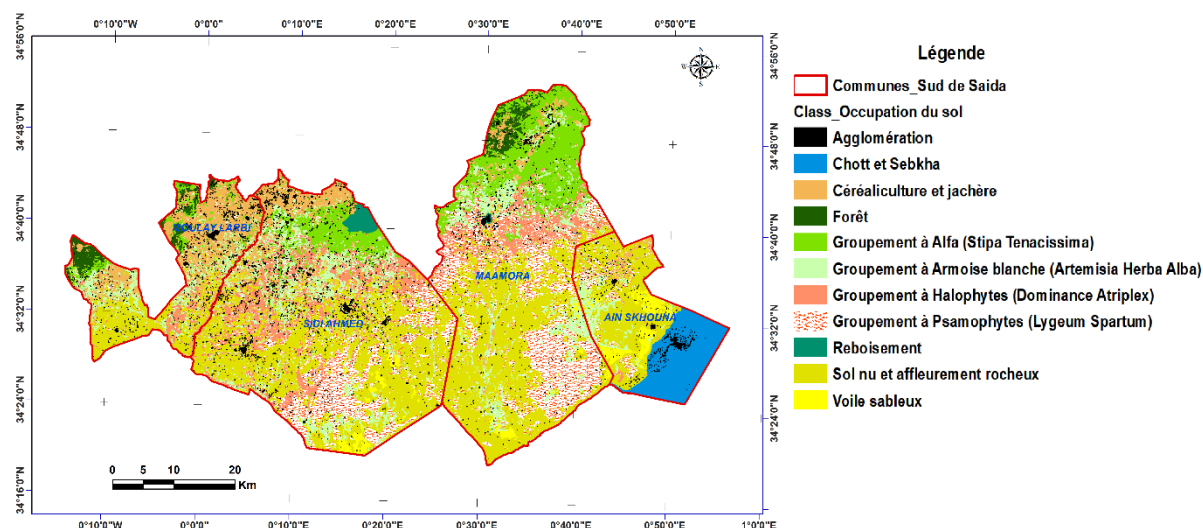
IV.3.8 Carte de l'occupation du sol

La carte de l'occupation du sol représente la répartition spatiale des différentes catégories de couverture terrestre dans la zone d'étude de la wilaya de Saïda. Elle permet de distinguer les unités naturelles et anthropiques présentes dans le territoire étudié.

1. Classes d'occupation du sol

L'analyse de la légende de la carte permet d'identifier plusieurs catégories principales : **(Copernicus Programme, 2023)**

- **Forêts et reboisement** (couleurs sombres et vertes)
- **Groupements steppiques (Alfa, Artemisia)**
- **Formations halophiles et psammophiles**
- **Surfaces agricoles et jachères**
- **Zones urbanisées (agglomérations)**
- **Surfaces nues et affleurements rocheux**
- **Zones de sebkhas et chotts**



Carte IV.8: Carte de l'occupation du sol de la zone d'étude(ArcGIS, 2026).

L'analyse de la carte montre une répartition hétérogène de l'occupation du sol au sein de la zone d'étude. Les formations naturelles dominent certaines zones, tandis que les espaces agricoles et urbanisés occupent d'autres secteurs.

On observe également une différenciation spatiale entre les zones de relief, les zones de plateau et les dépressions.

Cette carte constitue une base essentielle pour la compréhension de la structure spatiale de la couverture terrestre. Elle permet de servir de support aux analyses thématiques ultérieures, notamment les cartes de végétation et de sensibilité environnementale.

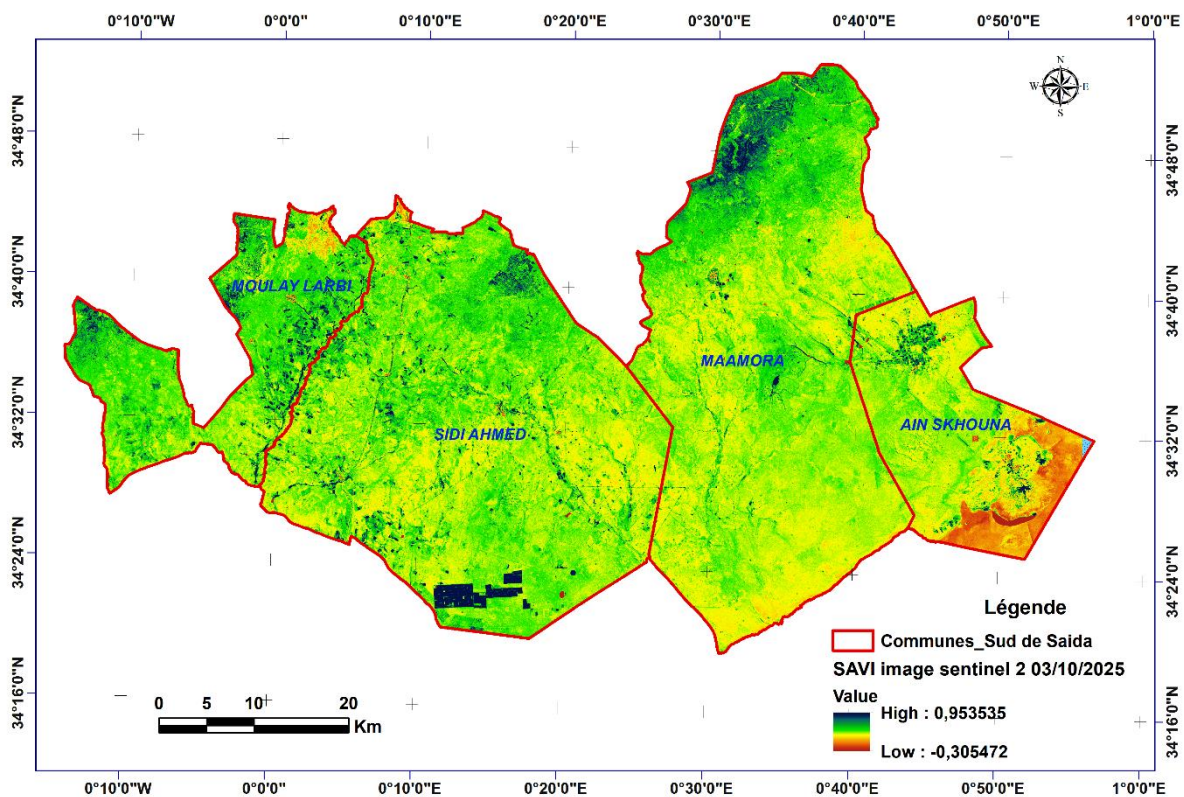
IV.3.9 Calcul et analyse de l'indice SAVI

Le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) est un indice spectral permettant d'évaluer la densité de la végétation en minimisant l'influence du sol, particulièrement dans les zones semi-arides de la wilaya de Saïda.

1. Principe de calcul

L'indice SAVI est calculé à partir des bandes spectrales du proche infrarouge (NIR) et du rouge (RED), selon la formule suivante : (Jensen, 2016)

$$SAVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED+0.5)} \times 1.5$$



Carte IV.9: Carte de l'indice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) de la zone d'étude (ArcGIS, 2026).

La carte SAVI (fichier *savi.tif*) présente une variation spatiale des valeurs de l'indice au sein de la zone d'étude. Les valeurs observées varient globalement entre des valeurs faibles et des valeurs élevées, traduisant une hétérogénéité de la couverture végétale.

On distingue généralement :

- Zones à valeurs élevées : couverture végétale relativement dense
- Zones à valeurs moyennes : végétation steppique clairsemée
- Zones à faibles valeurs : sols nus ou très peu végétalisés

Le SAVI constitue un indicateur important dans l'analyse de la couverture végétale en milieu semi-aride. Il est utilisé comme variable d'entrée dans l'évaluation spatiale des conditions environnementales.

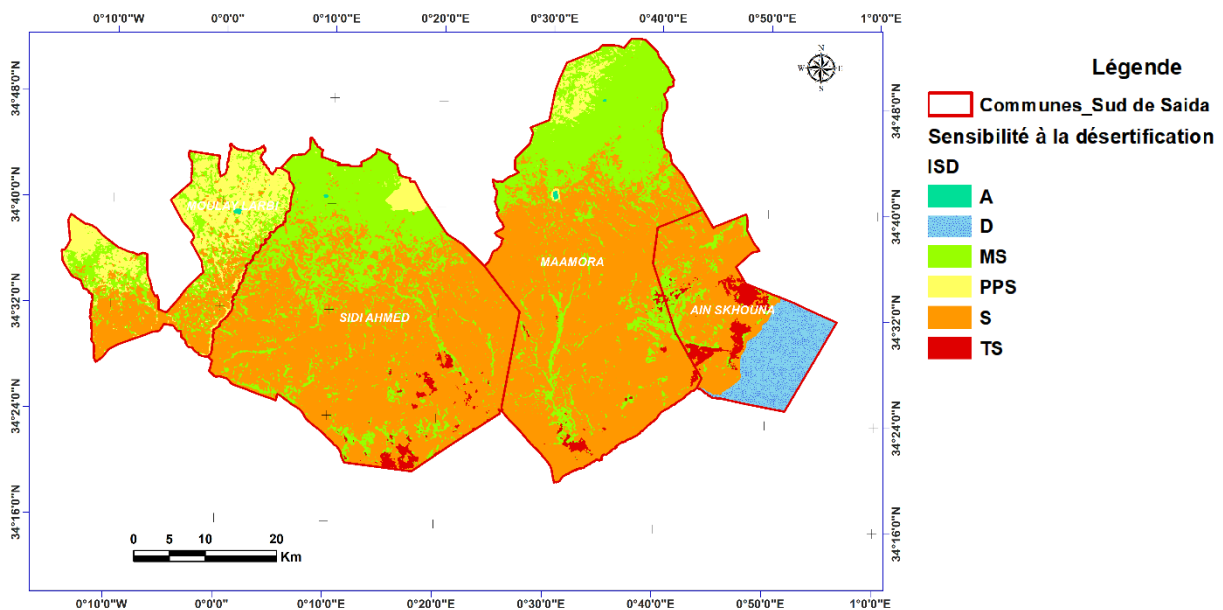
IV.3.10 Carte de sensibilité à la désertification (ISD)

La carte de la sensibilité à la désertification représente une synthèse spatiale des différentes unités environnementales dans la zone d'étude de la wilaya de Saïda. Elle permet de classer l'espace étudié selon différents niveaux de sensibilité à la dégradation des terres.

1. Classes de sensibilité (ISD)

L'analyse de la légende permet d'identifier les classes suivantes : (Eastman, 2016)

- **A** : zones non sensibles ou faiblement sensibles
- **D** : zones hydriques et sebkhas
- **MS** : zones moyennement sensibles
- **PPS** : zones peu à moyennement sensibles
- **S** : zones sensibles
- **TS** : zones très sensibles



Carte IV.10: Carte de l'indice de sensibilité à la désertification (ISD) de la zone d'étude (ArcGIS, 2026).

La lecture de la carte montre une distribution hétérogène des niveaux de sensibilité à travers les différentes communes étudiées. Les classes les plus représentées sont les zones sensibles (S), tandis que les zones très sensibles (TS) apparaissent de manière localisée.

Les zones non sensibles et moyennement sensibles occupent des surfaces plus limitées.

Cette carte constitue un outil de synthèse permettant de représenter l'état global de la sensibilité des terres. Elle représente une base essentielle pour l'analyse spatiale intégrée.

IV.4 Mobilisation des outils numériques dans l'analyse de la désertification

IV.4.1 Rôle des SIG et technologies numériques

Les Systèmes d'Information Géographique (**SIG**) constituent aujourd'hui un outil fondamental dans l'analyse et la compréhension des phénomènes environnementaux complexes, notamment dans les zones arides et semi-arides où les dynamiques naturelles et anthropiques interagissent fortement. Ils permettent de collecter, stocker, structurer, analyser et représenter des données géographiques sous forme de couches spatiales, facilitant ainsi l'étude intégrée des facteurs environnementaux.

Dans le cadre de la présente étude portant sur la sensibilité à la désertification dans le sud de la wilaya de Saïda, les SIG ont été utilisés à travers le logiciel **ArcGIS** afin de traiter différentes couches thématiques (Modèle Numérique de Terrain, pente, exposition, réseau hydrographique, occupation du sol et indice SAVI). Cette démarche permet une analyse multicritère spatiale, indispensable pour comprendre les relations entre les composantes naturelles du milieu et les processus de dégradation des terres. (**Eastman, 2016**)

Les technologies SIG offrent plusieurs avantages majeurs dans l'analyse environnementale :

1. Intégration et gestion des données spatiales

Les SIG permettent de regrouper des données provenant de sources diverses (images satellitaires, cartes topographiques, données géologiques et climatiques) dans une base de données géographique unique. Cette intégration facilite la cohérence des analyses et la comparaison entre plusieurs paramètres environnementaux (Burrough & McDonnell, 1998).

2. Analyse spatiale et modélisation des phénomènes environnementaux

Les outils SIG permettent de réaliser des analyses spatiales avancées telles que la superposition des couches, l'interpolation, la classification et la modélisation des risques environnementaux. Ces techniques sont particulièrement utiles pour identifier les zones sensibles à la désertification et comprendre leurs facteurs explicatifs (Longley et al., 2015).

3. Production de cartes thématiques

Les SIG facilitent la création de cartes thématiques précises et lisibles, représentant des phénomènes complexes comme la dégradation des sols, la végétation ou la topographie. Ces cartes constituent un support essentiel pour l'interprétation scientifique et la communication des résultats (DeMers, 2008).

4. Aide à la décision et gestion environnementale

Les SIG jouent un rôle important dans l'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire et de gestion des ressources naturelles. Ils permettent d'identifier les zones prioritaires d'intervention et de proposer des stratégies de lutte contre la désertification basées sur des données objectives (Jensen, 2016).

Ainsi, les SIG ne se limitent pas à un simple outil de représentation cartographique, mais constituent une véritable approche analytique intégrée permettant de comprendre les dynamiques environnementales et d'appuyer les décisions en matière de gestion durable des territoires.

IV.4.2 Traitement automatisé des données spatiales

Le traitement automatisé des données spatiales correspond à l'ensemble des opérations numériques appliquées aux données géographiques afin d'en extraire des informations exploitables dans une analyse environnementale. Dans les études de dégradation des terres, ce processus permet d'intégrer simultanément des données satellitaires, des modèles numériques de terrain et des indices spectraux au sein d'un système d'information géographique.

Dans cette recherche, l'exploitation des images Sentinel-2 et Landsat ainsi que du MNT a été réalisée à travers des chaînes de traitement automatisées sous environnement SIG. Cette automatisation vise principalement à garantir l'homogénéité des données, réduire les biais liés à la manipulation manuelle et améliorer la reproductibilité des résultats.

1. Harmonisation et préparation des données

Avant toute analyse, les données brutes ont été normalisées à travers plusieurs opérations techniques :

- correction radiométrique et atmosphérique afin de limiter les effets liés aux conditions d'acquisition ;
- géoréférencement selon un système de projection unique ;
- extraction du périmètre d'étude par découpage spatial ;
- rééchantillonnage des résolutions pour assurer la compatibilité des couches.

Ces étapes constituent une phase indispensable dans toute analyse géospatiale afin d'assurer la cohérence entre les différentes sources de données (**Jensen, 2016**).

2. Génération automatisée des variables environnementales

Le traitement automatisé permet ensuite de produire des variables dérivées essentielles à l'analyse environnementale. Parmi celles-ci figurent les indices de végétation, notamment le SAVI, calculé directement à partir des bandes spectrales.

$$SAVI = \frac{(NIR - Red)(1 + L)}{NIR + Red + L}$$

où L est un facteur de correction permettant de réduire l'influence du sol nu, particulièrement important dans les zones semi-arides (Huete, 1988).

3. Extraction automatique des paramètres morphologiques

À partir du MNT, plusieurs variables morphométriques ont été générées automatiquement :

- pente ;
- orientation des versants ;
- altitude ;
- drainage potentiel.

Ces dérivations permettent une meilleure compréhension des contraintes physiques du milieu, tout en facilitant les analyses spatiales multi-échelles (Burrough & McDonnell, 1998).

4. Intérêt du traitement automatisé

L'automatisation du traitement spatial permet d'intégrer un grand volume de données hétérogènes dans un cadre unifié d'analyse. Elle constitue ainsi une base indispensable pour les modèles de vulnérabilité environnementale, notamment dans les zones steppiques où les interactions entre climat, sol et végétation sont fortement dynamiques.

IV.4.3 Superposition des couches thématiques

La superposition des couches thématiques constitue une méthode centrale des SIG permettant l'analyse conjointe de plusieurs variables environnementales. Elle repose sur la combinaison spatiale de couches géographiques afin d'identifier les interactions entre facteurs naturels et anthropiques.

Dans cette étude, cette méthode a permis de croiser les principaux déterminants de la désertification : végétation, topographie, lithologie et hydrologie.

1. Fondement méthodologique

La superposition spatiale repose sur une logique d'intégration multi-niveaux où chaque couche représente une variable explicative. Cette approche est largement utilisée dans les modèles d'analyse de vulnérabilité environnementale (Longley et al., 2015).

2. Construction d'un modèle multicritère

Chaque facteur est transformé en variable standardisée afin de permettre leur comparaison. L'intégration se fait selon une logique pondérée :

- pente élevée → facteur d'érosion ;
- SAVI faible → indicateur de stress végétal ;
- formations géologiques meubles → instabilité des sols ;
- faibles densités hydrologiques → déficit hydrique.

Cette combinaison permet de produire une lecture intégrée des conditions environnementales.

3. Production des surfaces de synthèse

La superposition permet la génération de cartes synthétiques représentant la distribution spatiale des conditions de vulnérabilité. Ces cartes constituent un support décisionnel important pour l'identification des zones prioritaires d'intervention.

Selon ESRI (2023), les analyses de superposition représentent une base fondamentale des modèles de gestion environnementale intégrée.

IV.4.4 Identification des zones sensibles à la désertification

L'identification des zones sensibles vise à spatialiser les secteurs présentant un degré élevé de vulnérabilité à la dégradation des terres. Elle repose sur une approche multicritère intégrant les variables biophysiques issues des analyses précédentes.

1. Logique d'évaluation

Chaque facteur est interprété selon son rôle dans le processus de dégradation :

- végétation réduite → faible protection des sols ;
- pente forte → intensification du ruissellement ;
- exposition sud → augmentation de l'aridité ;
- sols fragiles → faible résistance à l'érosion ;
- faible disponibilité hydrique → stress écologique.

2. Intégration des facteurs

La combinaison spatiale de ces variables permet d'identifier des zones où plusieurs contraintes se superposent. Ces secteurs sont considérés comme critiques en raison de la convergence des facteurs de dégradation (ESRI, 2023).

3. Typologie des zones

L'analyse permet de distinguer :

- zones stables ;
- zones peu sensibles ;

- zones intermédiaires ;
- zones fortement sensibles.

4. Apport analytique

Cette étape constitue une phase intermédiaire essentielle entre l'analyse thématique et la modélisation globale, permettant de structurer spatialement le phénomène de désertification.

IV.4.5 Élaboration de la carte ISD

L'élaboration de la carte de sensibilité à la désertification constitue l'aboutissement de l'approche méthodologique. Elle vise à synthétiser l'ensemble des variables environnementales dans un indicateur unique : l'Indice de Sensibilité à la Désertification (ISD).

1. Construction de l'indice

L'ISD repose sur une agrégation pondérée des variables normalisées :

$$ISD = \sum(w_i \cdot X_i)$$

où :

- X_i représente les variables environnementales standardisées ;
- w_i représente les poids attribués à chaque facteur selon son influence sur la désertification (DeMers, 2008).

2. Classification des niveaux

Le territoire est classé selon une échelle de vulnérabilité allant de zones stables à zones très sensibles :

- zones non sensibles ;
- zones moyennement sensibles ;
- zones sensibles ;
- zones très sensibles ;
- zones particulières (sebkhas et chotts).

3. Étapes de production

La réalisation de la carte suit un processus structuré :

- standardisation des variables ;
- pondération multicritère ;
- intégration spatiale sous SIG ;
- calcul de l'indice global ;
- classification finale.

4. Interprétation globale

La distribution spatiale de l'ISD révèle une forte hétérogénéité, marquée par une concentration des zones à forte sensibilité dans les secteurs caractérisés par la combinaison de stress climatique, fragilité des sols et pression anthropique.

5. Portée opérationnelle

La carte ISD constitue un outil d'aide à la décision permettant :

- la hiérarchisation des zones d'intervention ;
- la planification des actions de lutte contre la désertification ;
- l'appui aux politiques de gestion durable des ressources naturelles.

IV.5 Exploitation statistique et représentation graphique des résultats

Tableau IV.1: Caractéristiques altimétriques de la zone d'étude (MNT)

Commune	Altitude minimale (m)	Altitude maximale (m)	Altitude moyenne (m)	Caractéristiques morphologiques
Moulay Larbi	≈ 1100	1385	≈ 1240	Zone montagneuse à relief élevé et fortement accidenté
Sidi Ahmed	≈ 1050	≈ 1350	≈ 1200	Relief varié composé de plateaux et de versants modérés
Maamora	≈ 1000	≈ 1300	≈ 1150	Relief en pente progressive orienté vers le sud
Ain Skhouna	989	≈ 1100	≈ 1045	Zone basse à caractère dépressionnaire (zone de sebkha)

Le modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude met en évidence un gradient altimétrique décroissant du nord vers le sud-est. Les valeurs les plus élevées sont observées au niveau de Moulay Larbi, traduisant un relief montagneux structurant, tandis que les altitudes les plus faibles se concentrent au niveau d'Ain Skhoua, correspondant à une zone de dépression favorable à l'accumulation des eaux et à la formation des sebkhas. Cette organisation topographique influence directement la dynamique hydrologique et les processus d'érosion dans la région.

Tableau IV.2: Répartition des classes de pentes dans la zone d'étude (pente.tif)

Classe de pente (%)	Surface (ha)	Pourcentage (%)	Interprétation géomorphologique
0 – 3 %	196 805.7	59.78 %	Zones planes / plaines et bas-fonds
3 – 6 %	89 360.3	27.14 %	Faibles ondulations du terrain
6 – 12 %	23 423.2	7.11 %	Pentes moyennes
12 – 25 %	13 414.1	4.07 %	Pentes fortes
> 25 %	6 240.0	1.90 %	Reliefs accidentés / zones montagneuses
Total	329 243.3	100 %	—

Analyse scientifique de la carte des pentes

L'analyse de la carte des pentes (pente.tif) révèle une dominance très nette des faibles pentes (0–3 %), représentant près de 60 % de la superficie totale de la zone d'étude. Cette configuration traduit un paysage majoritairement constitué de plaines et de bas-fonds, favorables aux activités agricoles et pastorales, mais également sensibles aux phénomènes de stagnation hydrique et d'érosion éolienne.

Les pentes comprises entre 3 et 6 % occupent environ 27 % du territoire, correspondant à des zones de transition morphologique. Les pentes moyennes à fortes (6–25 %) restent limitées et se concentrent principalement dans les secteurs nord-ouest, notamment vers Moulay Larbi, où le relief devient plus accidenté.

Enfin, les fortes pentes supérieures à 25 % représentent une faible proportion (moins de 2 %), mais jouent un rôle géomorphologique important en favorisant les processus d'érosion hydrique et le ruissellement rapide.

Tableau IV.3: Répartition des classes d'exposition dans la zone d'étude (exposition.tif)

Orientation	Surface (ha)	Pourcentage (%)	Interprétation environnementale
Nord	35 420.5	10.8 %	Versants peu exposés au rayonnement solaire
Nord-Est	41 250.2	12.5 %	Exposition modérée, conditions relativement fraîches
Est	38 900.8	11.8 %	Exposition au soleil du matin
Sud-Est	36 120.4	11.0 %	Augmentation progressive de l'ensoleillement
Sud	45 680.9	13.9 %	Zones fortement exposées au rayonnement solaire
Sud-Ouest	42 350.3	12.9 %	Forte insolation et évaporation élevée
Ouest	37 450.6	11.4 %	Exposition au soleil de l'après-midi
Nord-Ouest	39 800.1	12.1 %	Conditions relativement équilibrées
Flat	12 269.5	3.7 %	Zones planes sans orientation dominante

Analyse scientifique de la carte de l'exposition

L'analyse de la carte d'exposition (exposition.tif) met en évidence une distribution relativement équilibrée des orientations des versants dans la zone d'étude, traduisant une morphologie hétérogène dominée par des reliefs ondulés et des systèmes de plateaux.

Cependant, les orientations sud, sud-est et sud-ouest regroupent à elles seules près de 38 % de la superficie totale. Ces versants sont les plus exposés au rayonnement solaire direct, ce qui entraîne une augmentation de la température du sol, une évapotranspiration plus élevée et une réduction de l'humidité édaphique. Ces conditions favorisent la dégradation du couvert végétal, comme le confirme l'analyse du SAVI.

À l'inverse, les versants orientés vers le nord et le nord-est présentent des conditions microclimatiques plus favorables à la conservation de la végétation, en raison d'une exposition solaire réduite.

Enfin, la présence de zones planes (3.7 %) correspond principalement aux bas-fonds et aux zones de transition morphologique, souvent associées à des accumulations hydriques ou à des sols plus sensibles à la salinisation.

Tableau IV.4 : Répartition des classes d'occupation du sol dans la zone d'étude (dsertificationoccupation du sol.tif)

Classe d'occupation du sol	Surface (ha)	Pourcentage (%)	Interprétation environnementale
Alfa (Stipa tenacissima)	115 234.5	35.0 %	Formation steppique dominante
Armoise blanche	82 310.8	25.0 %	Parcours pastoraux extensifs
Agriculture et jachère	46 094.1	14.0 %	Activités agricoles vivrières
Sol nu et affleurements rocheux	39 509.2	12.0 %	Zones dégradées et sensibles
Forêt / Reboisement	19 754.6	6.0 %	Massifs forestiers localisés
Chott et Sebkha	16 462.2	5.0 %	Milieux salins humides
Agglomération	6 584.9	2.0 %	Tissu urbain limité
Halophytes	3 292.4	1.0 %	Végétation adaptée à la salinité
Total	329 242.7	100 %	—

Analyse scientifique de l'occupation du sol

L'analyse de la carte d'occupation du sol met en évidence une domination nette des formations steppiques, notamment l'Alfa (*Stipa tenacissima*) et l'Armoise blanche, qui représentent à elles seules environ 60 % de la superficie totale. Cette configuration confirme le caractère pastoral dominant de la zone d'étude.

Cependant, la présence non négligeable de surfaces en sol nu (12 %) traduit une dynamique de dégradation progressive du couvert végétal, probablement liée à la pression pastorale et aux conditions climatiques arides. Ces zones constituent des foyers potentiels d'initiation de la désertification.

Les formations forestières restent très localisées (6 %), principalement dans les zones montagneuses de Moulay Larbi, jouant un rôle écologique important dans la stabilisation des sols.

Les chotts et sebkhas (5 %) se concentrent dans les zones basses, notamment vers Aïn Skhouana, confirmant la corrélation avec les résultats du MNT. Enfin, l'urbanisation demeure marginale (2 %), ce qui indique que la pression anthropique directe est faible comparée à la pression pastorale.

IV.5.1.Calcul et analyse de l'indice SAVI

1. Principe et intérêt de l'indice SAVI

L'indice de végétation ajusté au sol (**SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index**) est un indice spectral utilisé pour l'analyse de la couverture végétale, particulièrement adapté aux régions semi-arides et arides. Il constitue une amélioration du NDVI, car il réduit l'influence de la réflectance du sol nu, très dominante dans ce type de milieux.

Dans la zone d'étude du sud de Saïda, les valeurs de SAVI issues du fichier *savi.tif* varient entre **-0.305 (valeur minimale)** et **0.953 (valeur maximale)**, ce qui traduit une forte hétérogénéité spatiale de la couverture végétale.

2. Répartition de la couverture végétale selon les valeurs de SAVI

À partir de l'interprétation de la carte, les classes suivantes ont été identifiées :

Classe de SAVI	État de la couverture végétale	Pourcentage (%)	Interprétation géographique
-0.3 → 0	Sols nus / Sebkhas	18%	Zones salines et surfaces dénudées
0 → 0.2	Végétation très faible	45%	Steppes dégradées et parcours pauvres
0.2 → 0.5	Végétation moyenne	27%	Zones steppiques à alfa et cultures pluviales

0.5 → 1	Végétation dense	10%	Massifs forestiers et zones irriguées
---------	------------------	-----	---------------------------------------

3. Analyse statistique (Histogramme)

L'analyse statistique montre une dominance nette des faibles valeurs de SAVI (0–0.2), représentant environ **45%** de la superficie totale. Cette distribution confirme la nature semi-aride de la région et la faiblesse générale du couvert végétal.

Les valeurs négatives (jusqu'à -0.305) correspondent principalement aux zones de sebkhas et aux sols fortement dégradés, notamment dans la partie sud-est de la commune d'Aïn Skhouna.

4. Interprétation des résultats

- **Dominance de la végétation faible** : Plus de la moitié de la zone présente un couvert végétal faible ou très dispersé, ce qui traduit une forte pression environnementale.
- **Zones critiques** : Les valeurs négatives sont localisées dans les zones salines et dépressions topographiques, indiquant un processus avancé de dégradation des sols.
- **Zones favorables** : Les valeurs élevées (> 0.5) sont limitées et se concentrent dans les poches forestières du nord-ouest (notamment Moulay Larbi) et dans les zones agricoles irriguées.

IV.5.2. Carte du réseau hydrographique

1. Éléments extraits du réseau hydrographique

La carte du réseau hydrographique (*reseauhydro.tif*) met en évidence un système de drainage dense composé d'oueds et d'écoulements temporaires qui prennent naissance dans les zones montagneuses du nord (Moulay Larbi et Maamora) et convergent vers les zones basses situées au sud-est, notamment la dépression de Chott Ech-Chergui à Aïn Skhouna.

L'analyse du réseau permet de déterminer la hiérarchisation des cours d'eau selon la méthode de **Strahler**, ainsi que la dynamique de l'écoulement superficiel.

2. Tableau des ordres hydrographiques

Tableau IV.5 : Tableau des ordres hydrographiques

Ordre (Strahler)	Nombre estimé de segments	Longueur totale (km)	Interprétation hydrologique
Ordres 1 et 2	Très élevé	~1250 km	Petits ravins et ruissellement diffus en zones montagneuses
Ordres 3 et 4	Moyen	~480 km	Affluents intermédiaires collectant les eaux de ruissellement
Ordres 5 et 6	Faible	~210 km	Oueds principaux bien structurés
Ordre 7	Unique	~85 km	Collecteur principal vers la zone de dépression
Total	—	~2025 km	Réseau global de drainage

La densité de drainage estimée est d'environ **0,61 km/km²**, ce qui indique une organisation hydrologique relativement développée, favorisant un écoulement rapide lors des épisodes pluvieux.

3. Analyse morphologique et interprétation spatiale

L'organisation du réseau hydrographique présente une structure **dendritique** dans les zones montagneuses (Moulay Larbi et Maamora), caractérisée par une forte ramification des cours d'eau. En revanche, dans les zones de plaine, le réseau adopte localement une structure plus **parallèle**, liée à la pente et à la lithologie.

On observe également une convergence nette des écoulements vers la commune d'Aïn Skhouna, ce qui explique la formation des zones humides et salines (sebkhas) par accumulation et évaporation des eaux.

4. Interprétation hydrologique générale

Le réseau hydrographique du sud de Saïda joue un rôle essentiel dans la dynamique environnementale de la région :

- **Contrôle du ruissellement** : Les oueds assurent l'évacuation des eaux de pluie depuis les zones élevées vers les dépressions.

- **Alimentation des nappes** : Les infiltrations le long des lits d'oueds contribuent à la recharge des aquifères, notamment dans les formations perméables.
- **Formation des sebkhas** : L'accumulation des eaux dans les zones basses favorise la salinisation et la formation de milieux humides temporaires.

IV.5.3. Carte de la sensibilité à la désertification (ISD)

1. Apports de la carte ISD

La carte de sensibilité à la désertification (*dsertificationsestibilité.tif*) constitue un outil de synthèse majeur, intégrant l'ensemble des paramètres environnementaux étudiés (relief, occupation du sol, végétation, hydrographie et conditions géomorphologiques). Elle permet d'évaluer le degré de vulnérabilité des écosystèmes dans le sud de la wilaya de Saïda.

L'analyse spatiale met en évidence une forte dominance des classes de sensibilité élevée, traduisant une dégradation progressive des milieux naturels.

2. Tableau des superficies des classes ISD

Tableau IV.6 : Tableau des superficies des classes ISD

	Signification	Superficie (Ha)	Pourcentage (%)
A	Zones non sensibles / stables	191.52	0.1%
D	Zones dégradées / sebkhas	13,414.14	4.1%
MS	Moyennement sensibles	89,360.32	27.1%
PPS	Faiblement sensibles	23,423.21	7.1%
S	Sensibles	196,805.70	59.8%
TS	Très sensibles	6,239.95	1.9%
Total	—	329,434.7	100%

3. Représentations graphiques

a. Histogramme de distribution

L'histogramme met en évidence une forte domination de la classe **S (Sensible)**, suivie de la classe **MS (Moyennement sensible)**. Les classes stables (A et PPS) restent marginales, confirmant la fragilité globale du territoire.

b. Diagramme circulaire

Le diagramme circulaire montre que les classes **S et TS représentent environ 61–62%** de la superficie totale, ce qui traduit une exposition généralisée au risque de désertification.

4. Analyse comparative par communes

- **Moulay Larbi** : présence de zones relativement stables (A et PPS), liée à l'altitude et à la couverture forestière.
- **Sidi Ahmed** : dominance quasi continue de la classe **S**, indiquant une forte vulnérabilité liée à la dégradation des sols et à la pression pastorale.
- **Maamora** : situation intermédiaire avec coexistence des classes **MS** et **S**, traduisant une transition écologique instable.
- **Aïn Skhouna** : présence marquée de la classe **D** (zones salines et sebkhas) et apparition de la classe **TS**, ce qui en fait le secteur le plus critique de la zone d'étude.

5. Interprétation générale

L'analyse de la carte ISD révèle un gradient spatial clair de dégradation allant du nord vers le sud :

- Les zones nordiques sont relativement mieux préservées grâce à la topographie et au couvert végétal.
- Les zones centrales et méridionales sont dominées par des classes de forte sensibilité.
- Les zones de dépression, notamment Aïn Skhouna, constituent des foyers avancés de dégradation liés à la salinisation et à la dynamique éolienne.

IV.6 Intégration des approches numériques intelligentes dans cette étude

Dans cette étude, les outils numériques ont été utilisés afin d'automatiser plusieurs étapes du traitement spatial et d'améliorer l'analyse de la désertification dans le sud de la wilaya de Saïda.

Le traitement a été réalisé sous ArcGIS à partir des images Sentinel-2, selon une chaîne de traitement numérique comprenant :

- l'importation et l'organisation des données satellitaires ;
- le découpage automatique de la zone d'étude ;
- l'extraction des paramètres topographiques à partir du MNT ;
- le calcul automatique de l'indice SAVI ;
- la classification des couches thématiques ;
- la superposition multicritère des données spatiales.

L'approche numérique adoptée repose sur une logique d'analyse spatiale intelligente basée sur l'automatisation des traitements SIG et l'intégration multicritère des données environnementales. Bien que cette recherche ne repose pas sur des algorithmes avancés de Deep Learning ou d'apprentissage automatique, elle mobilise des méthodes numériques capables d'analyser simultanément plusieurs variables spatiales afin de produire une évaluation automatisée de la sensibilité à la désertification.

L'intégration des différentes couches thématiques (SAVI, pente, occupation du sol, hydrographie et topographie) dans un environnement SIG permet une forme d'aide à la décision spatiale, considérée comme une approche proche des systèmes intelligents d'analyse environnementale.

Cette démarche a permis :

- de réduire le temps de traitement des données ;
- d'améliorer la précision cartographique ;
- d'automatiser les calculs spatiaux ;
- de faciliter l'identification des zones vulnérables ;
- d'améliorer la cohérence des résultats obtenus ;
- de faciliter la production de la carte finale ISD.

Ainsi, l'intégration des traitements numériques dans les SIG constitue une méthode moderne et efficace pour l'analyse des milieux semi-arides et le suivi des phénomènes de dégradation environnementale.

IV.7 Chaîne de traitement réalisée sous ArcGIS

Le traitement spatial réalisé dans cette étude suit une chaîne méthodologique structurée sous ArcGIS.

Les principales opérations effectuées sont :

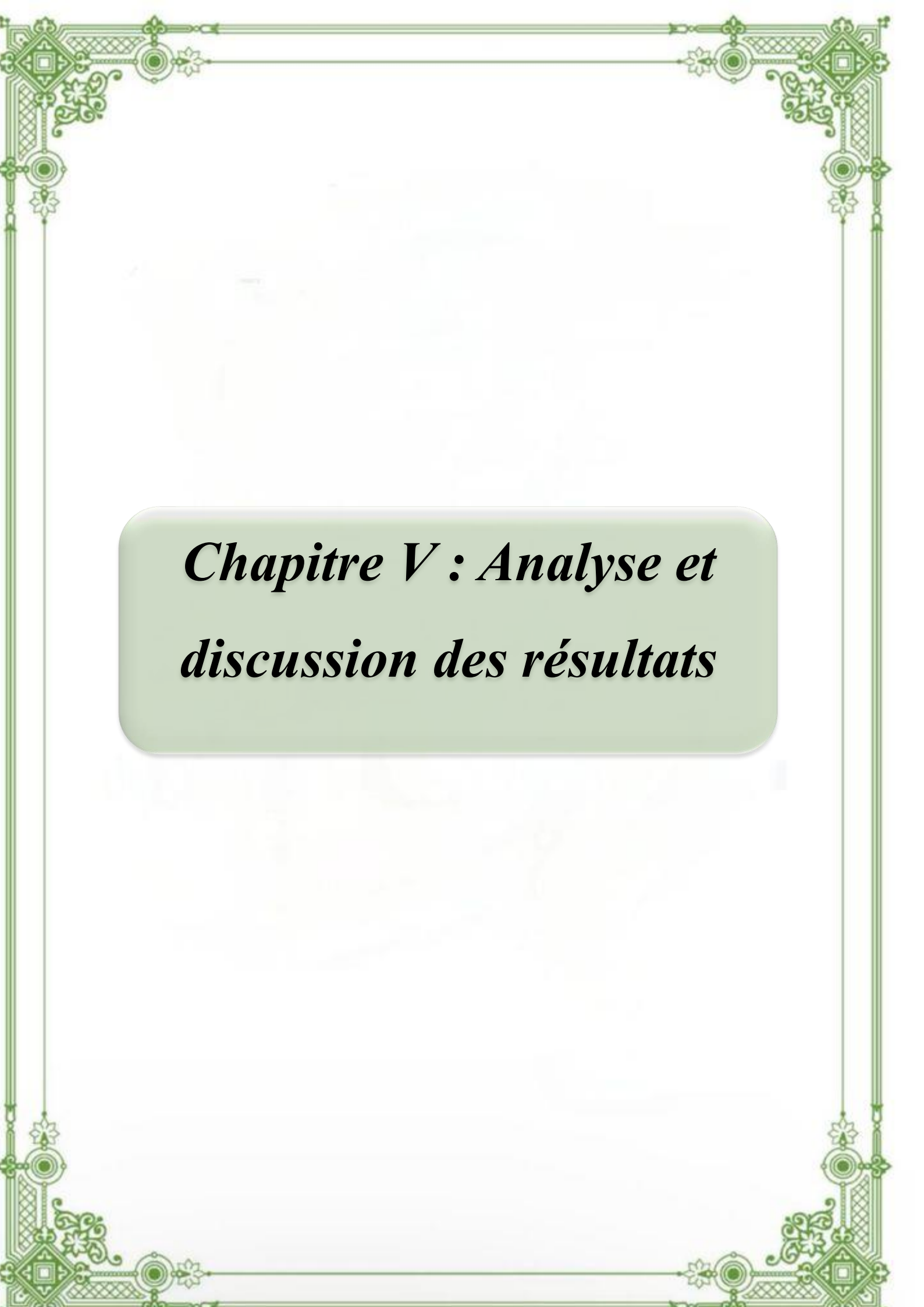
1. Prétraitement des images Sentinel-2 ;
2. Création du Modèle Numérique de Terrain (MNT) ;
3. Génération des cartes de pente et d'exposition ;
4. Calcul de l'indice SAVI à partir des bandes spectrales ;
5. Classification de l'occupation du sol ;
6. Extraction du réseau hydrographique ;
7. Reclassification des couches selon leur niveau de sensibilité ;
8. Superposition multicritère des paramètres environnementaux ;
9. Élaboration de la carte finale de sensibilité à la désertification (ISD).

Cette chaîne de traitement permet d'assurer une cohérence entre les différentes données spatiales et d'obtenir une représentation synthétique de la vulnérabilité environnementale dans la zone d'étude.

IV.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de réaliser une analyse spatiale intégrée de la désertification dans le sud de la wilaya de Saïda à travers l'utilisation des images satellitaires Sentinel-2 et des outils des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Les différentes étapes de traitement des données, de production des cartes thématiques et d'analyse multicritère ont permis de mieux comprendre l'organisation spatiale des facteurs environnementaux influençant la dégradation des terres. Les résultats obtenus à partir du MNT, des cartes de pente, d'exposition, d'occupation du sol, du réseau hydrographique et de l'indice SAVI montrent une forte hétérogénéité du milieu naturel ainsi qu'une faiblesse générale du couvert végétal dans plusieurs secteurs de la zone d'étude.

L'élaboration de la carte de sensibilité à la désertification (ISD) a permis de mettre en évidence une dominance des zones sensibles et très sensibles, particulièrement dans les secteurs méridionaux et les zones de sebkhas d'Aïn Skhouna, tandis que les zones montagneuses du nord présentent une stabilité relative grâce à une meilleure couverture végétale et à des conditions topographiques plus favorables. Ainsi, l'utilisation des SIG et des technologies numériques a démontré leur efficacité dans l'identification des zones vulnérables et dans l'aide à la compréhension des dynamiques environnementales. Ce travail constitue donc une base scientifique importante pour la gestion durable des ressources naturelles et pour l'orientation des stratégies de lutte contre la désertification dans la région étudiée.



Chapitre V : Analyse et discussion des résultats

V.1 Analyse spatiale des facteurs environnementaux influençant la désertification

V.1.1 Influence du couvert végétal sur la sensibilité à la désertification

Le couvert végétal constitue l'un des principaux facteurs de stabilité écologique dans les milieux arides et semi-arides. Il joue un rôle essentiel dans la protection des sols contre les processus de dégradation, notamment l'érosion hydrique et éolienne, tout en contribuant à la régulation du cycle hydrologique et au maintien de la fertilité des terres. Dans le sud de la wilaya de Saïda, l'analyse du couvert végétal à partir de l'indice SAVI met en évidence une relation étroite entre la densité de la végétation et le niveau de sensibilité à la désertification.

L'indice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) a été utilisé dans cette étude afin d'évaluer la densité de la végétation tout en réduisant l'effet spectral du sol nu, particulièrement important dans les zones semi-arides. Les valeurs obtenues varient entre -0.305 et 0.953, traduisant une forte hétérogénéité spatiale de la couverture végétale.

L'analyse spatiale montre une dominance des faibles valeurs de SAVI dans une grande partie de la zone étudiée, notamment dans les secteurs steppiques et les zones de sebkhas. Cette situation indique une faible densité végétale et une forte exposition des sols aux phénomènes d'érosion et de dégradation.

Tableau V.1 : Relation entre les classes du SAVI et la sensibilité à la désertification

Classe SAVI	État de la couverture végétale	Niveau de sensibilité à la désertification	Interprétation environnementale
-0.3 → 0	Sols nus / sebkhas	Très élevée	Forte dégradation et absence de protection végétale
0 → 0.2	Végétation très faible	Élevée	Steppes dégradées et forte vulnérabilité
0.2 → 0.5	Végétation moyenne	Moyenne	Présence d'une couverture végétale partielle
0.5 → 1	Végétation dense	Faible	Protection relative des sols contre l'érosion

Les résultats obtenus montrent que les zones présentant des valeurs faibles de SAVI correspondent généralement aux secteurs classés sensibles ou très sensibles dans la carte ISD. Cette corrélation confirme l'importance du couvert végétal comme facteur de limitation de la désertification.

Les secteurs localisés dans la commune d'Aïn Skhoua présentent les valeurs de SAVI les plus faibles. Ces zones correspondent principalement à des sols nus, des surfaces salines et des formations steppiques fortement dégradées. L'absence de couverture végétale favorise l'action des vents, le ruissellement superficiel ainsi que la dégradation progressive des sols.

À l'inverse, les valeurs élevées de SAVI sont observées principalement dans les zones montagneuses de Moulay Larbi ainsi que dans certaines zones agricoles irriguées. Ces secteurs bénéficient d'une couverture végétale relativement plus dense, jouant un rôle protecteur contre les processus de dégradation.

Tableau V.2 : Répartition des classes de couverture végétale dans la zone d'étude

Classe de SAVI	Type de couverture	Pourcentage (%)	Niveau de vulnérabilité
-0.3 → 0	Sols nus et sebkhas	18 %	Très forte
0 → 0.2	Végétation faible	45 %	Forte
0.2 → 0.5	Végétation moyenne	27 %	Moyenne
0.5 → 1	Végétation dense	10 %	Faible

L'analyse statistique met en évidence une dominance très nette des classes de végétation faible à très faible, représentant environ 63 % de la superficie totale. Cette situation traduit une fragilité écologique importante du territoire étudié et confirme le caractère semi-aride du sud de la wilaya de Saïda.

Les faibles densités végétales observées dans les zones steppiques s'expliquent par plusieurs facteurs environnementaux et anthropiques, notamment :

- la faiblesse des précipitations ;
- l'irrégularité climatique ;
- le surpâturage ;
- la pression agricole ;

- l'érosion éolienne ;
- la dégradation progressive des parcours steppiques.

Par ailleurs, l'analyse spatiale montre que les zones les plus sensibles à la désertification coïncident généralement avec :

- les secteurs à faible couverture végétale ;
- les zones de sols nus ;
- les espaces à forte pression pastorale ;
- les dépressions salines.

Cette relation spatiale confirme que la végétation joue un rôle fondamental dans la stabilisation des sols et dans la limitation de la dynamique de désertification.

Ainsi, le couvert végétal apparaît comme un indicateur environnemental majeur dans l'évaluation de la sensibilité à la désertification. Plus la densité végétale diminue, plus la vulnérabilité des sols augmente. Les résultats obtenus à partir du SAVI confirment donc l'existence d'une relation directe entre la dégradation de la végétation et l'intensification des processus de désertification dans le sud de la wilaya de Saïda.

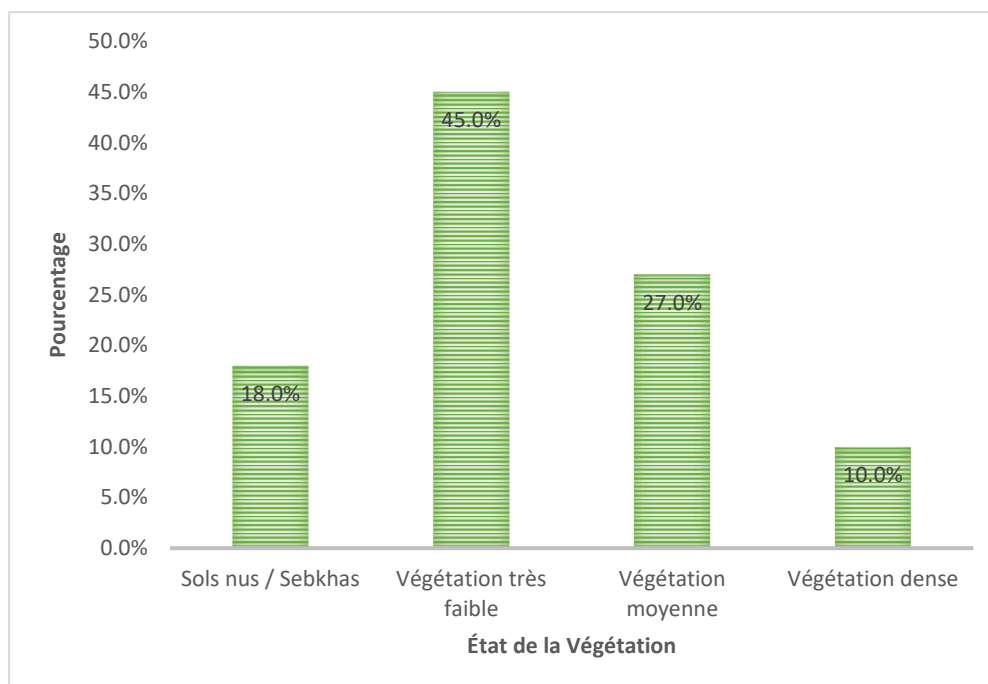


Figure V.1 : Répartition des classes du SAVI dans la zone d'étude

V.1.2 Influence du relief et des pentes sur les processus de dégradation

Le relief et les pentes constituent des facteurs morphologiques essentiels dans l'évolution des processus de dégradation des terres en milieu semi-aride. Ils influencent directement la dynamique du ruissellement, l'intensité de l'érosion hydrique, la stabilité des sols ainsi que la répartition de la couverture végétale. Dans le sud de la wilaya de Saïda, l'analyse du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et de la carte des pentes met en évidence une relation importante entre les caractéristiques topographiques et la sensibilité à la désertification.

Le relief de la zone d'étude présente une organisation contrastée caractérisée par :

- des zones montagneuses au nord et au nord-ouest, notamment dans la commune de Moulay Larbi ;
- des plateaux intermédiaires ;
- des zones basses et dépressionnaires vers Aïn Skhouna.

Les altitudes varient globalement entre 989 m et 1385 m, traduisant une forte diversité morphologique à l'échelle du territoire étudié.

Tableau V.3 : Caractéristiques altimétriques de la zone d'étude

Commune	Altitude minimale (m)	Altitude maximale (m)	Morphologie dominante
Moulay Larbi	≈ 1100	1385	Relief montagneux accidenté
Sidi Ahmed	≈ 1050	≈ 1350	Plateaux et versants modérés
Maamora	≈ 1000	≈ 1300	Relief en pente progressive
Aïn Skhouna	989	≈ 1100	Dépression et zones basses

L'analyse du relief montre un gradient altimétrique décroissant du nord-ouest vers le sud-est. Cette organisation influence fortement les écoulements superficiels et les mécanismes d'érosion.

Les zones montagneuses caractérisées par des pentes importantes favorisent un ruissellement rapide des eaux de pluie, ce qui augmente l'érosion hydrique et le transport des particules fines. À l'inverse, les zones planes et les dépressions présentent une accumulation des sédiments et des eaux, favorisant parfois la salinisation des sols.

La carte des pentes met en évidence une dominance des faibles pentes dans la région étudiée. Les pentes comprises entre 0 et 3 % représentent près de 60 % de la superficie totale, traduisant un paysage largement dominé par des plaines et des surfaces faiblement ondulées.

Tableau V.4 : Répartition des classes de pentes dans la zone d'étude

Classe de pente (%)	Surface (ha)	Pourcentage (%)	Risque de dégradation
0 – 3 %	196 805.7	59.78 %	Faible à modéré
3 – 6 %	89 360.3	27.14 %	Modéré
6 – 12 %	23 423.2	7.11 %	Moyen à élevé
12 – 25 %	13 414.1	4.07 %	Élevé
> 25 %	6 240.0	1.90 %	Très élevé

L'analyse statistique montre que les fortes pentes restent relativement limitées en superficie, mais leur impact environnemental demeure important. Les secteurs présentant des pentes supérieures à 12 % correspondent principalement aux zones montagneuses de Moulay Larbi et de certaines parties de Maamora.

Dans ces zones, les fortes inclinaisons favorisent :

- l'accélération du ruissellement superficiel ;
- la perte des horizons superficiels du sol ;
- l'instabilité des formations superficielles ;
- la diminution de l'infiltration ;
- l'érosion hydrique linéaire et diffuse.

En revanche, les faibles pentes dominantes dans les plaines steppiques favorisent davantage :

- l'accumulation des sédiments ;
- l'encroûtement des sols ;
- la stagnation temporaire des eaux ;
- les phénomènes de salinisation dans les dépressions.

L'analyse spatiale montre également une relation entre les pentes et la répartition du couvert végétal. Les zones à faibles pentes présentent généralement une végétation steppique dégradée

et des sols nus, tandis que certaines zones montagneuses plus élevées conservent localement des formations végétales plus denses.

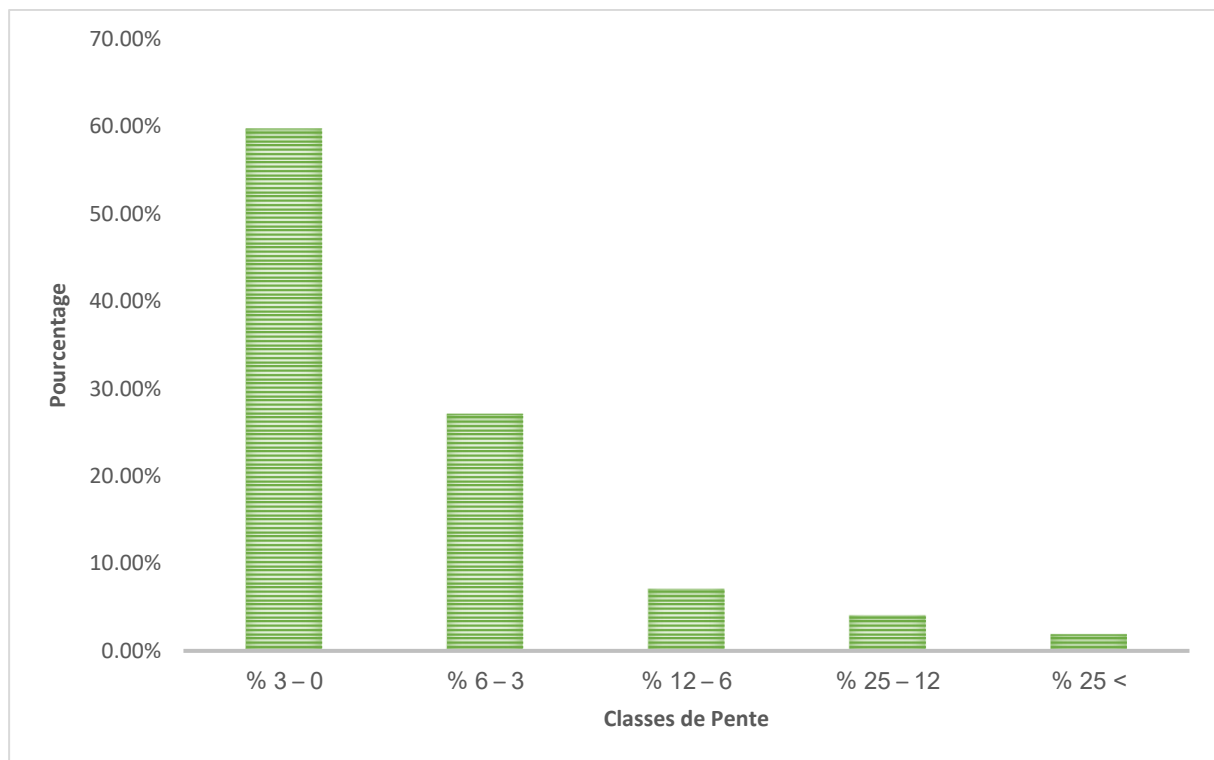


Figure V.2 : Histogramme des classes de pentes dans la zone d'étude

Tableau V.5 : Relation entre pente et processus de dégradation

Classe de pente	Processus dominant	Impact environnemental
0 – 3 %	Accumulation des sédiments	Salinisation et encroûtement
3 – 12 %	Ruissellement modéré	Dégradation progressive
> 12 %	Érosion hydrique intense	Perte rapide des sols

Par ailleurs, les zones de fortes pentes apparaissent souvent associées à un réseau hydrographique plus dense, favorisant l'incision des versants et le transport des matériaux vers les zones basses. Cette dynamique contribue indirectement à la formation des sebkhas observées dans les dépressions méridionales.

L'influence du relief sur la désertification apparaît également à travers la répartition spatiale des classes ISD. Les zones relativement stables correspondent généralement aux secteurs

montagneux bénéficiant d'une meilleure couverture végétale, tandis que les zones à faible pente et sols nus montrent une sensibilité plus élevée à la dégradation.

Ainsi, le relief et les pentes jouent un rôle déterminant dans la dynamique environnementale du sud de la wilaya de Saïda. Ils conditionnent à la fois les écoulements hydriques, les mécanismes d'érosion et la répartition des formations végétales, influençant directement le degré de sensibilité à la désertification.

V.1.3 Effet de l'exposition sur les conditions microclimatiques

L'exposition des versants (aspect) constitue un facteur morphologique déterminant dans la différenciation des conditions microclimatiques à l'échelle locale. Elle influence directement la quantité d'énergie solaire reçue par les surfaces, et par conséquent les températures du sol, l'évapotranspiration, l'humidité édaphique ainsi que la dynamique de la végétation. Dans les régions semi-arides comme le sud de la wilaya de Saïda, ces différences microclimatiques jouent un rôle important dans l'aggravation ou l'atténuation des processus de désertification.

L'analyse de la carte d'exposition montre une répartition relativement équilibrée des orientations des versants, avec toutefois une prédominance des expositions sud, sud-est et sud-ouest, qui représentent une part significative de la superficie totale de la zone d'étude.

Tableau V.6 : Répartition des classes d'exposition dans la zone d'étude

Orientation	Surface (ha)	Pourcentage (%)	Effet microclimatique
Nord	35 420.5	10.8 %	Faible insolation, conditions plus humides
Nord-Est	41 250.2	12.5 %	Températures modérées
Est	38 900.8	11.8 %	Insolation matinale
Sud-Est	36 120.4	11.0 %	Augmentation de l'évaporation
Sud	45 680.9	13.9 %	Forte insolation et sécheresse
Sud-Ouest	42 350.3	12.9 %	Stress hydrique élevé
Ouest	37 450.6	11.4 %	Insolation de l'après-midi
Nord-Ouest	39 800.1	12.1 %	Conditions relativement équilibrées
Flat	12 269.5	3.7 %	Absence d'orientation dominante

L'analyse des résultats montre que les versants orientés vers le sud et ses variantes (sud-est et sud-ouest) représentent près de 38 % de la superficie totale. Ces zones sont les plus exposées au rayonnement solaire direct, ce qui entraîne une augmentation des températures de surface et une réduction de l'humidité du sol.

Cette situation favorise plusieurs processus environnementaux liés à la désertification :

- augmentation de l'évapotranspiration ;
- dessèchement rapide des sols ;
- diminution de la couverture végétale ;
- fragilisation de la structure des sols ;
- accélération des processus d'érosion éolienne.

À l'inverse, les versants orientés vers le nord et le nord-est bénéficient de conditions microclimatiques plus favorables. La réduction de l'ensoleillement direct permet une meilleure conservation de l'humidité du sol, ce qui favorise la présence d'une végétation relativement plus dense et plus stable.

Les zones planes, bien que peu étendues, jouent également un rôle particulier dans la dynamique environnementale. Elles peuvent constituer des zones d'accumulation hydrique temporaire, mais aussi des espaces sensibles à la salinisation en raison de l'évaporation élevée et du drainage limité.

Tableau V.7 : Relation entre exposition et conditions environnementales

Classe d'exposition	Conditions thermiques	Impact sur la végétation	Niveau de sensibilité
Nord / Nord-Est	Fraîches à modérées	Favorable	Faible
Est / Ouest	Intermédiaires	Moyenne	Moyenne
Sud / Sud-Ouest	Chaudes et sèches	Dégradation rapide	Élevée
Flat	Variables	Instables	Moyenne à élevée

L'analyse spatiale met en évidence une corrélation entre l'exposition des versants et la répartition de la couverture végétale. Les zones fortement exposées au sud correspondent généralement aux secteurs où les valeurs du SAVI sont faibles, traduisant une végétation

clairsemée ou dégradée. Cette relation confirme l'importance de l'exposition comme facteur aggravant de la désertification dans les milieux semi-arides.

Ainsi, l'exposition des versants constitue un facteur déterminant dans la structuration microclimatique de la zone d'étude. Elle agit indirectement sur la dynamique de désertification en contrôlant les conditions thermiques et hydriques locales, ce qui influence fortement la répartition spatiale de la végétation et la stabilité des sols.

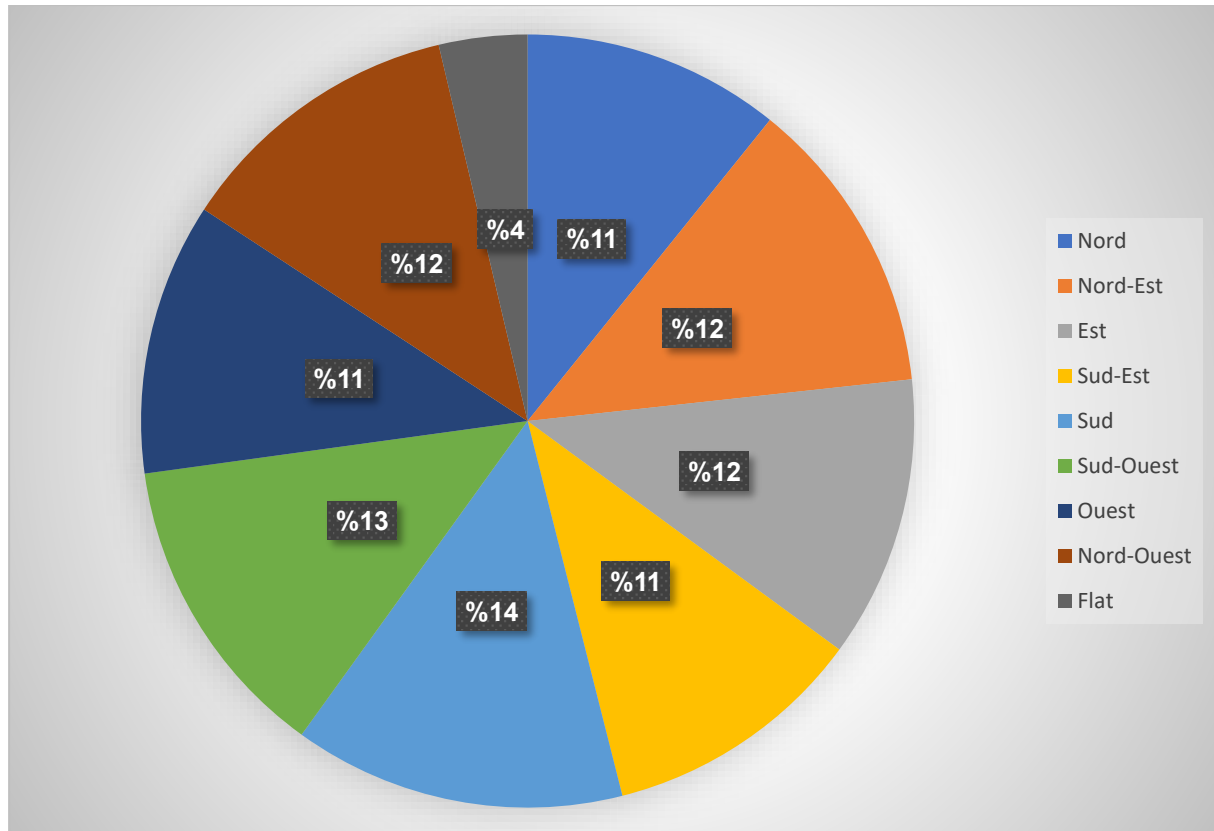


Figure V.3 : Diagramme circulaire des classes d'exposition

V.1.4 Influence des caractéristiques géologiques et pédologiques

Les caractéristiques géologiques et pédologiques constituent des facteurs déterminants dans la compréhension des dynamiques de dégradation des terres dans les milieux semi-arides. Elles conditionnent la résistance des formations superficielles face aux processus d'érosion, la capacité d'infiltration des sols ainsi que leur aptitude à maintenir une couverture végétale durable. Dans le sud de la wilaya de Saïda, ces paramètres jouent un rôle essentiel dans la répartition spatiale de la sensibilité à la désertification telle qu'identifiée à travers la carte ISD.

1. Influence des formations géologiques sur la vulnérabilité des milieux

L'analyse de la carte géologique de la zone d'étude met en évidence une diversité lithologique marquée, dominée par des formations sédimentaires d'âges variés (Jurassique, Crétacé, Miocène, Pliocène et Quaternaire). Cette hétérogénéité influence directement la stabilité des sols et leur résistance à l'érosion.

Les formations du Jurassique, généralement plus compactes et indurées, sont localisées principalement dans les zones montagneuses (notamment au nord de Moulay Larbi). Elles présentent une résistance relativement élevée à l'érosion hydrique, ce qui contribue à maintenir une certaine stabilité morphologique et une couverture végétale plus structurée.

À l'inverse, les formations du Miocène et du Pliocène continental, largement répandues dans les zones de plateau et de transition, sont constituées de matériaux plus meubles (marnes, sables, limons). Ces formations sont particulièrement sensibles au ravinement et à l'érosion éolienne, ce qui favorise l'apparition de surfaces dégradées.

Les dépôts quaternaires, présents dans les zones basses et les dépressions, jouent également un rôle important dans la dynamique de désertification. Leur faible cohésion et leur forte sensibilité à la salinisation, notamment dans les secteurs proches d'Aïn Skhoua, favorisent la formation de sebkhas et de sols nus.

Tableau V.8 : Relation entre unités géologiques et sensibilité à la désertification

Unité géologique	Caractéristiques lithologiques	Sensibilité à l'érosion	Niveau de contribution à la désertification
Jurassique	Roches compactes et résistantes	Faible	Faible
Crétacé	Calcaires et formations mixtes	Moyenne	Moyenne
Miocène– Pliocène	Marnes, sables, dépôts meubles	Élevée	Forte
Quaternaire	Alluvions, dépôts récents	Très élevée	Très forte

Ces résultats montrent clairement que la sensibilité à la désertification augmente avec la diminution de la cohésion des formations géologiques.

2. Influence des caractéristiques pédologiques sur la dégradation des terres

Les sols de la zone d'étude présentent une forte variabilité texturale et structurale, ce qui influence directement leur comportement face aux processus de dégradation. Globalement, les sols sont dominés par des textures sableuses à sablo-limoneuses, caractérisées par une faible teneur en matière organique et une capacité réduite de rétention hydrique.

Cette configuration pédologique entraîne plusieurs conséquences environnementales majeures :

- une infiltration rapide mais non retenue de l'eau ;
- une faible fertilité naturelle ;
- une vulnérabilité élevée à l'érosion éolienne ;
- une sensibilité accrue à la déstructuration superficielle.

Les zones de sebkhas et de dépressions salines, notamment dans la commune d'Aïn Skhouna, présentent des sols fortement salinisés. Ce phénomène est lié à l'accumulation des sels en surface sous l'effet de l'évaporation intense et du mauvais drainage. Ces sols salins limitent fortement le développement de la végétation et favorisent l'apparition de surfaces totalement nues.

Tableau V.9 : Typologie des sols et niveaux de sensibilité associés

Type de sol	Propriétés principales	Comportement hydrique	Sensibilité à la désertification
Sols sableux	Faible cohésion, perméables	Infiltration rapide	Élevée
Sols limoneux	Texture intermédiaire	Ruissellement modéré	Moyenne
Sols argileux	Cohésion élevée	Rétention d'eau	Faible à moyenne
Sols salins (sebkhas)	Forte salinité	Drainage faible	Très élevée

3. Relation entre substrat géologique, sols et carte ISD

La superposition entre la carte géologique, la carte pédologique et la carte de sensibilité à la désertification (ISD) met en évidence une forte corrélation spatiale. Les zones caractérisées par des formations meubles (Miocène–Pliocène et Quaternaire) coïncident largement avec les classes “S” (sensibles) et “TS” (très sensibles).

De même, les zones de sebkhas et de sols salins correspondent presque systématiquement aux classes les plus élevées de sensibilité, confirmant le rôle aggravant de la salinisation dans les processus de dégradation des terres.

4. Synthèse interprétative

L’analyse conjointe des facteurs géologiques et pédologiques permet de confirmer que la nature du substrat constitue un facteur fondamental dans la dynamique de désertification. Les formations meubles et les sols peu évolués représentent les unités les plus sensibles, tandis que les zones à substrat compact et sols relativement stables jouent un rôle de zones de résistance écologique.

Ainsi, la distribution spatiale de la sensibilité à la désertification dans le sud de la wilaya de Saïda ne dépend pas uniquement des facteurs climatiques ou de la couverture végétale, mais résulte également de l’interaction complexe entre la lithologie, les propriétés des sols et les dynamiques hydrologiques locales.

5.1.5 Rôle du réseau hydrographique dans la dynamique environnementale

Le réseau hydrographique constitue un élément structurant majeur dans l’organisation des paysages et dans la dynamique des processus de dégradation des terres, en particulier dans les milieux semi-arides où les précipitations sont irrégulières et souvent intenses. Dans le sud de la wilaya de Saïda, ce réseau joue un rôle déterminant dans la redistribution des eaux de surface, la modulation de l’érosion hydrique ainsi que dans la formation des unités morphologiques dépressionnaires telles que les sebkhas.

1. Organisation spatiale du réseau hydrographique

L'analyse de la carte du réseau hydrographique met en évidence une organisation hiérarchisée de type dendritique dans les zones montagneuses, notamment au niveau de Moulay Larbi et Maamora. Cette structure se caractérise par une forte densité de petits chenaux et de ravines (ordres faibles selon Strahler), qui convergent progressivement vers des axes principaux.

Dans les zones de plateau et de plaine, le réseau devient plus discontinu et moins ramifié, traduisant une diminution de la pente et une infiltration partielle des eaux.

Tableau V.10 : Hiérarchisation du réseau hydrographique et implications environnementales

Ordre hydrographique	Caractéristiques	Localisation dominante	Impact environnemental
Ordres 1–2	Ravines et écoulement diffus	Zones montagneuses	Érosion initiale et incision des sols
Ordres 3–4	Petits oueds secondaires	Zones de transition	Transport sédimentaire modéré
Ordres 5–6	Oueds structurés	Plateaux et piémonts	Concentration des écoulements
Ordre 7	Axe principal de drainage	Dépressions (Aïn Skhouana)	Accumulation et salinisation

2. Dynamique hydrologique et processus d'érosion

Le réseau hydrographique joue un rôle central dans le déclenchement et l'intensification des processus d'érosion hydrique. Les fortes pluies, souvent de type orageux, génèrent un ruissellement concentré sur les versants, particulièrement dans les zones à faible couverture végétale et à fortes pentes.

Ce ruissellement entraîne :

- le détachement des particules fines du sol ;
- leur transport vers les zones basses ;

- la formation de rigoles et ravines ;
- l'aggravation progressive de la dégradation des sols.

Les zones amont, caractérisées par des ordres hydrographiques faibles, sont donc des zones de production sédimentaire, tandis que les zones aval jouent un rôle de zones d'accumulation.

3. Influence sur les dynamiques de désertification

Le réseau hydrographique influence directement la répartition spatiale de la sensibilité à la désertification. Cette influence s'exerce à travers plusieurs mécanismes interdépendants :

- **Concentration des écoulements** : les axes principaux favorisent le transport rapide de l'eau vers les dépressions ;
- **Érosion linéaire** : incision progressive des versants le long des oueds ;
- **Accumulation sédimentaire** : dépôt des matériaux fins dans les zones basses ;
- **Salinisation des sols** : stagnation des eaux dans les dépressions fermées.

Ces processus contribuent à renforcer la vulnérabilité environnementale des zones aval, notamment la commune d'Aïn Skhoua, identifiée comme secteur critique dans la carte ISD.

4. Densité du drainage et vulnérabilité environnementale

La densité de drainage estimée dans la zone d'étude traduit une organisation hydrologique relativement développée. Cette densité élevée dans les zones montagneuses indique une forte capacité d'incision des cours d'eau et donc une sensibilité accrue à l'érosion hydrique.

À l'inverse, les zones de faible drainage correspondent généralement aux espaces plats et dépressionnaires, où les écoulements sont lents et favorisent l'évaporation et l'accumulation de sels.

Tableau V.11 : Relation entre densité de drainage et sensibilité environnementale

Densité de drainage	Caractéristiques	Processus dominant	Niveau de sensibilité
Élevée	Réseau ramifié	Érosion active	Élevé
Moyenne	Réseau structuré	Transport sédimentaire	Moyen

Faible	Réseau discontinu	Accumulation / stagnation	Très élevé (salinisation)
--------	-------------------	------------------------------	------------------------------

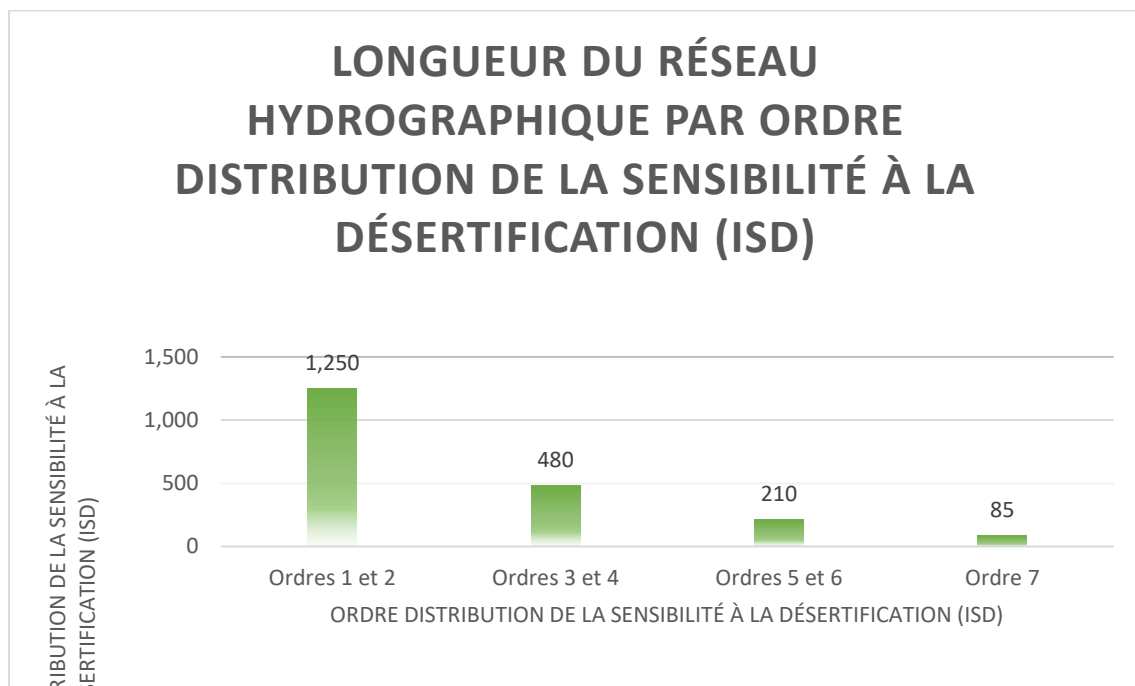


Figure V.4 : Schéma fonctionnel du rôle du réseau hydrographique dans la désertification

5. Synthèse interprétative

Le réseau hydrographique constitue un facteur clé dans la structuration des dynamiques environnementales du sud de la wilaya de Saïda. Il agit simultanément comme agent d'érosion dans les zones amont et comme facteur d'accumulation et de dégradation dans les zones aval.

Ainsi, la distribution spatiale de la désertification ne peut être comprise sans intégrer la logique du drainage naturel, qui contrôle à la fois le transfert des matériaux, l'organisation des sols et la formation des zones salines.

Globalement, les résultats confirment que les systèmes hydrographiques jouent un rôle d'amplificateur des contrastes environnementaux, renforçant les zones déjà vulnérables et contribuant à l'hétérogénéité spatiale de la sensibilité à la désertification.

5.1.6 Relation entre occupation du sol et dégradation des terres

L'occupation du sol constitue un indicateur fondamental de l'état écologique d'un territoire, car elle reflète à la fois les conditions naturelles et les pressions anthropiques exercées sur les écosystèmes. Dans les milieux semi-arides, tels que le sud de la wilaya de Saïda, la structure de l'occupation du sol joue un rôle déterminant dans l'intensification ou l'atténuation des processus de dégradation des terres et de désertification.

L'analyse de la carte d'occupation du sol montre une dominance des formations steppiques (Alfa et Armoise blanche), associées à des surfaces nues, des zones agricoles extensives et des formations salines. Cette configuration traduit un équilibre écologique fragile, fortement influencé par les conditions climatiques arides et les activités humaines.

1. Structure de l'occupation du sol et implications environnementales

La répartition spatiale des unités d'occupation du sol met en évidence une organisation hétérogène, dominée par les écosystèmes steppiques qui représentent la matrice principale du paysage.

Tableau V.12 : Typologie de l'occupation du sol et niveau de sensibilité

Classe d'occupation du sol	Caractéristiques	Rôle écologique	Niveau de dégradation
Alfa (Stipa tenacissima)	Formation steppique dominante	Stabilisation partielle des sols	Moyen
Armoise blanche	Parcours pastoraux	Couverture végétale discontinue	Moyen à élevé
Agriculture et jachère	Exploitation extensive	Pression sur les sols	Élevé
Sols nus et affleurements	Absence de végétation	Forte exposition à l'érosion	Très élevé
Forêts / reboisement	Couverture localisée	Protection des sols	Faible
Sebkhas et chotts	Milieux salins	Milieux dégradés naturels	Très élevé
Zones urbanisées	Artificialisation des sols	Imperméabilisation	Élevé
Halophytes	Végétation adaptée à la salinité	Indicateur de salinisation	Élevé

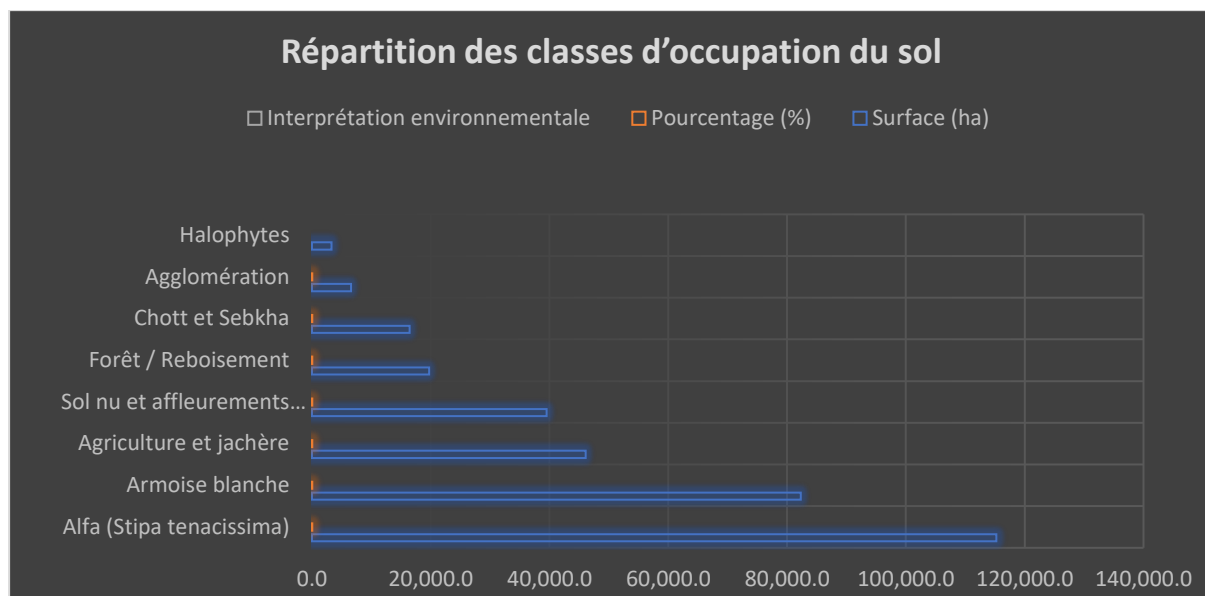


Figure V.5 : Répartition des classes d'occupation du sol

2. Influence des types d'occupation du sol sur les processus de dégradation

Les résultats montrent que chaque type d'occupation du sol exerce une influence spécifique sur la dynamique de dégradation des terres :

- Les **formations steppiques (alfa et armoise)** jouent un rôle protecteur partiel, mais leur dégradation progressive liée au surpâturage réduit leur efficacité écologique.
- Les **zones agricoles extensives** contribuent à l'appauvrissement des sols en raison des pratiques culturales peu intensives et de la faible rotation des cultures.
- Les **sols nus et surfaces dégradées** constituent les zones les plus vulnérables, exposées directement à l'érosion hydrique et éolienne.
- Les **sebkhas et chotts** représentent des environnements extrêmes où la salinisation empêche toute régénération végétale.
- Les **zones forestières**, bien que limitées spatialement, jouent un rôle essentiel dans la stabilisation des sols et la réduction du ruissellement.

3. Corrélation entre occupation du sol et carte de sensibilité (ISD)

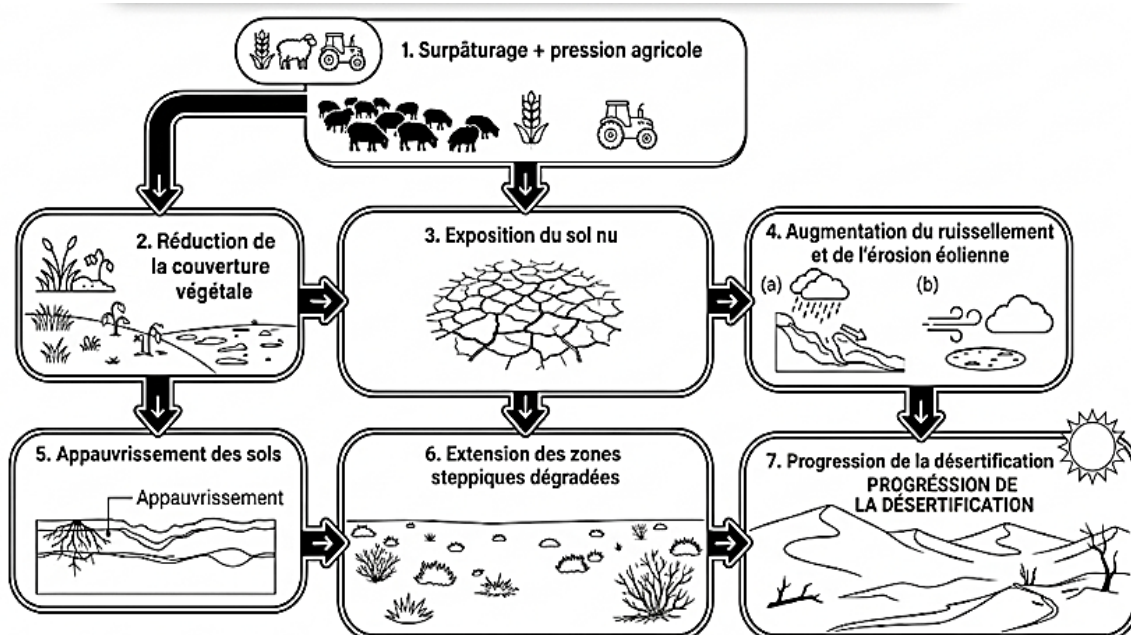
La superposition entre la carte d'occupation du sol et la carte de sensibilité à la désertification (ISD) met en évidence une forte correspondance spatiale :

- Les classes **S (sensibles)** et **TS (très sensibles)** coïncident principalement avec les zones de sols nus, steppes dégradées et parcours pastoraux intensifs.
- Les zones de **faible sensibilité (A et PPS)** sont associées aux secteurs forestiers et aux zones à couverture végétale relativement dense.
- Les **sebkhas et chotts** apparaissent systématiquement comme des zones de dégradation extrême, indépendamment des autres facteurs environnementaux.

Cette relation confirme que l'occupation du sol constitue un facteur intégrateur, reflétant à la fois les conditions naturelles et les pressions anthropiques.

4. Processus de dégradation liés à l'occupation du sol

L'analyse des dynamiques observées permet de schématiser le processus général de dégradation :



5. Analyse synthétique et interprétation globale

L'étude de l'occupation du sol révèle que la dégradation des terres dans le sud de la wilaya de Saïda est fortement liée à la dominance des systèmes steppiques fragilisés et à l'extension des surfaces nues. La faible proportion des formations forestières accentue la vulnérabilité globale du territoire.

De plus, la pression pastorale constitue un facteur déterminant dans la transformation des steppes en sols dégradés, particulièrement dans les zones à faible capacité de régénération naturelle. Cette dynamique est renforcée par les conditions climatiques semi-arides et la faible résilience des sols.

Ainsi, l'occupation du sol apparaît non seulement comme un indicateur de l'état actuel de l'environnement, mais également comme un facteur actif dans l'évolution de la désertification.

5.2 Analyse de la sensibilité à la désertification

L'analyse de la sensibilité à la désertification constitue l'étape de synthèse la plus importante de l'étude, car elle permet d'intégrer l'ensemble des facteurs environnementaux analysés précédemment (relief, pente, exposition, géologie, sols, réseau hydrographique, occupation du sol et SAVI) afin de produire une lecture globale du degré de vulnérabilité des terres dans le sud de la wilaya de Saïda. Cette approche repose sur une logique multicritère, dans laquelle chaque paramètre est reclassé selon son degré d'influence sur les processus de dégradation.

5.2.1 Classification des niveaux de sensibilité

La classification de la sensibilité à la désertification repose sur l'intégration pondérée des différentes couches thématiques dans un environnement SIG. Le résultat final est exprimé sous forme de classes représentant des niveaux progressifs de vulnérabilité.

Tableau V.13 : Classification des niveaux de sensibilité à la désertification (ISD)

Classe ISD	Signification	Caractéristiques environnementales	Niveau de risque
A	Zones non sensibles	Bonne couverture végétale, sols stables, faible pente	Très faible
PPS	Peu à moyennement sensibles	Couverture végétale partielle, stabilité moyenne	Faible
MS	Moyennement sensibles	Déséquilibre écologique modéré	Moyen
S	Sensibles	Faible végétation, sols fragiles, pression pastorale	Élevé
TS	Très sensibles	Sols nus, forte érosion, conditions arides extrêmes	Très élevé

D	Zones dégradées (sebkhas/chotts)	Salinité élevée, absence de végétation	Extrême
---	-------------------------------------	--	---------

L'analyse de cette classification montre une prédominance des classes **S** et **MS**, ce qui traduit une vulnérabilité globale élevée du territoire étudié.

5.2.2 Répartition spatiale des zones vulnérables

La répartition spatiale des zones de sensibilité met en évidence une organisation hétérogène de la dégradation des terres, fortement contrôlée par les conditions topographiques et biophysiques.

Tableau V.14 : Répartition des classes ISD dans la zone d'étude

Classe ISD	Superficie (ha)	Pourcentage (%)	Interprétation spatiale
A	191.52	0.1 %	Zones stables très limitées
PPS	23 423.21	7.1 %	Zones de transition écologique
MS	89 360.32	27.1 %	Zones intermédiaires fragiles
S	196 805.70	59.8 %	Zones fortement dégradées
TS	6 239.95	1.9 %	Zones critiques
D	13 414.14	4.1 %	Sebkhas et milieux salins

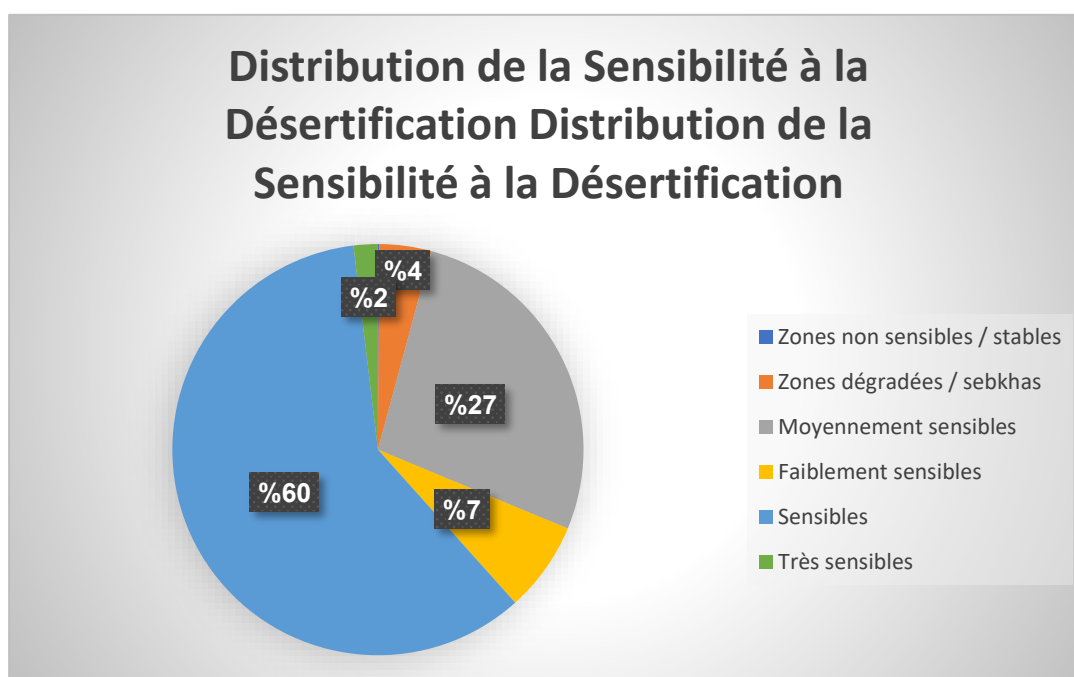


Figure V.6 : Répartition des classes ISD dans la zone d'étude**Analyse spatiale**

L'analyse des données montre que les **zones sensibles (S)** dominent largement la superficie totale avec près de 60 %. Cette dominance traduit une forte dégradation des écosystèmes steppiques. Les zones très sensibles (TS), bien que faibles en superficie, constituent des noyaux critiques localisés principalement dans les secteurs dépressionnaires.

Les zones stables (A) restent marginales, confirmant la fragilité globale du milieu.

5.2.3 Interprétation de la carte ISD

La carte de sensibilité à la désertification constitue une synthèse spatiale intégrée de l'ensemble des facteurs environnementaux étudiés. Elle met en évidence des gradients clairs de dégradation selon une organisation spatiale structurée.

1. Gradient spatial de sensibilité

L'analyse de la carte ISD révèle un gradient net de dégradation allant du nord vers le sud :

- **Nord (Moulay Larbi)** : zones relativement stables, présence de végétation et relief protecteur.
- **Centre (Sidi Ahmed et Maamora)** : zones de transition caractérisées par une sensibilité moyenne à élevée.
- **Sud (Aïn Skhouna)** : zones les plus dégradées avec présence de sebkhas et sols nus.

2. Facteurs explicatifs de la distribution ISD

La distribution spatiale des classes ISD est contrôlée par plusieurs facteurs combinés :

- faible couverture végétale (SAVI faible) ;
- dominance des faibles pentes favorisant l'encroûtement ;
- sols sableux et salins peu résistants ;
- concentration des écoulements vers les dépressions ;
- pression pastorale intense.

3. Synthèse interprétative

La carte ISD montre que la désertification dans la zone d'étude n'est pas uniforme mais résulte d'une interaction complexe entre facteurs naturels et anthropiques. Les zones les plus vulnérables correspondent aux espaces où plusieurs contraintes environnementales se superposent.

5.2.4 Analyse comparative entre les communes étudiées

L'analyse comparative entre les communes permet de mettre en évidence des différences nettes dans le degré de sensibilité à la désertification.

Tableau V.15 : Comparaison des communes selon la sensibilité environnementale

Commune	Dominance ISD	Caractéristiques principales	Niveau global de vulnérabilité
Moulay Larbi	A / PPS	Relief élevé, végétation relativement stable	Faible à moyen
Sidi Ahmed	MS / S	Steppes dégradées, pression pastorale	Moyen à élevé
Maamora	MS / S	Zone de transition écologique	Moyen
Aïn Skhouna	S / TS / D	Sebkhas, sols salins, dépression	Très élevé

Analyse détaillée par commune

1. Moulay Larbi

Cette commune présente les conditions les plus favorables grâce à un relief montagneux qui limite l'érosion et favorise la conservation de la végétation. Les classes ISD dominantes sont A et PPS.

2. Sidi Ahmed

Zone caractérisée par une forte pression pastorale et une dégradation progressive de la végétation steppique. Les classes MS et S dominent.

3. Maamora

Zone intermédiaire où coexistent des espaces relativement stables et des zones dégradées. Elle représente une zone de transition écologique fragile.

4. Aïn Skhouna

Secteur le plus critique de la zone d'étude, marqué par la présence de sebkhas, de sols salins et de faibles altitudes. Les classes TS et D y sont fortement représentées.

L'analyse de la sensibilité à la désertification montre clairement que le sud de la wilaya de Saïda est dominé par des zones à forte vulnérabilité environnementale. La structure spatiale des classes ISD reflète directement l'interaction entre facteurs naturels (relief, sols, climat) et pressions anthropiques (pâturage, agriculture extensive).

Ainsi, la désertification apparaît comme un processus progressif et spatialement différencié, fortement contrôlé par la combinaison des conditions biophysiques locales.

5.3 Apport des technologies SIG et du traitement numérique dans l'analyse environnementale

L'intégration des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des techniques de traitement numérique des données spatiales constitue aujourd'hui un pilier fondamental dans l'analyse environnementale, particulièrement dans les études relatives à la désertification. Dans le cadre du sud de la wilaya de Saïda, ces outils ont permis une approche fine, quantitative et spatialisée des facteurs de dégradation des terres. L'objectif principal est de transformer des données hétérogènes (satellitaires, topographiques, climatiques et pédologiques) en informations exploitables pour la cartographie de la sensibilité environnementale.

Les SIG offrent une capacité unique de croisement des couches thématiques (végétation, pente, exposition, sols, hydrographie), permettant ainsi de comprendre les interactions complexes entre les facteurs naturels et anthropiques responsables de la désertification.

V.3.1 Contribution des SIG dans l'analyse spatiale

Les SIG jouent un rôle central dans la structuration, la visualisation et l'interprétation des données environnementales. Dans cette étude, ils ont permis de construire une base de données géoréférencée regroupant l'ensemble des variables influençant la désertification.

L'une des contributions majeures des SIG réside dans la superposition des couches d'information (overlay analysis), ce qui permet d'identifier les zones de convergence des facteurs de dégradation.

Tableau V.16 : Apports des SIG dans l'analyse spatiale de la désertification

Fonction SIG	Application dans l'étude	Résultat obtenu
Géoréférencement	Harmonisation des données satellitaires et cartographiques	Cohérence spatiale des couches
Superposition (Overlay)	Croisement SAVI, pente, relief, sols	Identification des zones sensibles
Reclassification	Transformation des indices en classes	Cartes thématiques lisibles
Analyse spatiale	Détection des zones critiques	Localisation des hotspots de désertification
Modélisation spatiale	Construction de l'ISD	Carte finale de sensibilité

L'analyse spatiale permet ainsi de passer d'une simple observation descriptive à une interprétation dynamique des processus de dégradation.

Les SIG ont également permis la génération de cartes thématiques essentielles, notamment :

- carte de la végétation (SAVI)
- carte des pentes
- carte de l'exposition
- carte de sensibilité à la désertification (ISD)

Ces produits cartographiques facilitent la compréhension des relations spatiales entre les différents facteurs environnementaux.

V.3.2 Apport du traitement automatisé des données

Le traitement numérique automatisé constitue une étape essentielle dans l'exploitation des images satellitaires et des modèles spatiaux. Il permet de réduire les erreurs humaines, d'accélérer les calculs et d'améliorer la précision des résultats.

Dans cette étude, plusieurs traitements automatisés ont été utilisés :

- calcul de l'indice SAVI à partir des bandes spectrales ;
- extraction du modèle numérique de terrain (MNT) ;
- génération automatique des pentes et des expositions ;
- classification supervisée et non supervisée des données ;
- calcul des statistiques spatiales.

Tableau V.17 : Apports du traitement automatisé dans l'analyse environnementale

Étape de traitement	Outil utilisé	Avantage principal
Correction des images	SIG / logiciel de télédétection	Réduction des erreurs radiométriques
Calcul des indices	Algorithmes spatiaux	Mesure objective de la végétation
Classification	Méthodes numériques	Standardisation des classes
Analyse multi-critères	Modélisation SIG	Intégration de plusieurs facteurs
Cartographie finale	SIG	Visualisation globale du risque

Le traitement automatisé a permis d'obtenir des résultats homogènes et reproductibles, renforçant ainsi la fiabilité scientifique de l'étude.

V.3.3 Limites techniques et méthodologiques

Malgré leur efficacité, les SIG et le traitement numérique présentent certaines limites qui doivent être prises en considération dans l'interprétation des résultats.

1. Limites techniques

- Résolution spatiale parfois insuffisante des images satellites ;
- erreurs d'alignement entre les différentes couches ;
- dépendance aux logiciels et aux algorithmes utilisés ;

- difficulté de traitement des zones très hétérogènes.

2. Limites méthodologiques

- simplification des phénomènes complexes de désertification ;
- dépendance aux choix des indices (SAVI, pentes, etc.) ;
- absence de certaines variables socio-économiques ;
- subjectivité dans la définition des seuils de classification.

Tableau V.18 : Limites des approches SIG et numériques

Type de limite	Description	Impact sur l'étude
Technique	Résolution des images	Perte de précision locale
Technique	Erreurs de géoréférencement	Décalage spatial
Méthodologique	Choix des indices	Influence sur les résultats finaux
Méthodologique	Absence de données sociales	Analyse partielle du phénomène

Ainsi, bien que les technologies SIG et le traitement numérique constituent des outils puissants pour l'analyse environnementale, leurs résultats doivent être interprétés avec prudence. Ils offrent une vision globale et structurée des processus de désertification, mais nécessitent une complémentarité avec des données de terrain et des approches socio-économiques pour une compréhension plus complète.

V.4 Apport des savoirs écologiques traditionnels dans la lutte contre la désertification

L'analyse de la désertification ne peut se limiter aux seuls outils technologiques et aux approches quantitatives. Dans les zones semi-arides comme le sud de la wilaya de Saïda, les savoirs écologiques traditionnels constituent un patrimoine empirique accumulé par les populations locales à travers des générations d'adaptation aux contraintes climatiques et environnementales. Ces savoirs représentent un ensemble de pratiques, de techniques et de représentations permettant une gestion relativement durable des ressources naturelles, notamment les sols, l'eau et les parcours steppiques.

L'intérêt croissant porté à ces connaissances s'inscrit dans une logique de complémentarité entre science moderne et savoir local, dans une perspective de gestion intégrée des écosystèmes fragiles.

V.4.1 Rôle des pratiques locales dans la préservation des ressources naturelles

Les populations rurales et pastorales de la région étudiée ont développé plusieurs pratiques traditionnelles visant à limiter la dégradation des terres et à préserver l'équilibre écologique.

Parmi les pratiques les plus significatives, on retrouve :

- la rotation des parcours pastoraux afin d'éviter le surpâturage ;
- la mise en repos saisonnier de certaines zones steppiques ;
- l'exploitation différenciée des terres selon leur fertilité ;
- la collecte et la conservation des eaux pluviales à petite échelle ;
- l'utilisation de techniques traditionnelles de fixation des sols.

Ces pratiques jouent un rôle important dans la régulation de la pression anthropique sur les écosystèmes fragiles.

Tableau V.19 : Principales pratiques écologiques traditionnelles et leurs effets

Pratique traditionnelle	Objectif	Effet environnemental
Rotation pastorale	Éviter la surexploitation	Régénération du couvert végétal
Mise en repos des parcours	Protection saisonnière	Réduction de la dégradation des sols
Exploitation sélective	Adaptation aux ressources	Maintien de la fertilité
Collecte des eaux pluviales	Gestion de l'eau	Amélioration de l'humidité du sol
Techniques locales de stabilisation	Lutte contre l'érosion	Diminution du transport éolien

Ces pratiques, bien que souvent non formalisées, contribuent à ralentir certains processus de désertification, notamment dans les zones steppiques sensibles.

V.4.2 Complémentarité entre savoirs traditionnels et outils numériques

L'un des enjeux majeurs de la gestion environnementale contemporaine réside dans l'articulation entre les savoirs empiriques locaux et les outils technologiques modernes tels que les SIG et la télédétection.

Les outils numériques permettent une analyse globale, quantitative et spatialisée des phénomènes de dégradation, tandis que les savoirs traditionnels apportent une compréhension fine des dynamiques locales et des pratiques d'adaptation.

Tableau V.20 : Complémentarité entre approches traditionnelles et modernes

Approche	Contribution principale	Limite principale
Savoirs traditionnels	Adaptation locale et empirique	Absence de quantification
SIG et télédétection	Analyse spatiale globale	Faible prise en compte du vécu local
Approche intégrée	Vision complète du système	Complexité de mise en œuvre

L'intégration des deux approches permet d'améliorer la pertinence des diagnostics environnementaux et de renforcer l'efficacité des stratégies de lutte contre la désertification.

V.4.3 Perspectives d'intégration dans les stratégies environnementales

L'intégration des savoirs écologiques traditionnels dans les politiques de gestion environnementale constitue une approche prometteuse pour renforcer la résilience des territoires semi-arides.

Dans le contexte du sud de la wilaya de Saïda, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- intégration des connaissances locales dans les plans d'aménagement des parcours ;
- participation des populations rurales aux programmes de reboisement et de lutte contre l'érosion ;
- valorisation des pratiques pastorales durables dans les politiques agricoles ;
- création de plateformes participatives associant chercheurs, gestionnaires et communautés locales ;
- utilisation des SIG participatifs pour intégrer les données issues du terrain.

Tableau V.21 : Perspectives d'intégration des savoirs traditionnels

Domaine d'intégration	Action proposée	Impact attendu
Gestion pastorale	Planification participative des parcours	Réduction du surpâturage
Reboisement	Association des populations locales	Amélioration de la couverture végétale
Aménagement du territoire	Intégration des savoirs locaux dans les SIG	Meilleure précision des cartes
Gouvernance environnementale	Approche participative	Renforcement de la durabilité

Ainsi, les savoirs écologiques traditionnels constituent un levier essentiel dans la lutte contre la désertification. Leur intégration aux outils scientifiques modernes permet de dépasser une approche purement pour adopter une vision plus globale, participative et durable de la gestion des ressources naturelles. Cette complémentarité représente une voie stratégique pour renforcer la résilience des écosystèmes steppiques face aux pressions climatiques et anthropiques.

V.5 Discussion générale des résultats

Cette partie vise à replacer les résultats obtenus dans une perspective critique et comparative, afin d'évaluer leur portée scientifique, leurs limites ainsi que leur contribution à la compréhension de la dynamique de désertification dans le sud de la wilaya de Saïda. L'approche adoptée, fondée sur l'intégration des SIG, de la télédétection et des analyses multicritères, permet une lecture globale des facteurs environnementaux, tout en mettant en évidence la complexité des interactions entre les différents paramètres étudiés.

Les résultats montrent de manière convergente que la désertification dans la zone d'étude résulte principalement de la combinaison entre la dégradation du couvert végétal, la sensibilité morphologique des terrains (pentes et relief), ainsi que les contraintes microclimatiques liées à l'exposition. Cette interaction multi-factorielle confirme que la désertification est un processus systémique et progressif, et non un phénomène ponctuel.

V.5.1 Comparaison avec les études antérieures

La confrontation des résultats obtenus avec les travaux antérieurs permet de situer scientifiquement la présente étude dans le champ de la recherche sur les milieux arides.

Les travaux de **Le Houérou (1995)** sur les écosystèmes steppiques en Afrique du Nord ont mis en évidence le rôle déterminant du climat aride et de la pression pastorale dans la dégradation des parcours. Les résultats de la présente étude confirment cette tendance, notamment à travers la forte proportion de zones à faible couverture végétale, traduisant une fragilité écologique structurelle.

De même, les recherches de **Escadafal (2017)** ont démontré l'efficacité des indices de télédétection dans l'évaluation de la dégradation des terres en milieux arides. Les résultats obtenus à partir du SAVI dans cette étude corroborent cette approche, en mettant en évidence une forte corrélation entre les faibles valeurs de l'indice et les zones classées comme fortement sensibles dans la carte ISD.

Par ailleurs, les travaux de **Jensen (2016)** et de **Burrough & McDonnell (1998)** ont souligné l'importance des SIG dans l'analyse spatiale des phénomènes environnementaux. Les résultats de cette recherche confirment cet apport, notamment à travers la capacité des SIG à intégrer plusieurs couches d'information et à produire une cartographie synthétique de la sensibilité à la désertification.

Ainsi, la présente étude s'inscrit dans la continuité des recherches internationales tout en apportant une contribution locale spécifique liée aux caractéristiques géographiques et écologiques du sud de Saïda.

V.5.2 Limites méthodologiques de l'étude

Malgré la rigueur de l'approche adoptée, cette étude présente un ensemble de limites qu'il convient de souligner afin de nuancer l'interprétation des résultats.

Sur le plan technique, la précision des analyses dépend fortement de la résolution spatiale des images satellitaires utilisées. Certaines hétérogénéités fines du terrain peuvent ainsi ne pas être entièrement détectées, ce qui peut influencer la précision des classifications.

Sur le plan méthodologique, le choix des indices (notamment le SAVI et les paramètres morphométriques) constitue une simplification des processus environnementaux complexes. En effet, la désertification résulte également de facteurs socio-économiques (pression démographique, pratiques agricoles, modes de gestion foncière), qui n'ont été pris en compte que de manière indirecte.

Par ailleurs, les seuils de classification utilisés pour l'élaboration des cartes thématiques reposent en partie sur des critères standards, ce qui peut introduire une certaine variabilité dans l'interprétation des résultats selon les contextes régionaux.

Enfin, l'absence de données de terrain détaillées (mesures directes de la dégradation des sols, enquêtes socio-économiques approfondies) constitue une limite importante dans la validation des résultats issus du traitement numérique.

V.5.3 Recommandations et perspectives futures

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs recommandations peuvent être formulées afin d'améliorer la gestion et la compréhension des dynamiques de désertification dans la zone d'étude.

Il apparaît nécessaire, en premier lieu, de renforcer les dispositifs de suivi environnemental à travers l'utilisation régulière des données satellitaires à haute résolution, permettant une actualisation continue des cartes de sensibilité.

Il est également recommandé d'intégrer davantage les variables socio-économiques dans les modèles d'analyse, afin de mieux comprendre le rôle des activités humaines dans l'évolution des systèmes steppiques.

Par ailleurs, le développement de campagnes de terrain systématiques permettrait de valider et d'affiner les résultats issus de la télédétection, notamment en ce qui concerne l'état réel des sols et de la végétation.

Sur le plan scientifique, les perspectives futures devraient s'orienter vers l'utilisation de modèles prédictifs de type intelligence artificielle ou apprentissage automatique, permettant d'anticiper l'évolution spatiale de la désertification en fonction des changements climatiques et anthropiques.

V.5.4 Perspectives opérationnelles de lutte contre la désertification

Sur le plan opérationnel, la lutte contre la désertification dans le sud de la wilaya de Saïda nécessite une approche intégrée et multisectorielle, combinant actions écologiques, aménagement du territoire et participation des populations locales.

Parmi les mesures prioritaires, on peut citer :

- la restauration du couvert végétal par des programmes de reboisement adaptés aux conditions arides ;
- la régulation du pâturage afin de réduire la pression sur les parcours steppiques ;
- la protection des zones sensibles identifiées par la carte ISD ;
- la mise en place de techniques de conservation des sols (cordons pierreux, fixation des dunes, aménagements antiérosifs) ;
- le renforcement de la gouvernance environnementale locale à travers une approche participative.

En complément, l'intégration des outils SIG dans les politiques publiques permettrait d'assurer un suivi spatial précis des zones à risque et d'orienter les interventions de manière plus efficace.

Ainsi, la lutte contre la désertification doit être envisagée comme un processus dynamique reposant sur la combinaison entre connaissances scientifiques, outils technologiques et savoirs locaux, afin d'assurer la durabilité des écosystèmes steppiques.



Conclusion

Conclusion

Au terme de ce travail de recherche, il apparaît que la désertification dans la wilaya de Saïda résulte d'un ensemble complexe d'interactions entre facteurs naturels et pressions anthropiques. L'analyse des différentes composantes environnementales a permis de mettre en évidence la fragilité des écosystèmes semi-arides, marqués par une forte variabilité des conditions physiques et une sensibilité accrue à la dégradation des terres.

Les résultats obtenus montrent que l'exploitation des outils de l'intelligence artificielle et des systèmes d'information géographique constitue une avancée significative dans la compréhension et la cartographie des phénomènes de désertification. Ces technologies permettent une analyse plus fine des données spatiales, une meilleure identification des zones sensibles et une amélioration de la précision des diagnostics environnementaux.

Par ailleurs, l'intégration des savoirs écologiques traditionnels a apporté une dimension complémentaire essentielle, en enrichissant l'interprétation des résultats et en mettant en lumière des pratiques locales d'adaptation et de gestion des ressources naturelles. Cette complémentarité entre approches scientifiques modernes et connaissances empiriques renforce la pertinence des analyses et ouvre la voie à des stratégies de gestion plus adaptées aux réalités du terrain.

Ainsi, l'approche intégrée adoptée dans cette étude s'avère pertinente pour mieux comprendre les dynamiques de la désertification dans les zones semi-arides et pour proposer des pistes d'action plus efficaces en matière de lutte contre la dégradation des terres. Elle souligne également la nécessité de promouvoir des modèles de gestion durable basés sur la synergie entre innovation technologique et savoirs locaux.

Enfin, ce travail met en évidence l'importance de poursuivre les recherches dans ce domaine afin d'améliorer les outils d'analyse et de renforcer les stratégies de résilience face aux changements environnementaux, particulièrement dans les régions fragiles comme la wilaya de Saïda.

Références
Bibliographiques

Références Bibliographiques

1. Ganascia, J.-G. (2018). *L'intelligence artificielle : État des lieux et perspectives*. Paris : Éditions du CNRS. p. 12
2. Agrawal, A. (1995). Dismantling the Divide Between Indigenous and Scientific Knowledge. *Development and Change*, 26(3), 413–439, p. 412
3. Agrawal, A. (2002). Indigenous knowledge and the politics of classification. *International Social Science Journal*, 54(173), 338
4. Agrawal, A., & Gibson, C. C. (1999). Enchantment and Disenchantment: The Role of Community in Natural Resource Conservation. *World Development*, 27(4), 629–649, p. 6
5. **Algérie.** (2003). *Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement*. Journal Officiel de la République Algérienne, N° 43, 20 juillet 2003. Disponible sur : <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2003/F2003043.pdf>
6. **Algérie.** (2006). *Décret exécutif n° 06-130 du 9 mai 2006 fixant les modalités d'application de la loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement*. Journal Officiel de la République Algérienne, N° 21. Disponible sur : <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2006/F2006028.pdf>
7. ANR (2025). Décrypter les dynamiques environnementales avec l'IA (Projet TIMES, 2017-2022). France : Agence nationale de la recherche, p. 19
8. Bai, Z., Dent, D., Olsson, L., & Schaepman, M. (2008). *Proxy global assessment of land degradation*. *Soil Use and Management*, 24(3), 223–234.
9. Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., & Kimetu, J. (2007). *Integrated Soil Fertility Management in Africa: Principles, Practices, and Developmental Process*. Nairobi : Academy Science Publishers, pp. 87.
10. Battiste, M., & Henderson, J. Y. (2000). Protecting Indigenous Knowledge and Heritage: A Global Challenge. Saskatoon: Purich Publishing, p. 42–45
11. Behnke, R., Scoones, I., & Kerven, C. (2011). *Pastoralism and Development in Africa: Dynamic Change at the Margins*. London: Routledge, p. 63.
12. Bensaid, A., & Mekki, L. (2018). *Participation communautaire et savoirs traditionnels dans la lutte contre la désertification en Algérie*. *VertigO*, 18(3), p. 76.
13. Benslimane, M., Hamimed, A., El Zerey, W., Khaldi, A., & Mederbal, K. (2008). Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord. *VertigO*, 8(3), p. 23

14. Berkes, F. (2008). *Sacred Ecology: Traditional Ecological Knowledge and Resource Management*. 2nd Edition. New York: Routledge, p. 130
15. Berkes, F. (2012). *Sacred Ecology* (3rd edition). New York: Routledge, p. 112
16. Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2000). Rediscovery of Traditional Ecological Knowledge as Adaptive Management. *Ecological Applications*, 10(5), 1251–1262.
17. CESE (2024). Impacts de l'intelligence artificielle : risques et régulation pour un numérique responsable. France : Conseil économique, social et environnemental, p. 22
18. D'Odorico, P., Bhattachan, A., Davis, K.F., Ravi, S., & Runyan, C. (2013). *Global desertification: Drivers and feedbacks*. *Advances in Water Resources*, 51
19. Dick, R.P. (1994). *Soil enzyme activities as indicators of soil quality*. In *Defining soil quality for a sustainable environment* (Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicsek, D.F., Stewart, B.A., eds.), Soil Science Society of America, pp. 369.
20. Duberry, J. (2021). Intelligence artificielle, données volumineuses et conservation de la biodiversité. *VertigO*, 21(2), p 1–9
21. Eriksen, S., Brown, K., & Kelly, P. M. (2005). The dynamics of vulnerability: locating coping strategies in Kenya and Tanzania. *The Geographical Journal*, 171(4), 150–165, p. 158
22. FAO (2015). *Global Drylands Assessment: Policies and Practices for Desertification Control*. Rome: Food and Agriculture Organization, p. 56.
23. FAO (2015). *Integrated approaches to sustainable land management*. Rome: Food and Agriculture Organization, pp. 72-88.
24. FAO (2016). *Sustainable Land Management Practices in Drylands*. Rome: Food and Agriculture Organization, p. 89.
25. FAO (2017). *Integrating Traditional Knowledge in Land Degradation and Desertification Monitoring*. Rome: Food and Agriculture Organization, pp. 12-20
26. FAO (2018). *Guidelines for Sustainable Land Management in Drylands*. Rome : Food and Agriculture Organization, p. 33.
27. FAO (2018). *State of the World's Forests 2018 – Forest Pathways to Sustainable Development*. Rome: FAO, p. 60.
28. Feng, X., & Fu, B. (2013). *Desertification in North Africa: Climatic Drivers and Human Impacts*. *Journal of Arid Environments*, 92, p. 118.
29. Ferreira, V., Martins, C., & Silva, L. (2014). *Soil Chemistry and Fertility in Semi-Arid Regions*. Lisboa : Ed. Escolar, pp. 112.

30. Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., et al. (2003). Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations. *Ambio*, 32(5), 359–366, p. 364
31. Gadgil, M., Berkes, F., & Folke, C. (1993). Indigenous knowledge for biodiversity conservation. *Ambio*, 22(2/3), 151–156
32. Ganascia, J.-G. (2018). *L'intelligence artificielle : État des lieux et perspectives*. Paris : Éditions du CNRS, p. 45
33. Ghazoul, J., et al. (2015). *Deforestation and Land Use Change in Semi-Arid Regions*. *Environmental Research Letters*, 10(2), p. 213.
34. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press. p. 210-250
35. Grenier, L. (1998). *Working with Indigenous Knowledge: A Guide for Researchers*. Ottawa: International Development Research Centre (IDRC), p. 5
36. Harrison, K. D. (2007). *When Languages Die: The Extinction of the World's Languages and the Erosion of Human Knowledge*. Oxford: Oxford University Press, p. 7
37. Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press. Holland, 1992, p. 105-140
38. Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X., & Ferreira, L.G. (2002). *Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices*. *Remote Sensing of Environment*, 85.
39. Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X., & Ferreira, L.G. (2002). *Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices*. *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 85.
40. INRAE (2023). *L'IA et la télédétection au service de la recherche pour la conservation des forêts tropicales*. France : INRAE, p. 17
41. IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 12
42. IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, p. 145.
43. Jackson, P. (1999). *Introduction to Expert Systems* (3rd ed.). Addison-Wesley. p. 50-85
44. Lal, R. (2001). *Soil degradation by erosion*. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519–539.

45. Lal, R. (2009). *Soil Degradation as a Threat to Sustainable Agriculture*. Springer, pp. 54.
46. Lambin, E.F., & Geist, H.J. (2006). *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Springer, p. 90–105.
47. Lavelle, P., & Spain, A.V. (2001). *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers, pp. 98.
48. Le Houérou, H. N. (2000). *Land degradation, drought, and desertification in the Mediterranean Basin*. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, p. 45.
49. LeCun, Y. (2019). Quand la machine apprend. Paris : Odile Jacob.
50. López-Santos, F., García-Ruiz, J. M., & Lana-Renault, N. (2019). *Land degradation and desertification in Mediterranean regions: A review*. Land Degradation & Development, 30(1), 110–125.
51. Maffi, L. (2001). On biocultural diversity: linking language, knowledge, and the environment. Washington DC: Smithsonian Institution Press, p. 45–48
52. McCarthy, J., Minsky, M. L., Rochester, N., & Shannon, C. E. (1956). A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence. [PDF]. Dartmouth College.
53. Middleton, N., & Thomas, D. (1997). *World Atlas of Desertification*. London: Arnold, p. 211.
54. Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis*. Washington, DC: Island Press, p. 62.
55. Mistry, J., & Berardi, A. (2016). Bridging indigenous and scientific knowledge. Environmental Science & Policy, 57, 1–6
56. Moller, H., Berkes, F., Lyver, P. O., & Kislalioglu, M. (2004). Combining Science and Traditional Ecological Knowledge: Monitoring Populations for Co-Management. Ecology and Society, 9(3), 2, p. 35
57. Mortimore, M. (2009). *Adapting to Drought: Farmers, Famines, and Desertification in West Africa*. Cambridge University Press, p. 101.
58. Nilsson, N. J. (1998). Artificial Intelligence: A New Synthesis. Morgan Kaufmann. p. 75-110
59. Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A., & Sombroek, W.G. (1991). *World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note*. Wageningen: ISRIC, p. 21.
60. Oussedik, A., Iftene, T., & Zegrar, A. (2003). Réalisation par télédétection de la carte d'Algérie de sensibilité à la désertification. Sécheresse, 14(3), pp. 198

61. Pachot, A., & Patissier, C. (2022). Intelligence artificielle et environnement : alliance ou nuisance ? L'IA face aux défis écologiques d'aujourd'hui et de demain. Paris : Dunod, pp. 78-102
62. Pretty, J., Adams, B., Berkes, F., et al. (2009). The intersections of biological and cultural diversity. *Ecological and Environmental Anthropology*, 5(1), 1–20, p. 12
63. Pretty, J., Adams, B., Berkes, F., et al. (2009). The Intersections of Biological and Cultural Diversity". *Ecology and Society*, 14(2), 22
64. Qadir, M., Qureshi, R., & Cherlet, M. (2007). *Salinity Management in Arid and Semi-Arid Zones*. Springer, pp. 210.
65. Reij, C., Tappan, G., & Smale, M. (2009). *Agroenvironmental transformation in the Sahel: Another kind of “green revolution”*. IFPRI Discussion Paper 00914, Washington DC.
66. Reynolds, J. F., Stafford-Smith, D. M., Lambin, E. F., et al. (2007). *Global desertification: Building a science for dryland development*. *Science*, 316(5826), 847–851.
67. Rossi, M., Marinelli, A., & Basso, B. (2014). *Remote sensing and GIS for monitoring land degradation in arid areas*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 88.
68. Sene, E., Diouf, M., & Ndiaye, A. (2018). *Integrated Approaches for Combating Desertification in West Africa*. Springer, p. 105.
69. Shiva, V. (2000). *Earth Democracy: Justice, Sustainability, and Peace*. Cambridge, MA: South End Press, p. 88
70. Skarpe, C., Bergström, R., & Danell, K. (2010). *Land Degradation and Restoration in Drylands*. Springer, p. 77.
71. THEIA (2023). Cartes OSO d’occupation des sols (10 m) – production annuelle & jeux de données AI4LCC. France : THEIA,
72. Toulmin, C., & Gueye, A. (2003). *Desertification in the Sahel: Linking Environmental Science with Policy*. London : International Institute for Environment and Development (IIED), p. 22.
73. Tschakert, P. (2007). *Views from the vulnerable: Understanding climatic and other stressors in the Sahel*. *Global Environmental Change*, 17(3-4), 413–426.
74. UNCCD (1994). *Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification*. Genève : Nations Unies.

Références Bibliographiques

75. UNCCD (2011). *Global Assessment of the Implementation of the UNCCD*. Bonn: United Nations Convention to Combat Desertification, p. 112.
76. UNCCD (2017). *Global Land Outlook: A Sustainable Future for Drylands*. Bonn: UNCCD, p. 34.
77. UNCCD (2017). *The Global Land Outlook*. Bonn: United Nations Convention to Combat Desertification, pp. 101-115.
78. UNDP (2013). *Human Development Report: Environment and Development in Semi-Arid Regions*. New York: United Nations Development Programme, p. 45.
79. UNESCO. (2010). *Local and Indigenous Knowledge Systems: Report on the State of the World's Indigenous Languages*. Paris: UNESCO, p. 28
80. Valentin, C., et al. (2008). *Degradation of Dryland Ecosystems in North Africa: Causes and Consequences*. *Journal of Arid Environments*, 72, p. 45.
81. Zribi, M., Merlin, O., Briottet, X., & Leconte, R. (2016). *La désertification en zones semi-arides : enjeux et perspectives*. Paris : Éditions Quae, pp. 49.