



Université de Saida– Dr. Moulay Tahar
Faculté des Sciences naturelles et vie

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat En Sciences

Filière : Écologie et environnement

Spécialité : Écologie et environnement

Par :

KADRI Chadli Bendjedid

Thème :

Apport des SIG dans l'étude de la vulnérabilité à la désertification dans les régions occidentales des hauts plateaux de l'Algérie

Thèse soutenue le : 18 / 09 / 2024 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Établissement	Qualité
01	HASNAOUI Okkacha	Prof	Université de Saida - Dr. Moulay Tahar	Président
02	NASRALLAH Yahia	Prof	Université de Saida - Dr. Moulay Tahar	Rapporteur
03	SI TAYE Tayeb	Prof	Université de Saida - Dr. Moulay Tahar	Examineur
04	HADDAD Ahmed	Prof	Centre Universitaire Nour El Bachie d'El Bayadh	Examineur
05	HAMLAT Abdelkader	Prof	Université Amar Thelidji Laghouat	Examineur
06	GUERROUDJ Abdelhalim	MCA	Université Amar Thelidji Laghouat	Examineur

" Apport des SIG dans l'étude de la vulnérabilité à la désertification dans les régions occidentales des hauts plateaux de l'Algérie "

Résumé :

La désertification est définie comme un processus de dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches. Les Hauts Plateaux Occidentaux (HPO) sont l'une des régions les plus touchées par ce phénomène. L'objectif de cette thèse est d'intégrer des données SIG et télédétection pour cartographier les zones les plus vulnérables à la désertification. À cet effet, deux types de cartes de la désertification ont été réalisés : l'une est la carte de l'ensablement, pour laquelle les paramètres biophysiques (albédo, TGSI, température de surface et l'indice de végétation (NDVI)) ont été combinés avec une technique d'intelligence artificielle. Les résultats obtenus révèlent que 20% de cette surface est vulnérable au phénomène de l'ensablement. L'autre carte représente la désertification et la dégradation des terres, où dix couches d'information (pente, texture, drainage, roche mère, précipitation, aridité, couvert végétal, densité de population, densité du réseau routier et densité du bétail) ont été combinées avec une technique d'analyse multicritère. Les résultats indiquent que la région des Hauts Plateaux Occidentaux a connu une détérioration significative de la qualité du sol, avec 69% des terres considérées comme plus vulnérables à la désertification que d'autres.

Mots clés : désertification, système d'information géographique, Les hauts plateaux occidentaux.

" Contribution of GIS in the study of vulnerability to desertification in the western regions of the Algerian highlands "

Abstract:

Desertification is defined as the process of land degradation in arid, semi-arid, and semi-humid regions. Many countries around the world, including Algeria, suffer from this phenomenon, especially the Western Highlands. The objective of this thesis is to integrate geographic information systems (GIS) and remote sensing data to map the most vulnerable areas to desertification. For this purpose, two types of desertification maps were produced: one is a sand encroachment map that combines biophysical parameters (albedo, TGSI, land surface temperature, and vegetation index) with artificial intelligence. The results obtained show that 20% of this surface is vulnerable to the sand encroachment phenomenon. The other is a map of desertification and land degradation, where ten layers of information, including slope, soil texture, drainage, geology, rainfall, aridity, vegetation cover, population density, road density, and livestock density, were integrated using multi-criteria analysis. The obtained results reveal that the Western Highlands region has experienced significant soil degradation, with approximately 69% of the land classified as fragile and more susceptible to desertification than other areas.

Key words: desertification, geographic information system, western highlands.

"مساهمة نظم المعلومات الجغرافية في دراسة قابلية التصحر بمناطق الهضاب العليا الغربية للجزائر"

الملخص:

يُعرّف التصحر بأنه عملية تدهور الأراضي في المناطق القاحلة، شبه القاحلة وشبه رطبة. الكثير من بلدان العالم تعاني من هذه الظاهرة من بينها الجزائر. إذ تعتبر الهضاب العليا الغربية للجزائر من أكثر المناطق تأثراً بهذه الظاهرة. الهدف من هذه الأطروحة هو دمج بيانات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لرسم خريطة للمناطق الأكثر عرضة للتصحر. ولهذا الغرض تم إنتاج نوعين من خرائط التصحر؛ إحداهما هي خريطة زحف الرمال التي تم فيها دمج المعلمات الفيزيائية الحيوية (البيدو، تيجي أس أي، درجة حرارة السطح ومؤشر الغطاء النباتي) مع تقنية الذكاء الاصطناعي. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن 20% من هذه الأراضي معرضة لظاهرة زحف الرمال. الخريطة الأخرى هي خريطة التصحر وتدهور الأراضي حيث قمنا بدمج عشر طبقات من المعلومات متمثلة في (طبقة الإنحدار، طبقة ملمس التربة، طبقة صرف المياه، طبقة الجيولوجيا، طبقة التساقطات المطرية، طبقة الجفاف، طبقة الغطاء النباتي، طبقة الكثافة السكانية، طبقة كثافة شبكة الطرق و طبقة الكثافة الحيوانية) مع تقنية التحليل متعدد المعايير. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن منطقة المرتفعات الغربية شهدت تدهورا كبيرا في نوعية التربة مما يجعل حوالي 69% من الأراضي مصنفة على أنها هشة ومعرضة أكثر من غيرها لظاهرة التصحر.

كلمات مفتاحية: التصحر، نظم المعلومات الجغرافية، الهضاب العليا الغربية.

Dédicace

À ma mère,

À ma femme,

À mes chers enfants : Rania, Amira et Riad,

À mes nièces et mes neveux,

À mes sœurs et mes frères,

Je dédie ce travail...

Remerciements

Je remercie Dieu, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail. Que Sa bénédiction et Sa gloire soient infinies.

Je souhaite exprimer ma plus profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, Monsieur Yahia Nasrallah, pour ses précieux conseils, ses encouragements constants, et sa grande disponibilité tout au long de ce projet.

Je remercie chaleureusement les responsables de l'Université de Saïda, en particulier Monsieur le Recteur de l'université ainsi que Monsieur le Doyen de la Faculté des Sciences Naturelles et de la Vie, pour l'opportunité qui m'a été offerte de poursuivre et de réaliser mon doctorat au sein de leur institution.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur le Professeur Hasnaoui Okkacha pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider ce jury, ainsi qu'à Messieurs Sitayeb Tayeb, Professeur à l'Université de Saïda, Haddad Ahmed, Professeur au Centre Universitaire d'El Bayadh, Hamlat Abdelkader, Professeur à l'Université Amar Thelidji de Laghouat, et Guerroudj Abdelhalim, Maître de Conférences à l'Université Amar Thelidji de Laghouat, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en participant à ce jury en tant qu'examineurs.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers les responsables des directions de l'administration locale et de l'agriculture des wilayas de Saïda, Tiaret, Tissemsilt, Naâma et El Bayadh, pour leur disponibilité et leur assistance précieuse tout au long de la réalisation de cette thèse.

Enfin, mes remerciements les plus sincères s'adressent à Monsieur Oussama Nasrallah pour son soutien moral et intellectuel, qui a été un pilier tout au long de mon parcours.

Table des matières

Résumé.....	i
Abstarct.....	ii
الملخص.....	iii
Dédicace	iv
Remerciement	v
Table des marières.....	vi
Notations et acronymes	xi
Liste des figures.....	xiii
Liste des tableaux.....	xvi
Introduction Générale.....	1
<u>Chapitre I: Aperçu sur la Désertification et la Dégradation des Terres des Hauts Plateaux Occidentaux : Handicapes, Enjeux et Outils de Diagnostic</u>	
1. Introduction.....	6
2. Formes de dégradation des sols	7
2.1. Dégradation chimique.....	7
2.1. Dégradation physique.....	8
2.2. Dégradation biologique.....	8
3. Principales causes de la désertification.....	8
3.1. Facteurs naturels	8
3.1.1. La sécheresses	8
3.1.2. Dégradation des terres arides	9
3.1.3. La salinisation.....	9
3.2. Facteurs anthropiques.....	9
3.2.1. Le surpâturage	9
3.2.2. Mise en culture des terres	10
4. États de la désertification en Algérie	11
5. Efforts de l'Algérie dans la lutte contre la désertification.....	13
6. Divisions territoriales.....	15
7. Position du problème	16

8. Présentation du HPO.....	17
9. HPO : Atouts, handicapes et enjeux	18
9.1. Les Atouts.....	19
9.2. Les handicapes et les contraintes	19
9.3. Enjeux.....	21
9.3.1. Le changement climatique	21
9.3.2. Évolution de la température au cours du XXIème siècle selon le GIEC	22
9.3.3. Les impacts prévisibles.....	22
10. Outils de suivi et cartographie de la désertification.....	23
10.1. La stratégie FAO/UNEP	23
10.1.1. Risque de désertification	23
10.1.2. Statut de désertification	24
10.1.3. Taux de désertification	24
10.1.4. Danger de la désertification	24
10.1.5. Classification de taux de danger de la désertification.....	24
10.2. La stratégie Analyse-multicritère /Apprentissage-Automatique.....	25
10.3. La stratégie Apprentissage Automatique.....	25
11. Géosciences et apprentissage automatique.....	25
11.1. Intelligence artificielle.....	26
11.2. Apprentissage automatique	26
11.3. Apprentissage profond.....	27
11.4. GeoAI	27
11.5. Géo-spatial.....	27
11.6. Données nécessaires dans l'apprentissage automatique.....	28
11.6.1. Données d'entrainement.....	28
11.6.2. Données de test	28
11.7. Type d'apprentissage automatique	28
11.7.1. Apprentissage supervisé.....	29
11.7.2. Apprentissage non-supervisé	33
12. Apprentissage renforcé	36

13. Conclusion	36
----------------------	----

Chapitre II : Paramètres Biophysiques et Désertification

1. Introduction	38
2. Source de données et prétraitement	39
3. Données Images	39
4. Bandes et résolutions.....	40
5. Température de surface (LST)	41
5.1. Aspect théorique.....	41
5.2. Aspect algorithmique	43
5.3. Estimation de l'émissivité de surface	43
5.4. Estimation du contenu de vapeur d'eau	44
6. L'albédo.....	46
6.1. Aspect théorique.....	46
6.2. Aspect Algorithmique	50
7. L'indice de végétation	51
8. TGSI.....	53
9. Indices et corrélation	55
10. Schéma d'optimisation.....	55
11. Échantillonnage	58
12. Éléments de contrôle.....	60
12.1. ROC et AUC	60
12.1.1. ROC.....	60
12.1.2. AUC.....	61
12.1.3. Estimation et analyse du AUC.....	62
12.2. Paysage et patches	63
12.2.1. Notion de paysage	63
12.2.2. Notion de patch	64
12.2.3. Indice de fragmentation.....	64
12.2.4. Indice de séparation.....	66
12.2.5. Analyse et évaluation	67

13. Résultats.....	68
13.1. Statut actuel de la désertification dans HPO	68
13.1.1. Statut régional	68
13.1.2. Statut local	70
14. Contribution des Indices.....	73
15. Discussion.....	75
16. Évolution spatio-temporelle de la désertification	77
16.1. Évolution globale.....	77
16.2. Évolution interclasses.....	79
17. Conclusion	81

Chapitre III: Évaluation de la Dégradation des Terres par l'Analyse Multicritère

1. Introduction.....	83
2. Analyse multicritère	83
2.1. Définition	83
2.2. Principe	84
2.3. Concepts.....	84
2.3.1. Action	84
2.3.2. Alternatives	84
2.3.3. Attributs	84
2.3.4. Critères	84
2.3.5. Pondération	84
2.3.6. Agrégation	85
2.3.7. Espace de décision.....	85
2.3.8. Préférences	85
2.4. Les principales méthodes d'analyse multicritères (AMC).....	85
3. Système d'information Géographique (SIG).....	87
4. Complémentarité d'AMC et de SIG	88
5. Méthode et matériels	88
5.1. Choix des critères.....	89

5.2. Analyse multicritère hiérarchique (AHP)	90
5.2.1. Rapport de cohérence.....	92
5.2.2. Attribution des scores aux sous-critères.....	93
5.2.3. Analyse successive pondérée	93
6. Résultats.....	94
6.1. Critères et HPO.....	94
6.1.1. La pente	94
6.1.2. La texture du sol	97
6.1.3. La roche mère.....	100
6.1.4. Le drainage.....	101
6.1.5. Le couvert végétal	103
6.1.6. La précipitation	105
6.1.7. L'aridité	106
6.1.8. La densité de la population	108
6.1.9. La densité du réseau routier	110
6.1.10. La densité du bétail	111
6.2. Évaluation des zones de désertification	114
6.3. Précision et validation	117
7. Discussion.....	121
8. Conclusion	124
Conclusion Générale.....	125
Références bibliographiques	128

Notations et Acronymes

AA : Apprentissage Automatique

ACP : Analyse en Composante Principale

AI : Artificial Intelligence

AP : Apprentissage Profond

AHP: Analytic Hierarchical Process

AMC: Analyse Multi-Critères

AUC: Area under the ROC Curve

CI : Consistency Index

CPR : Chantiers de Reboisement Populaires

CR : Cohérence Ratio

DDT : Désertification et Dégradation des Terres

DEA: Decision Efficiency Analysis

DL: Deep Learning

DRS : Le plan de Défense et Restauration des Sols

DT : Decision Tree

E Sévère : Extrêmement Sévère

FAO: Food and Agriculture Organization

FST : Fuzzy Sets Theory

GEE: Google Earth Engine

GEIC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat

HPC : Hauts Plateaux Centraux de l'Algérie

HPE : Hauts Plateaux-Est de l'Algérie

HPO : Hauts Plateaux Occidentaux de l'Algérie

HCDS : Le Haut-Commissariat au Développement de la Steppe

KNN: K Nearest Neighbors

LST: Land Surface Temperature

LULC: Land Use Land Covert

MADR : Ministère d'agriculture et de Pêche Maritime

MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement

MEDALUS: Mediterranean Desertification and Land Use

MODIS: Terra Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer

ML: Machine Learning

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NMO: National methodological Office

PCM : Pairwise Comparison Matrix

RF: Random Forest

RI : Random Index

ROC: Receiver Operating Characteristic

SIG : Système D'Information Géographique

SNAT : Schéma National d'Aménagement du Territoire

TGSI: Topsoil Grained Surface Index

WOA : Weighted Overlay Analysis

Liste des Figures

Figure 1: Érosion : a) hydrique (Djbel El Melh, 2020) et b) éolienne (Ain dheb, 2023).....	8
Figure 2: Exemple d'avancement du désert vers le nord, route communale Tousmouline-Meharra dans la wilaya d'Elbayedh.....	12
Figure 3 : Action de lutte contre la désertification	14
Figure 4: Limites et position de la zone d'étude (HPO) d'après (SNAT)	17
Figure 5: Relation au sein de l'IA.....	27
Figure 6: La conception du GeoAI.....	28
Figure 7: Algorithmes utilisés dans l'apprentissage supervisé et non supervisé	29
Figure 8 : Le schéma général de la méthode "Random Forest"	30
Figure 9: Le schéma général de la méthode "Decision Trees"	31
Figure 10: Exemple de classification par l'utilisation du méthode "KNN"	32
Figure 11: Les différents types de "clustering "	35
Figure 12: Exemple d'une re-projection des données réalisées par ACP.....	35
Figure 13 : La carte de la température de surface de la région du HPO	45
Figure 14 : Variation temporelle de la température de surface (LST) dans la région (HPO) : 2000-2023.....	46
Figure 15: Géométrie d'acquisition de réflectance.....	47
Figure 16: La carte de l'Albédo de la région du HPO	50
Figure 17 : Variation temporelle de l'albédo dans la région (HPO) : 2000-2023	51
Figure 18 : La carte de l'NDVI de la région du HPO	52
Figure 19 : Variation temporelle de l'NDVI dans la région (HPO) : 2000-2023	53
Figure 20 : La carte de TGSi de la région du HPO.....	54
Figure 21 : Variation temporelle de TGSi dans la région (HPO) : 2000-2023	54
Figure 22 : Indices et corrélation	57
Figure 23 : Processus de combinaison des données, des indices de satellite MODIS et techniques d'apprentissage automatiques (DT, RF, KNN)	58
Figure 24 : Le taux de FP (vs) le taux TP au niveau de différents seuils de classification.....	61
Figure 25 : AUC et ROC	62
Figure 26: Principaux éléments d'un paysage	64

Figure 27: La carte de désertification obtenue à partir des différentes combinaisons en plus de toutes les méthodes d'apprentissage.....	65
Figure 28 : Distribution spatiale de la désertification dans la région du HPO	69
Figure 29: Proportion des classes de la désertification dans HPO	70
Figure 30 : Distribution spatiale de la désertification dans la wilaya de Tissemsilt	70
Figure 31 : Distribution spatiale de la désertification dans la wilaya de Tiaret	71
Figure 32 : Distribution spatiale de la désertification dans la wilaya de Saïda	72
Figure 33 : Distribution spatiale de la désertification dans le nord de Naâma	72
Figure 34 : Distribution spatiale de la désertification dans le nord d'El bayedh	73
Figure 35 : Échantillonnage de la contribution individuelle des indice dans la classification du désertification.....	74
Figure 36 : Seuil de contribution des indices dans l'établissement de la carte de désertification..	75
Figure 37 : Comparaison de l'état de la désertification entre la période 2000 et 2023	78
Figure 38 : Évolution par classe du phénomène de la désertification dans la période 2000-2023 .	79
Figure 39 : Immigration des classes de désertification dans la période 2000-2023	79
Figure 40 : Évolution Interclasse du phénomène du désertification dans la période 2000-2023 ...	80
Figure 41: Procédure suivie pour générer la carte du désertification et dégradation des terres dans HPO.....	89
Figure 42: La carte des pentes de la région du HPO	95
Figure 43 : Proportion du critère pente dans la région du HPO	95
Figure 44: Classification granulométrique du sol.....	97
Figure 45: La carte de la qualité du texture dans la région du HPO	99
Figure 46: Proportion du critère texture dans la région du HPO	99
Figure 47: La carte de la qualité du roche mère dans la région du HPO	100
Figure 48: Proportion du critère roche mère dans la région du HPO.....	101
Figure 49 : La carte de la qualité du drainage dans la région du HPO.....	102
Figure 50: Proportion du critère drainage dans la région du HPO	102
Figure 51: La carte du couvert végétal dans la région du HPO.....	104
Figure 52: Proportion du critère couvert végétal dans la région du HPO.....	104
Figure 53: La carte de la précipitation dans la région du HPO	105
Figure 54: Proportion du critère précipitation dans la région du HPO	106

Figure 55: La carte de l'aridité dans la région du HPO.....	108
Figure 56: Proportion du critère aridité dans la région du HPO	108
Figure 57: La carte de la densité de population dans la région du HPO.....	109
Figure 58: Proportion du critère densité de la population dans la région du HPO	110
Figure 59 : La carte de la densité du réseau routier dans la région du HPO	111
Figure 60: Proportion du critère densité de réseau routier dans la région du HPO	111
Figure 61: La carte de la densité de bétail dans la région du HPO	112
Figure 62: Proportion du critère densité de bétail dans la région du HPO.....	113
Figure 63: La carte du désertification et dégradation des terres (DDT)	114
Figure 64: Disposition des critères par L'ACP	118
Figure 65: La distribution en deux (a) et trois (b) dimensions des données ACP discriminées....	119
Figure 66: Superposition des données ACP et la carte de la DDT.....	120

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Module de la vitesse et la direction des vents dans la région du HPO	18
Tableau 2 : Échelles d'évaluation de taux de danger de la désertification	24
Tableau 3 : Caractéristiques des bandes spectrales de MODIS/TERRA	40
Tableau 4: Caractéristiques des quatre paramètres biophysiques fournis par MODIS/TERRA ...	41
Tableau 5: Valeur typique de l'albédo de surface et l'albédo planétaire	49
Tableau 6 : Les classes de la désertification.....	59
Tableau 7 : Caractéristiques de la texture des terres désertées.....	60
Tableau 8 : Les résultats de la valeur d'AUC pour toutes les combinaisons	62
Tableau 9 : L'indice de fragmentation appliqué à la désertification basé sur les différentes combinaisons	66
Tableau 10 : L'indice de séparation appliqué à la désertification basé sur les différentes combinaisons	67
Tableau 11 : Les principales méthodes d'analyse multicritères	85
Tableau 12: : Description des données nécessaires pour réaliser la carte du DDT	90
Tableau 13 : Échelle de comparaison par paires.....	91
Tableau 14: Matrice de comparaison par paire (PCM).....	92
Tableau 15: Indice de cohérence aléatoire.....	93
Tableau 16: Poids et scores des critères et sous-critères.....	96
Tableau 17: Classe de climat.....	107
Tableau 18: Statistiques des cheptels dans la région du HPO (2022)	112
Tableau 19: Propriétés des zones de désertification dans la région du HPO.....	116
Tableau 20: Résultats de l'ACP appliquée aux critères de la désertification	118
Tableau 21: Matrice d'erreurs	120

Introduction Générale

La désertification et la dégradation des terres (DDT) est un problème de plus en plus préoccupant à l'échelle mondiale. Elle menace non seulement la productivité des terres, mais aussi la qualité de l'eau, la santé humaine et les fondamentaux des écosystèmes (SAC 2016).

La désertification est définie comme un processus de dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, résultant de divers facteurs, en particulier les changements climatiques et les activités humaines (UNCCD 2007) qui, à leurs tours, ont un impact sur la qualité des sols (Fantechi 1995). Le résultat de la dégradation a conduit à une réduction persistante de la qualité des sols, ainsi qu'à la perte de la productivité biologique et économique des terres et de la qualité de l'environnement (Zdruli 2011).

Il est estimé qu'environ 24 milliards de tonnes de sols fertiles et 27 000 espèces biologiques disparaissent chaque année à l'échelle mondiale. Même si la dégradation des terres est particulièrement ressentie dans les zones arides, environ 80% se produit en réalité en dehors de ces zones (SAC 2016).

Le rapport de UNCCD (2015) a montré que 25 % de l'ensemble des terres sont gravement dégradées, voire en cours de dégradation. La désertification touche d'une manière directe plus d'un milliard de personnes dans le monde (Rubio and Recatalá 2006), et ses dégâts ont coûté annuellement plus de 42 milliards de dollars à l'économie mondiale (Marinică and Marinică 2014).

L'Algérie fait partie des pays qui souffrent depuis longtemps de ce phénomène, principalement, les Hauts Plateaux occidentaux (HPO). Ces derniers représentent environ 7% de la superficie totale du pays. La région est généralement marquée par une diversité paysagère importante en relation avec la variété notable des facteurs environnementaux. Connue pour sa tradition pastorale, cette région a été majoritairement peuplée par des nomades qui ont une tendance importante à la sédentarisation (Nedjraoui and Bédrani 2008).

Depuis plus de 50 ans, la région connaît une dégradation de plus en plus accentuée de toutes les composantes des écosystèmes (flore, couvert végétal, fertilité des sols, faune, etc.) (Nedjraoui and Bédrani 2008), qui se traduit par une réduction sensible des potentialités biologiques et une rupture des équilibres écologiques et socio-économiques (Aidoud and Touffet 1996). Selon Nedjraoui (2011), la dégradation a atteint le seuil d'irréversibilité dans certaines zones, elle signale également qu'entre 50 à 80% de la végétation palatable a disparu.

Le système d'indication de la désertification pour l'Europe méditerranéenne "DIS4ME" estime que le nombre de facteur qui peut induire la désertification et la dégradation des terres (DDT) est de l'ordre de 148 facteurs, distribués en cinq grandes classes (indicateurs

physiques et écologiques, économiques, sociaux, institutionnels et composites) (DIS4ME 2023).

Aïdoud et al. (2006); Aidoud and Touffet (1996); Nedjraoui (2003); Nedjraoui and Bédrani (2008) montraient que plusieurs facteurs ont joué un rôle prépondérant dans la dégradation des terres dans la région, les plus importants sont : le surpâturage, la déforestation, l'érosion des sols, les fortes précipitations, la sécheresse, la salinisation, élargissement et surcroît de l'intensité de l'agriculture irriguée, le déplacement des populations, l'ensablement, les incendies, le réchauffement climatique et d'autres facteurs implicites.

Au cours des années précédentes, de nombreuses études ont focalisé leurs objectifs pour comprendre, analyser, et suivre la désertification dans la région du HPO ; en se concentrant sur l'un des facteurs que les recherches le qualifient comme étant influent. Parmi elles, Morsli et al. (2016) n'ont pris en compte que le facteur végétation pour évaluer la désertification. Nedjraoui and Bédrani (2008) ont cependant utilisé les facteurs climatiques et l'état des pâturages pour évaluer la situation des terres dans la région. Benslimane et al. (2008) ont intégré trois paramètres biophysiques (température de surface, albédo et NDVI) par l'intégration des données de capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) avec une résolution de 1 km pour générer une carte de la désertification (ensablement). L'agence spatiale algérienne a pour sa part tenté de générer une carte de la désertification à l'échelle 1/200000. Elle est basée sur des cartes d'occupation du sol, cartes morpho-pédologiques et des cartes de suivi de l'ensablement (ASAL 2010). Nedjraoui (2011); là où la recherche était la plus large, elle incluait plus d'un élément qui peut affecter la DDT tel que l'indice de sécheresse, l'élément de la croissance de la population, l'augmentation du bétail et la gestion des parcours. Dans cette étude, elle a défini le niveau de vulnérabilité de ces terres par rapport aux facteurs de désertification, sans délimiter les zones affectées.

À la lumière des tentatives précédentes, et pour la première fois, notre étude a adopté les nouvelles limites géographiques de la région des hauts plateaux occidentaux (HPO) définies par le journal officiel (JO 2010), qui comprend les cinq wilayas représentées par Saïda , Tiaret, Tissemsilt, Naâma et El bayedh.

L'objectif de cette thèse est de réaliser deux types de cartes de la désertification dans la région du HPO :

- la carte d'ensablement de la région des hauts plateaux occidentaux (HPO).
- la carte de désertification et de dégradation des terres dans la région des hauts plateaux occidentaux (HPO).

Compte tenu de ces objectifs, nous avons structuré notre travail en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre (Chapitre I) est consacré à la recherche bibliographique sur le phénomène de la désertification, et ses différentes définitions jusqu'à la conférence de Rio en 1992. Dans cette section, nous avons exposé les moyens et les efforts déployés par l'État depuis l'indépendance pour lutter contre la désertification. Nous avons également présenté le statut de création du HPO, expliqué brièvement, les handicaps, les enjeux et les défis distinctifs auxquels la région est confrontée dans la lutte contre ce phénomène. Dans l'étape suivante, des solutions techniques ont été proposées pour le suivi et le contrôle de la désertification. Enfin, à la fin de cette partie, nous avons abordé les méthodes d'intelligence artificielle et leurs relations avec l'information spatiale, soulignant ainsi leur implication dans le suivi des phénomènes à caractère naturel.

Dans le deuxième chapitre (Chapitre II) de ce document, nous avons présenté une bref définition des données MODIS puis l'aspect théorique et algorithmique des paramètres biophysiques choisis pour établir la première carte (carte d'ensablement). Dans la phase qui suit, nous avons exposé les types de méthodes d'intelligence artificielle, ainsi que les différentes combinaisons liant ces méthodes aux paramètres biophysiques adoptés pour sélectionner ensuite, la combinaison la plus optimale pour réaliser cette carte. Enfin, nous avons bouclé ce chapitre par l'analyse de l'évolution de l'ensablement dans la région entre 2000 et 2023.

En fait, cette première carte ne prenait en compte que le phénomène d'ensablement qui a affecté la région d'une manière agressive, résultant de la pression anthropique exercée sur les parcours steppiques et de l'impact des changements climatiques entrant dans une phase de danger sensible.

Contrairement à l'étude menée par [Benslimane et al. \(2008\)](#) où ils adoptent trois paramètres biophysiques et pour une période très restreinte pour réaliser la carte d'ensablement, l'intégration des séries temporelles des données satellitaires à des fins régionales, représentées par des images MODIS, depuis l'année 2000 jusqu'à 2023 dans la plateforme Google Earth Engine (GEE) permet de réaliser la carte de degré de vulnérabilité à la désertification (ensablement). Cette carte est basée sur la combinaison de quatre paramètres biophysiques (Albédo, TGSi, NDVI et la température de surface) en plus d'une méthode d'intelligence artificiel, à une résolution spatiale équivalente à 500 m.

Le chapitre III est consacré à la technique d'analyse multicritère hiérarchique (AHP) basée sur les SIG utilisée pour établir la carte de désertification et dégradation des terres (DDT). L'AHP, qui est l'un des outils de décision multicritères les plus répandus, développé par [Saaty \(1980\)](#), a permis d'incorporer de multiples paramètres quantitatifs et qualitatifs d'une manière significative et rationnelle ([Teehankee \(2009\)](#)).

Dans ce chapitre, quelques notions des méthodes d'analyse multicritères et de leurs relations avec les SIG ont été fournies. Ensuite, le critère de choix de la méthode adoptée dans cette thèse, à savoir : l'AHP, est présenté. L'étape suivante est réservée à la présentation de toutes les couches d'information (paramètres) choisies pour cette étude,

suivie de la combinaison de ces paramètres avec la technique AHP pour produire les poids nécessaires à la réalisation de la carte de DDT.

La carte de la désertification et la dégradation des terres (DDT) n'intègre pas seulement un seul paramètre, mais s'est élargie pour inclure tous les paramètres ayant un impact sur ce phénomène, quel que soit le degré de l'incohérence. Compte tenu des spécificités de la région et les résultats des recherches similaires sur la désertification et la dégradation des terres (DDT) (Budak et al. 2018; Dastorani 2022; Ferrara et al. 2020; Kadović et al. 2016; Kosmas et al. 1999; Lahlaoui et al. 2017; Marinică and Marinică 2014; Momirović et al. 2019), les paramètres retenus dans cette étude sont le climat, le sol, la végétation et la pression anthropique.

Les techniques avancées de gestion et de traitement des données de type spatiales jouent un rôle crucial dans l'évaluation des catastrophes naturelles, en particulier la dégradation des sols. Ces dernières années, l'intégration des statistiques et des modèles mathématiques a connu un développement rapide dans la compréhension, l'analyse et la cartographie des risques de désertification. La contribution du système d'information géographique (SIG) et de la télédétection à l'analyse décisionnelle multicritère (AMC) pour l'évaluation de données cartographiques volumineuses est considérable.

Dans ce contexte, à la fin de ce chapitre, nous avons tenté d'évaluer cette carte (DDT) en adoptant une méthode non supervisée, consistant en l'analyse en composante principale associée avec une technique d'intelligence artificielle.

Chapitre I :

Aperçu sur la Désertification et la Dégradation des Terres des Hauts Plateaux Occidentaux :

Handicapes, Enjeux et Outils de Diagnostic

1. Introduction

La désertification est une forme de dégradation du milieu causée par des conditions combinées telles que la sécheresse, l'exploitation excessive et l'aridité. La dégradation des terres est la perte de certaines qualités propres des terres ou la diminution dans leur capacité à effectuer des fonctions essentielles : écologiques, biologiques, économique et sociales (Cornet 2001; Louassa 2010).

La désertification se manifeste généralement par : la diminution de la fertilité du sol, l'érosion éolienne et hydrique, une diminution des réserves en eau, une disparition prolongée de la végétation naturelle, un encroûtement, un mouvement des dunes et des événements extrêmes (Hountondji et al. 2004; Louassa 2010).

L'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (Fao/Unep 1984) a mentionné que la désertification peut généralement se distinguer par une dégradation des ressources végétales et animales, du sol et de l'eau et par une perte partielle ou totale de la productivité biologique dans les zones soumises à un stress écologique. Dans les écosystèmes fragiles comme ceux des bords du Sahara, cette dégradation peut réduire la capacité de ces zones gravement touchées à subvenir aux besoins de la vie humaine.

Outre, la définition de la désertification donné par la conférence des nations unies pour la désertification en 1977(UNCOD 1977) et qui définit la désertification comme : "La diminution ou la destruction du potentiel biologique de la terre, ce qui peut conduire à des conditions quasi désertiques".

On passe en revue les définitions les plus importantes du phénomène de désertification proposées par la communauté scientifique jusqu'à la Conférence de Rio en 1992.

Où Dregne (1977) définissait la désertification comme : "L'appauvrissement des écosystèmes arides, semi-arides et subhumides par l'impact conjugué des activités humaines et de la sécheresse. C'est le processus de changement dans les écosystèmes qui peut être mesuré par une productivité réduite des plantes, l'altération du biomasse et diversité du micro et macro faune et flore, par conséquent une dégradation accélérée des sols et des risques accrus par l'occupation humaine".

Kharin and Petrov (1977) ont également fourni la définition suivante : "Un processus complexe à caractère naturel et anthropiques, provoquant la destruction des écosystèmes arides, semi-arides et subhumides et la dégradation de toutes les formes de vie organique, ce qui, à son tour, entraîne une diminution du potentiel naturel et économique de ces territoires".

Bishay and McGinnies (1979) citaient que la désertification est : "L'appauvrissement des écosystèmes terrestres sous l'impact de l'homme. C'est le processus de détérioration de ces écosystèmes qui peut être mesuré par une productivité réduite des plantes, des altérations indésirables de la biomasse et la diversité de la micro et macro faune et flore, en plus une détérioration accélérée des sols et des risques accrus par l'occupation humaine".

Glantz and Orlovsky (1983) : mentionnaient que la désertification est : "Un déclin continu de la destruction de la productivité biologique des terres semi-arides provoqué par des stress d'origine humaine et parfois en conjonction avec des événements naturels extrêmes. Si ces stress, se poursuivent ou ne sont pas maîtrisés, peuvent conduire à une dégradation écologique et par conséquent une désertification".

Rozanov (1982): basait sur son expérience de lutte contre la désertification dans la Russie et a donné la définition suivante : "Processus naturel ou induit par l'homme qui provoque des changements irréversibles du sol et de la végétation des zones arides dans le sens de l'aridisation et de la diminution de la productivité biologique et dans les cas extrêmes, peut conduire à la destruction totale du potentiel biologique et la transformation des terres en désert".

Fao/Unep (1984) : l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture et le programme d'environnement affilié aux nations unies ont également donné leurs visions concernant la définition de la désertification et ont proposé que la désertification est: "Une expression globale des processus économiques et sociaux ainsi que de ceux naturels ou induits qui détruisent l'équilibre du sol, de la végétation, de l'air et de l'eau dans les zones soumises à l'aridité édaphique et/ou climatique".

Paden (1988) , à son rôle proposait que la désertification est : "La détérioration des sols, la productivité considérablement réduite des plantes et le déclin de la diversité de la flore et du faune en raison des activités des hommes et du cheptels".

Kassas (1988) définissait la désertification comme étant : "Un processus de dégradation écologique par lequel les terres économiquement bio-productives deviennent moins productives. Dans des cas extrêmes, la scène finale est un paysage désertique incapable de subvenir aux besoins des communautés qui en dépendaient autrefois".

En fin et d'après la définition de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (UN 1992) à Rio et qu'est adopté par la communauté scientifique jusqu'au nos jour : "La désertification est la dégradation des sols dans les zones arides, semi-arides et sèches subhumides par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaine".

2. Formes de dégradation des sols

En général, la désertification se manifeste par la détérioration des sols, qui peut prendre diverses formes. Ils peuvent être chimiques, physiques ou biologiques.

2.1. Dégradation chimique

En raison du fait que la majorité de la matière organique est combinée avec les particules fines transportées par le vent, cette dégradation se distingue par une diminution de la fertilité en raison d'un manque d'éléments nutritifs tels que le potassium, le calcium et le

phosphore, et une faible teneur en matière organique. Elle est également due à la culture du sol (Niang 2006; Zhao et al. 2006).

2.1. Dégradation physique

Ce type de dégradation est principalement causé par l'érosion hydrique et éolienne (figure 1), ce qui entraîne des déficits quantitatifs et qualitatifs des substances qui composent le sol, ce qui le rend peu productif. La compaction des sols est un autre type de dégradation physique ; c'est-à-dire la diminution dans sa perméabilité, elle affecte également la colonisation du sol par les racines des plantes, réduisant leur résistance au ruissèlement et leur capacité à extraire les éléments minéraux nécessaires à la croissance des végétaux. La compaction a un impact principal sur les sols limoneux et argileux. Le surpâturage et l'intensification de la culture mécanisée provoquent cette forme de dégradation (Jouve et al. 2002).

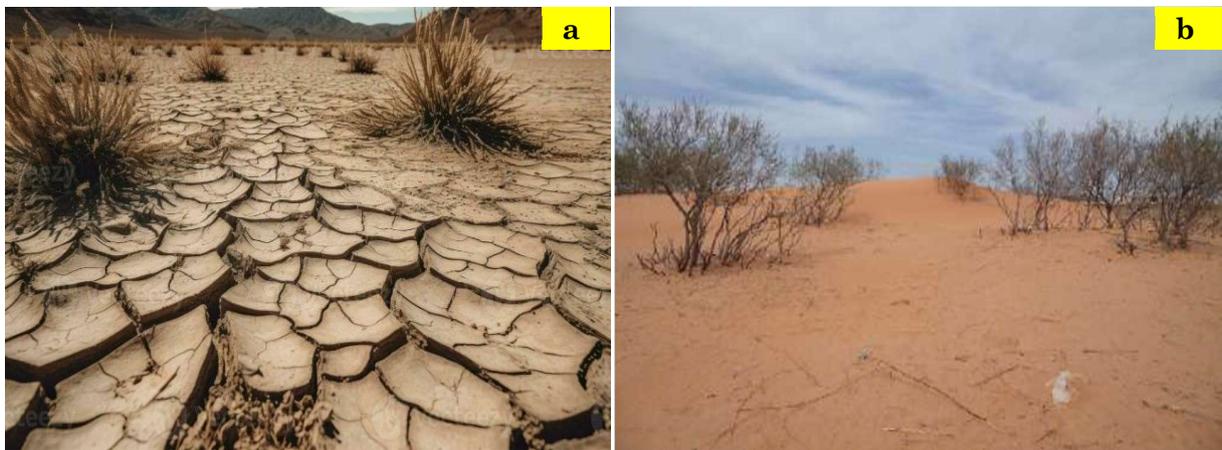


Figure 1: Érosion : a) hydrique (Djbel El Melh, 2020) et b) éolienne (Ain dheb, 2023)

2.2. Dégradation biologique

La matière organique conserve la fertilité du sol et lui donne une certaine résistance à la dégradation physique. Elle participe également à la capacité d'échange, cationique, c'est-à-dire sa capacité à fixer les nutriments, à l'alimentation de la microfaune du sol, à la réduction de l'acidification et à la fertilisation des cultures par sa minéralisation (Jouve et al. 2002). La diminution du taux de matière organique provoque l'appauvrissement du sol et la baisse des activités de la microfaune.

3. Principales causes de désertification

3.1. Facteurs naturels

3.1.1. La sécheresses

La sécheresse récurrente est un effet temporaire provoqué par les changements climatiques. La diminution de la disponibilité en eau a toujours un impact, au moins partiellement, sur les activités des régions touchées par la sécheresse. La pluie ou d'autres

sources d'eau donnent au sol l'humidité nécessaire à la croissance de la couverture végétale. Presque toujours, la dégradation de la couverture végétale est accompagnée d'un ensablement des zones voisines, des infrastructures, des terres agricoles et parfois des villes, ce qui accélère le processus de désertification (Dupuy et al. 2002 ; Eldridge and Leys 2003).

L'intensification des phénomènes de sécheresse n'est pas à l'origine de la désertification, mais elle constitue un facteur important d'aggravation de l'impact anthropique sur la dégradation des terres en zones sèches (Thomas 1995).

3.1.2. Dégradation des terres arides

En règle générale, la dégradation commence par une détérioration de la végétation, une modification de la structure floristique, ce qui entraîne la rareté et la disparition des espèces les plus courantes. Après cela, ou simultanément, la couverture végétale s'éclaircit et la production de biomasse diminue. La végétation perd de plus en plus de capacités de reproduction et de régénération. L'action mécanique des précipitations modifie l'état de surface du sol (érosion), qui est moins protégé par la couverture végétale et par conséquent la perte progressive des matières organiques. Les effets sur la fertilité comprennent une diminution de la capacité d'échange et des ressources disponibles, ainsi qu'une augmentation du ruissellement, une diminution de la réserve d'eau disponible pour les plantes, une modification du régime hydrique et des échanges avec l'atmosphère et une aridification (Benguerai 2011).

3.1.3. La salinisation

La salinisation est la conséquence de l'évaporation et de la remontée par capillarité des eaux de la nappe phréatique, ainsi que de la présence d'eaux souterraines rendues de plus en plus salines faute d'un drainage adéquat. Elle fait également référence à la pénétration des sels dans les eaux d'irrigation, à l'insuffisance de la quantité d'eau nécessaire à l'évacuation de ces sels accumulés dans les zones radiculaires, au fait que les eaux d'irrigation sont appliquées de manière irrationnelle et que les exploitants utilisent des méthodes de culture inappropriées (Mabbutt and Floret 1983).

En effet, après une agriculture irriguée, une accumulation importante de sels provoque une salinisation définitive des terres, ce qui entraîne une concentration élevée, atteignant des niveaux de saturation insupportables pour les végétaux. Cela entraîne une dénudation du sol et son appauvrissement en matière organique (Benguerai 2011).

3.2. Facteurs anthropiques

3.2.1. Le surpâturage

Le surpâturage par le cheptel peut-être l'un des éléments les plus importants qui dégradent les prairies. Cela se produit suite à une augmentation du nombre et/ou de la durée de présence du troupeau dans une parcelle. En relation avec la croissance

démographique et les effets de la sédentarisation, la charge animale provoque un surpâturage, ce qui détériore les parcours (Cornet 2001).

Le surpâturage modifie également la couverture végétale. La production végétale consommable diminue, le nombre d'espèces d'intérêt pastoral diminue et, parfois, l'expansion des espèces non palatables (non appréciées par le bétail).

Le grave inconvénient du surpâturage, s'il est effectué au moment de la pousse annuelle des espèces, est qu'il empêche les espèces d'achever leur cycle, de produire des graines et de renouveler le stock de graines de ces parcours (Nedjraoui and Bédrani 2008).

Le surpâturage est considéré comme destructeur pour les communautés végétales et les sols. Il réduit la canopée et expose le sol à l'action directe des vents et des pluies, provoque la perte de carbone organique et d'azote, l'épuisement des propriétés biologiques du sol, la destruction de la structure de la couche arable et la compaction du sol en raison du piétinement. Ces processus augmentent en retour l'encroûtement, diminuent l'infiltration et réduisent la rugosité de la surface (Li et al. 2000; Yong-Zhong et al. 2005).

En ce qui concerne la situation des parcours steppiques en Algérie et selon Benguerai (2011), en 1968, la densité de la surface des parcours steppiques relative au nombre équivalent-ovins était de 1.9 équivalent-ovins/ha alors que en 1996 ce taux devient plus petit par rapport à 1968 et il atteint la valeur de 0.78 équivalent-ovins/ha. Une autre étude menée par Houérou (1985) a dévoilé que ces parcours sont fortement dégradés et que la production fourragère est considérablement diminuée et atteint 1/3 de ce qu'elle était en 1968.

3.2.2. Mise en culture des terres

L'augmentation de la population et de ses besoins croissants oblige à étendre les zones de culture sur des sols peu propices à l'agriculture avec une faible réserve d'eau, ce qui est un handicap considérable pour des régions où les précipitations sont très insuffisantes pour assurer la croissance des plantes, et d'autre part pour des zones qui étaient traditionnellement réservées à d'autres activités (Franchis 2003; Ghazi 2006).

Souvent, les pratiques culturelles inadaptées provoquent l'érosion du sol, en particulier par des labours dans le sens de la pente. Les sillons sinueux sont des canaux privilégiés où l'érosion intense est causée par la rapidité d'écoulement des eaux. D'autres pratiques culturelles, telles que la culture de la jachère et l'introduction de la charrue à disques, contribuent également à l'érosion du sol (Ghazi 2006).

À la suite des défrichements sur des sols fragiles situés en dehors des terres fertiles des fonds d'oueds ou de daya, les surfaces irriguées s'élèvent à 1.41 million d'hectares en 2021 avec une hausse de 780000 hectares sur les 10 dernières années en Algérie (MAPM 2023).

4. États de la désertification en Algérie

L'Algérie se distingue par trois écosystèmes différents :

- un écosystème montagneux se trouvant dans la zone tellienne.
- un écosystème steppique entre 400 mm au Nord et 100 mm au Sud, s'étend sur 20 millions d'hectares.
- un écosystème saharien, occupant plus de 80 % de la superficie totale et qui est partagé par de grandes unités morphologiques : les hamadas (plateaux rocheux), les ergs sableux, et le Hoggar.

Des grandes étendues sont touchées par le processus de désertification, cela est clairement prononcé lorsque le climat est aride ou saharien. En 2004, un document ministériel réalisé par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, annonçait que l'Algérie est actuellement confrontée à des problèmes environnementaux importants liés à la désertification. Ce document a signalé que : plus de 12 millions d'hectares sont soumis à l'érosion hydrique, qui entraîne des pertes importantes en sol et par conséquent l'envasement des barrages. En plus, 20 millions d'hectares dans les régions steppiques sont marquées par sa vulnérabilité à la désertification (pluie torrentielle et ensablement) et donc glissements de terrain (16,6 m³ érodés/ an) et perte des éléments fins de sol (120 millions de tonnes de sédiments par An).

L'érosion hydrique menace presque 10 millions d'hectares de surface totale. Les conditions de vie précaires des habitants des zones rurales les incitent à surexploiter les ressources naturelles pour répondre à leurs besoins croissants, ce qui aggrave davantage la dégradation des milieux environnants. La perte des ressources en eau est due : a) à un manque d'alimentation des nappes phréatiques, b) à une diminution de l'infiltration, c) à l'envasement des barrages, dont certains ont atteint un taux de sédimentation proche de 100 % (Ghazi 2006).

En ce qui concerne l'érosion éolienne (figure 2), les résultats publiés par le Centre national des techniques spatiale (CNTS) en 2004, montrent que 600000 hectares des zones steppiques ont connu une désertification préoccupante sans aucune possibilité de remonté biologique et plus de 6 millions d'hectares sont considérés comme étant des zones vulnérables à la désertification. Le CNTS a également enregistré que, suite aux pratiques culturales inadaptées, près de 1.2 millions d'hectares de terre labourée sont annuellement soumises à la désertification.



Figure 2: Exemple d'avancement du désert vers le nord, route communale Tousmouline-Meharra dans la wilaya d'Elbayedh (HCDS, 2013)

Une autre étude menée par [Salamani et al. \(2013\)](#) utilisant la démarche MEDALUS dédiée aux régions méditerranéennes, a mentionné que 60% de la surface du nord de l'Algérie a connu une désertification inquiétante (très forte), 25% de type forte et le reste se bascule entre sensibilité moyenne et sensibilité faible à la désertification.

Le patrimoine forestier représente 4.1 millions hectares (forêt, maquis et reboisement) et équivalent à près de 16.7% de la superficie du nord de l'Algérie ([APS 2023](#)).

La Direction Générale des Forêts a déclaré que les reboisements ont toujours joué un rôle "déterminant" dans les programmes d'amélioration du patrimoine et de protection des terres, et le nombre de plantations effectuées depuis 1962 s'élève à plus de 1 million d'hectare, dont 800 000 hectares au titre du plan national de reboisement de 2000 à 2016 dans toutes les catégories, avec 60 % de plantation forestière, 36 % de plantation fruitière et 4 % de plantation pastorale ([APS 2023](#)).

Malgré ces travaux fournis par l'état algérien dans la réhabilitation et le reboisement de ces forêts ; ces efforts n'ont pas suffi. [Benguerai \(2011\)](#) souligne que le taux de reboisement nécessaire pour protéger un barrage contre l'envasement est de 25 %, alors que la surface reboisée ne représente que 10 % de la surface totale des bassins versants.

En ce qui concerne le milieu steppique, les écosystèmes pastoraux dans cette région du pays ont subi une détérioration décrite comme persistante et continue. En outre, malgré la variété et la richesse du couvert végétale pastorale, il est soumis à une exploitation de type "minier" à cause de la sécheresse cyclique et le surpâturage. À moyen terme, si cette situation persiste, il disparaîtra complètement.

Avec 3 millions d'ha, l'alfa reste la végétation la plus dominante avec *l'armoise blanche* (4 million d'ha) du patrimoine végétal pastorale, en plus de ceux-ci on trouve *le pistachier*, *le sparte* ainsi que et *le jujubier* au niveau des dayas.

Au stade de la relique, on trouve la flore du Sahara, *l'Acacia radiana*, *le Cupressus dupreziana* (cyprès du Tassili) et la flore herbacée qui comprend plus de 500 espèces de plantes vasculaires et plus de 700 espèces de cryptogames.

Le patrimoine génétique de la faune domestique se distingue principalement par son adaptation aux conditions climatiques du pays, en particulier pour le cheptel ovin (Ghazi 2006).

5. Efforts de l'Algérie dans la lutte contre la désertification

Dès les premières années de son indépendance, l'Algérie met en place un programme ambitieux pour lutter contre la désertification. Ce programme comprend :

- "le plan de Défense et Restauration des Sols (DRS)" entamer juste après l'indépendance, avait pour objectif de freiner l'érosion et augmenter les revenus des riverains, à travers la plantation d'espèces arboricoles (Louassa 2010).
- "les chantiers de reboisement populaires (CPR)" réalisés entre 1962 et 1969 dans le cadre de l'amélioration et de l'aménagement des parcours et de la lutte contre l'érosion éolienne, 99.000 hectares de plantations forestières ont été établies (Nedjraoui and Bédrani 2008).
- dans les années 1970, un projet nommé "barrage vert" a été mis en place pour empêcher l'avancement du désert en établissant une bande forestière de près de 1000 km de long entre les frontières du Maroc et de la Tunisie, sur 20 km de large, occupant ainsi, une surface de 3 millions d'hectares (Bensaïd 1995). Le but de sa réalisation est de freiner le processus de désertification et restaurer l'équilibre écologique. À l'époque, la désertification était considérée comme une "avancée des déserts". Le "barrage vert" est une erreur technique très coûteuse car il est très difficile de réussir des plantations entre les isohyètes de 200 et 350 mm et à les cultiver sur des sols souvent inappropriés. De plus, le choix porté sur l'espèce : "Pin d'Alep", qui est très vulnérable aux chenilles processionnaires (Dia and Niang 2010).

La négligence des réalités socio-économiques de la région était l'un des facteurs cruciaux qui a conduit à la dégradation des sols et des parcours. Le taux de réussite annoncé de ce projet de plantation est de l'ordre de 42% qui varie d'une région à une autre (DGF 2004).

- au cours de cette période, "la Révolution Agraire et le Code Pastoral" sont également promulgués. Ces principaux buts sont : a) amélioration de la gestion des steppes par la création des mises en défens, b) intégration des petits éleveurs dans des coopératives pastorales, c) plafonner les cheptels des gros éleveurs, d) protection des zones pastorales de toute action liée aux labours, e) interdiction de colportage et d'arrachage des ligneux.

Des conflits d'intérêt ont surgi lors de l'application de ce code pastoral, ce qui a empêché ses dispositions d'être adoptées (Nedjraoui and Bédrani 2008).

- "le Haut-Commissariat au Développement de la Steppe" (HCDS), une institution publique sous la tutelle du Ministère de l'agriculture, a été fondée en 1983 suite à l'adoption du dossier steppe. Cette institution est chargée de mettre en place une politique nationale de développement durable dans les régions steppiques par la prise en considération de tous les aspects économiques et sociaux. Bien que son texte de création inclus un article d'encouragement du développement globale et durable de la steppe, mais en réalité ses fonctions sont limitées dans la restauration des parcours dégradés par la plantation d'*Atriplex* (figure 3), la mise en défens, la multiplication des points d'eau, le développement et l'amélioration des capacités d'abreuvement du cheptel, l'augmentation de la production de fourrage grâce à la mise en valeur des eaux superficielles et la création des zones pilotes d'épandage(Nedjraoui and Bédrani 2008).



Figure 3 : Action de lutte contre la désertification (Nedjraoui and Bédrani 2008)

À cet effet, 15% de la surface totale de la steppe a été protégée par la mise en défens en collaboration avec les conservations des Forêts. 400 000 ha ont été restaurés par la plantation pastorale. La réalisation et la réhabilitation de plus de 1600 Ceds (petites digues) de dérivation qui ont permis de développer les cultures sur plus de 440 000 ha. La réalisation et la réhabilitation de plus de 9 000 points d'eau (MADR 2023).

Malgré les efforts déployés par cette institution, l'absence d'une vision cohérente et prospective a laissé ces efforts inefficaces et sans aucun impact, ce qui a été traduit en réalité par la détérioration du milieu steppique et par conséquent l'augmentation de la désertification (Nedjraoui and Bédrani 2008).

- "le programme national de développement agricole (PNDA)", qui a débuté en 2000 et visait à remplacer la jachère et la céréaliculture par des cultures à haute valeur ajoutée, ainsi que "le programme national de mise en valeur des terres par la

concession", qui avait pour objectif de créer des exploitations agricoles sur des terres steppiques marginales après les avoir aménagées. Grâce aux soutiens publics, ces deux programmes ont réussi à augmenter la superficie irriguée, mais ils ont commis beaucoup d'erreurs techniques et économiques. Parmi ces erreurs : les agriculteurs qui ont bénéficié des terres exploitées ont souvent été contraintes de cultiver des arbres fruitiers (Alors que la majorité entre eux sont des anciens nomades), ainsi aucun accompagnement et motivation n'ont été données aux agriculteurs pour leur permettre de produire des fourrages qui aurai pu réduire la pression sur les parcours steppiques. De plus, la plupart des bénéficiaires du PNDA ont préféré le maraîchage (Nedjraoui and Bédrani 2008).

6. Divisions territoriales

Selon le (JO 2010), portant approbation du Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT), une adaptation est faite pour répondre aux exigences économiques et sociales imposées par des transitions à l'échelle nationale (chaumage, énergie, sources naturelles, population...) et internationale (changement climatique, énergie renouvelables, exploitation des énergies, conflits, ...); la mise en attractivité des territoires nationaux avec la réalisation des équipements et la disponibilité des services par la diversification de l'offre infrastructurelle naturelles.

En vertu de cette loi, 9 espaces de programmation territoriales ont été créé à la base du voisinage, cohérence socio-économique et naturelle des unités locales. Son objectif est de "Développer une économie territoriale mobilisant les capacités des espaces et les inscrivant dans des chaînes de croissance".

Les 9 espaces de programmation territoriales sont :

➤ Niveau du TELL

"Nord-Centre" : Alger, Boumerdès, Blida, Médéa, Tipaza, Bouira, Tizi Ouzou, Chlef, Béjaïa et Ain Defla.

"Nord-Est" : Annaba, Skikda , Constantine, , Souk Ahras ,Jijel, Mila, El Tarf et Guelma.

"Nord-Ouest" : Oran, Mostaganem, Tlemcen, Relizane, Ain Témouchent, Sidi Bel Abbès et Mascara.

➤ Niveau des Hauts Plateaux

"Hauts Plateaux-Centre" (HPC) : Djelfa, M'Sila et Laghouat.

"Hauts Plateaux-Est" (HPE) : Sétif, Bordj Bou Arréridj, Khenchela, Batna, Oum El Bouaghi, Tébessa.

"Hauts Plateaux-Ouest" (HPO) : Saïda, Tiaret, Naâma, Tissemsilt et El Bayadh.

➤ Niveau du Sud

"Sud-Ouest" : Béchar, Tindouf, Adrar.

"Sud-Est" : Ghardaïa, Biskra, Ouargla , El oued

"Grand-Sud" : Tamanrasset, Illizi.

Cependant "l'Arrêté du 21 Rajab 1444 correspondant au 12 février 2023 relatif au comité scientifique et aux comités locaux de l'organe de coordination de la lutte contre la désertification et de la relance du barrage vert" (JO 2023), désigne les wilayas concernées par la lutte contre la désertification qui sont :

- Adrar, Béchar, Tamenghasset, Ouargla, Illizi, Tindouf, Ghardaïa, Timimoun, Bordj Badji Mokhtar, Ouled Djellal, Béni Abbès, In Salah, El Oued, In Guezzam, Touggourt, Djanet, El Meghaier, El Meniaâ, Tlemcen, Oum El Bouaghi , Tiaret, Tissemsilt, Souk Ahras, Saïda et Sidi Bel Abbès.

Les wilayas concernées par la lutte contre la désertification et la relance du barrage vert sont :

- Laghouat, Batna, Biskra, Bouira, Tébessa, Djelfa, Sétif, Médéa, M'Sila, EI Bayadh, Bordj Bou Arréridj, Naâma et Khenchela.

7. Position du problème

Dans un cadre de synergie des protocoles environnementaux, la communauté scientifique est également invitée à proposer des solutions pour un développement durable. À cet effet, les recherches au niveau des projets régionaux sont axées sur la démonstration de l'interaction des différents paramètres qui contribuent au problème de désertification, par le développement d'une stratégie scientifique qui permet de mettre en synergie tous les résultats basés sur des données à un intervalle de temps qui n'est pas court et d'établir des tendances des systèmes influencés par la désertification, à fin d'aider à la prise de décision politique.

Dans les deux dernières décennies, l'énorme progrès dans le domaine de technologies et de solutions numériques ont permis l'intégration de nouvelles techniques de suivi des écosystèmes naturels à l'aide de l'imagerie satellitaires et les systèmes d'information géographique (SIG). Ce progrès permet de compléter les observations sur le terrain et de mener des études diachroniques. Les SIG et la télédétection ont permis d'évaluer la désertification sur de grandes étendues et de mieux analyser les mécanismes qui conduisent au processus.

Les hauts plateaux occidentaux (HPO) sont la région la plus vulnérable à la désertification et la dégradation des terres (DDT) sur tout le territoire national. L'ensemble de la communauté scientifique et les principaux acteurs en environnement, écologie, et

agricultures annoncent que cette région a connu une détérioration rapide du climat et des sols, en plus d'une terrible pression et surexploitation des ressources naturelles.

Dans ce contexte, cette thèse présente une étude cartographique et statistique du HPO à travers laquelle, on a déterminé deux objectifs principaux :

- suivi et identification des zones vulnérable à la désertification en particulier l'ensablement du HPO.
- suivi et identification des zones vulnérable à la désertification et la dégradation des terres (DDT) du HPO.

8. Présentation du HPO

Les hauts plateaux occidentaux est une région qui occupe approximativement 63 000 km². Ils sont limités par les frontières marocaines à l'ouest et les hauts plateaux centrales (HPC) au centre du pays (figure 4) et entre les séries de l'Atlas tellien au nord et les séries de l'Atlas Saharien au sud (Bouznad et al. 2020; Kadri and Nasrallah 2023). Plusieurs wilayas font partie du HPO. Ainsi la wilaya de Saïda représente 10% de la surface du HPO, la wilaya de Tiaret 32%, la wilaya de Tissemsilt 5%, le nord de la wilaya d'El Bayedh occupe environ 34% alors le nord de Naâma représente 19%) (Kadri and Nasrallah 2023). Le climat dans la région du HPO est considéré comme continentale (Liu and Xue 2020). L'ensemble de la région est classé dans les étages arides et semi-arides, sauf que la sous-région nord-est fait partie du climat subhumide.

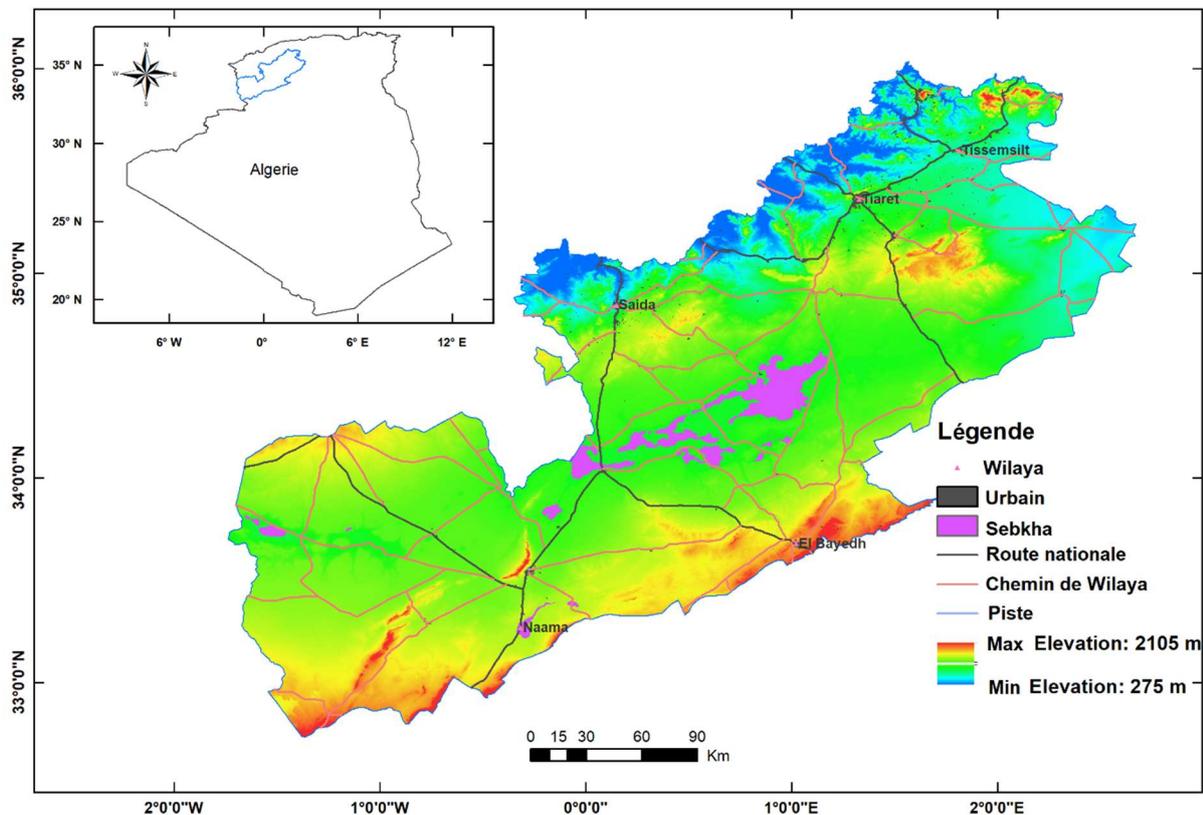


Figure 4: Limites et position de la zone d'étude (HPO) d'après (SNAT)

La température basse moyenne enregistrée dans le mois de janvier (0°C à El bayedh, 0°C à Naâma, 0°C à Saïda, 0°C à Tiaret et 5°C à Tissemsilt) tandis que le mois de juillet enregistre la température moyenne la plus élevée (El bayedh: 36°C, Naâma:36°C, Saïda: 34°C, Tiaret 36°C et Tissemsilt: 32°C)(ONM 2021).

La zone d'étude est caractérisée par des précipitations annuelles moyennes faibles au sud et relativement modérées au nord et au nord-est (El bayedh: 289 mm, Naâma: 224 mm, Saïda: 307 mm, Tiaret : 390 mm et Tissemsilt: 367 mm)(ONM 2021).

En ce qui concerne les caractéristique du vent dans la région, une étude diachronique menée par Boucheffa (2017); Hammouche (1990) ; Louassa (2010); Merzouk (1999) à permet d'identifier la variation moyenne temporelle du module de la vitesse du vent et sa direction dans cette zone, le tableau 1 résume les principaux résultats obtenus:

Tableau 1 : Module de la vitesse et la direction des vents dans la région du HPO

Région	Vitesse du vent (m/s)	Direction du vent
Tiaret	4.7	Ouest
Saïda	4.6	Nord-Ouest
Tissemsilt	4.5	Ouest
Naâma	5	Sud
El bayedh	5.5	Nord-Est

Cette région du pays est caractérisée aussi par l'existence de deux grandes dépressions fermées occupées par: a) une variable étendue d'eau salée peu profonde et impermanente nommées "Chott Echergui" avec une surface qui bascule entre 1600 et 2000 km² et qui se trouve dans le centre du HPO et b) une petite étendue qu'est "Chott Elgharbi" qui se trouve dans l'extrême ouest prêt des frontières marocaines (Kadri and Nasrallah 2023).

La quasi-totalité du HPO est constituée de terres steppiques, où 12 % de la population vit de l'agriculture et du pâturage, et 5 % est nomade (ONS 2021).

9. HPO : Atouts, handicaps et enjeux

Le développement durable de l'espace HPO, constitue un atout majeur pour une meilleure structuration du territoire national, dans la direction d'un développement territorial raisonnable, équitable, solidaire et durable.

C'est un espace vaste tampon entre le Nord-est et le Sud-Ouest, très peu peuplé, disposant de ressources et potentialités naturelles (substances utiles, potentialités touristiques, etc.) et autres atouts non ou faiblement exploités. Cet espace est actuellement sous développé et menacé dans sa durabilité, et pourrait constituer une profondeur stratégique au redéploiement des activités et des populations du Nord-Ouest qui est un espace surpeuplé, saturé, soumis à l'épuisement de ses ressources naturelles et aux risques majeurs naturels et industriels.

Cette éventualité reste dans le domaine du possible, à condition que l'espace HPO :

- valorise ses atouts et potentialités dans le respect de l'environnement.
- surmonte ses contraintes naturelles et autres handicaps socioéconomiques.
- se dote en équipements structurants à même de le rendre attractif.
- mette en place les dispositifs de soutien capables d'insuffler un développement économique allant dans le sens de la pluriactivité.
- concrétise les enjeux consacrés par l'impératif Hauts Plateaux par l'insertion du HPO dans un processus de développement durable à échelle nationale.

9.1. Les Atouts

L'évaluation raisonnée des ressources naturelles et les potentialités patrimoniales de l'espace HPO constituent le principal atout sur lequel devra reposer le développement futur de cet espace. Ces ressources et ces potentialités sont, pour l'essentiel, rappelées ci-après :

- l'immensité du territoire, la faible densité de la population, et la position géographique d'espace tampon entre le Nord-est et le Sud-ouest, font de l'espace HPO un territoire favorable au décongestionnement des espaces littoraux d'une manière générale et de l'espace Sud-ouest d'une manière particulière.
- les plaines intérieures de la partie nord : plaines du Sersou pour Tiaret et Tissemsilt, plaines de Maalif et Skhouna pour Saïda, etc., favorables à la création de périmètres d'irrigation et à l'intensification céréalière (blé dur) et des légumes secs (lentilles).
- les zones de montagne de la chaîne tellienne (Tissemsilt) favorables au développement de l'arboriculture en sec et l'arboriculture rustique.
- un gisement d'énergie renouvelable, appréciable, mais non mobilisé : l'énergie solaire et l'énergie éolienne.
- un sous-sol riche en substances utiles à différents usages, mais peu exploité.
- un patrimoine en cheptel ovin important et de qualité (MATET 2007).

9.2. Les handicaps et les contraintes

Parmi les principaux handicaps d'ordre physique, on cite notamment :

- les conditions climatiques difficiles : au-delà de l'irrégularité et la faiblesse des précipitations, des gelées hivernales, de l'enneigement et des fortes chaleurs estivales, les conditions climatiques difficiles se manifestent par l'aridité, dont l'intensité s'accroît du nord vers le sud. Par ailleurs, les modèles climatiques, établis par le GIEC pour l'horizon 2100, pronostiquent à l'échelle de l'espace HPO une augmentation sensible de la température (de 3 à 5°) et une légère diminution des précipitations, ce qui ne ferait qu'accroître le phénomène d'aridité et par voie de conséquence le risque de désertification (MATET 2007).

- la configuration du relief : pour la partie centrale et sud des HPO, la configuration du relief est peu favorable à la formation d'un réseau hydrographique propice à la réalisation de grands ouvrages hydrauliques.
- la configuration du réseau hydrographique : peu hiérarchisé et souvent colmaté dans le centre et sud de l'espace HPO, le réseau hydrographique cause, à la moindre averse, d'importants dégâts suite aux inondations de certaines villes ou quartiers (El Bayadh, Ain Sefra, etc.).
- la faiblesse des richesses en eau superficielle : l'insuffisance des ressources en eau de surface est la conséquence des effets superposés de la configuration du réseau hydrographique et de la rareté des précipitations (ce phénomène touche presque toutes les régions du HPO).
- la disproportion dans la distribution des ressources en eau souterraine entre les différentes composantes territoriales du HPO : les zones les plus peuplées et disposant du meilleur potentiel agricole (partie nord) sont les moins loties en eau. Cette conséquence est due à la demande croissante en eau que la région a connue dans les années 70 et 80 afin de l'exploiter pour l'irrigation des cultures et la consommation humaine. Les zones les plus affectée par ce phénomène sont Saïda, Tiaret et Tissemsilt.
- la fragilité des sols et leur grande sensibilité à l'érosion : la traduction de cette contrainte se manifeste par :
 - a) des terres à forte valeur agricole limitée aux plaines Nord du HPO (Sersou, Maalif, Skhouna... etc.) et à quelques dayas.
 - b) une érosion hydrique intense sur les reliefs du Nord (Monts de Tissemsilt, de Tiaret et de Saïda).
 - c) une érosion éolienne intense au niveau des terres steppiques du centre et du sud de l'espace HPO (Naâma, El bayedh et Tiaret).

Les effets de ces handicaps d'ordre physique ou naturel sont accentués par les pressions anthropiques exercées sur le milieu naturel. Parmi ces dernières on cite plus particulièrement :

- le surpâturage exercé par un cheptel sans cesse croissant conduit en extensif sur des parcours aux ressources fourragères de plus en plus réduites (Naâma, El bayedh, Tiaret et d'une façon un petit peu légère la wilaya de Saïda).
- la complexité des problèmes liés au foncier et à l'usage des parcours steppiques.
- les défrichements des parcours steppiques, au profit d'une mise en valeur des terres pour une agriculture souvent aléatoire.
- les défrichements des forêts par des coupes illicites à usage de charbon de bois ou à l'usage de la production agricole (Tissemsilt, Tiaret et Saïda).
- la surexploitation de certaines nappes, suite à la demande en eau potable et agricole générée par le développement des activités économiques et la croissance démographique.

La conjugaison des handicaps physiques et des facteurs anthropiques, fait que l'espace HPO est soumis :

- à la dégradation et à l'amenuisement de ses ressources naturelles que sont : l'eau, les terres agricoles, les parcours steppiques, etc.
- à la déstructuration des systèmes pastoraux traditionnels et à la dévitalisation des espaces ruraux.
- au processus de désertification qui constitue le risque naturel majeur et l'on doit s'attendre à l'aggravation du phénomène avec les effets déjà perceptibles du changement climatique.

9.3. Enjeux

Parmi les enjeux majeurs rapportés par la ligne directrice du Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT 2030) dans sa section liée à la conservation des patrimoines territoriaux et développement durable ; est celle de la recherche et la consolidation de l'identité spatiale ou régionale. Le projet de territoire fourni par le ministère de l'aménagement et développement rurale (MADR 2023) correspond la région du HPO espère répondre à certaines questions connexes aux problématiques qui dépassent le cadre de la simple wilaya, il s'agit notamment de l'ancrage territorial, de la cohésion et la cohérence territoriales, mais également aux problématiques liées à la gestion des ressources naturelles et au changement climatique dont les effets se font déjà sentir sur cet espace fragilisé par l'action de l'homme. La ressource en eau, la régénération de la steppe, la préservation de l'environnement sont sollicités par une charge anthropique de plus en plus insoutenable, d'où la nécessaire de diversification des activités productives et de services (MATET 2007).

Au vu des facteurs contraignants qui sévissent sur l'espace HPO (aridité du climat, fragilité des sols, pressions sur les ressources naturelles, sous-développement économique, etc.) l'espace HPO est aujourd'hui confronté à la dégradation de son milieu naturel (rupture des équilibres écologiques, érosion des sols, amenuisement des ressources fourragères, etc.), au déclin de son économie traditionnelle (agropastoralisme) et à la rupture de son organisation sociale jadis bâtie sur le système tribal. De ce fait, cette ligne directrice "vers un territoire durable" revêt un caractère stratégique pour l'espace HPO (MATET 2007).

Dans sa partie liée à la durabilité du territoire, cette ligne directrice vient également de prédire les futurs scénarios que le HPO pourrait le confronter dans le moyen et long terme. Dans ce contexte nous citons l'essentiel apporté par ce document (SNAT 2030) (MATET 2007) :

9.3.1. Le changement climatique

Concernant l'évolution de la pluviométrie au cours du XXIème, les experts du Groupe International d'Études sur le Climat (GEIC 1988) ont bâti plusieurs modèles d'évolution

de la pluviométrie à l'horizon 2100. Les deux modèles les plus utilisés par les experts (appelés A2 et B2) prédisent, dans les deux régions auxquelles appartient la zone des Hauts-Plateaux de l'Ouest, les évolutions suivantes :

- dans la partie nord du HPO (région méditerranéenne) les modèles prévoient une diminution des précipitations, principalement des précipitations d'été (juin-juillet-août), qui sont faibles en moyenne mais dont l'effet sera important sur les températures.
- dans la partie sud du HPO (région steppique et saharienne) : la situation est ici plus ambiguë, la région saharienne dans son ensemble devant recevoir davantage de précipitations au cours du XXIème siècle que par le passé excepté pour sa frange nord (qui correspond au sud du HPO).

9.3.2. Évolution de la température au cours du XXIème siècle selon le GIEC

Pour l'espace HPO, les deux modèles les plus commentés du GIEC (A2 et B2) pronostiquent une augmentation des températures, entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100, de 4 à 5° (modèle A2), ou de 3 à 4° (modèle B2). La tendance pour le HPO serait une aridité croissante à moyen terme et un risque élevé de désertification sur le long terme : les températures ont augmenté sur la période 1880-2010. Les précipitations ont décliné depuis 30 ans et leur variabilité a augmenté. Cette tendance est de plus en plus vraisemblable à l'horizon 2050 ([Platts et al. 2015](#)).

L'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes (tempêtes, tornades, etc.) devrait s'accroître à cet horizon.

Il faut se préparer à un appauvrissement des parcours en général et de la steppe en particulier, avec une lente remontée des espèces et des faciès présahariens. L'urgence des mesures d'aménagement des parcours et d'allègement de la charge pastorale, n'en est que plus évidente, comme le soulignaient récemment plusieurs chercheurs dans la revue *Sécheresse* ([Aïdoud et al. 2006](#)).

9.3.3. Les impacts prévisibles

- impacts sur les ressources en eau : Les différentes projections montrent qu'il y aura une réduction du ruissellement et des infiltrations avec pour conséquence la réduction des approvisionnements des barrages et du régime des oueds plus secs d'où une diminution de la disponibilité en eau de surface et souterraine, cela va contribuer à aggraver la pénurie en eau et la dégradation de sa qualité.
- impacts sur l'agriculture : il y aurait une modification du calendrier agricole traditionnel et le raccourcissement du cycle végétatif ainsi qu'une diminution de la production agricole moyenne, en particulier les cultures sèches et certaines cultures consommatrices d'eau.
- impacts sur les forêts : une dégradation et une disparition de certaines espèces végétales ainsi qu'une diminution de la biodiversité du fait du stress climatique plus important et des vagues de chaleur et de sécheresse de plus en plus fréquentes.

- la diversité biologique : durant ces dernières décennies, les remontées biologiques de la végétation dans le nord se raréfient suite aux sécheresses cycliques et pressions humaines.
- impacts sur les sols : une aggravation de l'érosion et de la salinité des sols due à une évaporation plus forte et à un espacement plus grand entre les périodes pluvieuses et les périodes de sécheresses.
- impacts sur la steppe : Un déplacement vers le nord de la zone aride et les désertifications dues au fait qu'une hausse de température de 1 degré équivaut à un déplacement climatique de 100 km vers le nord.

Les tendances sur le long et moyen terme sont donc inquiétantes car elles conduisent à une accélération de la désertification, voire même à une désertisation, c'est à dire à l'abandon par l'homme, de ces territoires. Il reste à souhaiter que les diverses mesures d'atténuation des causes des changements climatiques, notamment la réduction des gaz à effet de serre, finissent par porter leur fruit afin d'éviter la réalisation des scénarios les plus dangereux.

10. Outils de suivi et cartographie de la désertification

10.1. La stratégie FAO/UNEP

C'est une méthode qui apparait en 1984 et mise en exploitation par la FAO/UNEP (Fao/Unep 1984). Elle regroupe les informations homogènes récoltées du terrain ou par un outil de SIG et/ou télédétection (exemple : la couche du sol peut être représentée par la roche mère, la texture, la pente...) dans un seul indicateur puis manipuler ces indicateurs (exemple : climat, sol, végétation, pression anthropique,...) par une logique mathématique tel que: l'addition, la multiplication, moyenne géométrique, moyenne arithmétique dans un seul produit qu'est la carte de la désertification des terres (DDT).

Depuis son apparition, cette méthode a été largement utilisée par la communauté scientifique dans le domaine de la géomatique, l'environnement et l'écologie en raison de sa simplicité, et son efficacité mais la précision de ses résultats reste dépendante de la qualité des données entrantes et la manière dont on peut valider ces résultats.

L'une des stratégies (projets) la plus populaire issue de cette méthode est le projet MEDALUS qui est adapté aux zones méditerranéennes.

Cette méthode est caractérisée par un ensemble de concepts que nous décrivons comme suit :

10.1.1. Risque de désertification

C'est la vulnérabilité d'une zone à la désertification. Il convient de noter que les zones à risque élevé ne sont pas nécessairement des zones à statut de désertification sévère et vice versa. Le risque de désertification est évalué à travers l'analyse des facteurs physiques et humains d'une zone. Les facteurs sont : le climat, le sol, la végétation et la pression anthropique.

10.1.2. Statut de désertification

Le statut de la désertification est défini comme étant la situation dans : le passé, le présent, ou le future de l'état d'indicateur (s) de la désertification pour une zone, relativement à son état naturel. L'état doit donc être évalué par rapport à une estimation de l'état naturel de la zone.

10.1.3. Taux de désertification

Le taux de désertification est la mesure avec laquelle la désertification se propage ou s'intensifie dans une certaine zone ou région sur une période de temps définie. Cela peut être positif ou négatif. Un taux positif signifie que la désertification s'accroît alors qu'un taux négatif signifie qu'il y a une régression de la désertification.

Un taux est établi par comparaison de deux statuts différents, divisés par la période de temps. Le premier état peut être naturel ou non perturbé, mais il est souvent difficile à le reconstituer. Ainsi, idéalement, l'état de la désertification est comparé sur une période donnée afin d'en établir le taux.

10.1.4. Danger de la désertification

Représente la somme, le produit, la moyenne arithmétique ou la moyenne géométrique (dépend de la stratégie utilisée) de divers indicateurs d'état de désertification pour une zone. Il indique la menace réelle d'une zone en voie de désertification.

10.1.5. Classification de taux de danger de la désertification

Il n'y a pas un consensus concernant le nombre de classe de taux de danger de la désertification. Il peut varier d'une région à l'autre et d'une étude à autre et il dépend des données entrantes et les résultats souhaités.

Généralement son intervalle varie de la classe de type "légère" jusqu'à la classe de type "Sévère". Le nombre de classe peut varier de deux jusqu'à cinq classes (tableau 2). Dans le cas réel, là où il n'y pas une désertification de type danger ou menaçante ; le nombre de classe idéal est trois.

Tableau 2 : Échelles d'évaluation de taux de danger de la désertification

Évaluation	Cinq classes	Quatre classes	Trois classes	Deux classes
	Aucune	Aucune	Légère	Légère
	Légère	Légère	Moyenne	Sévère
	Moyenne	Moyenne	Sévère	
	Sévère	Sévère		
	E Sévère			

10.2. La stratégie Analyse-multicritère /Apprentissage-Automatique

C'est une méthode développée par [Kadri and Nasrallah \(2023\)](#), contrairement à la méthode FAO/UNEP ; dont on a décrit ses propriétés dans la section précédente ; cette méthode est focalisée sur le traitement direct des couches d'information issues du terrain, SIG et imagerie spatiale par l'application d'une méthode de l'analyse multicritère, représentée par la méthode AHP (analytical hierarchical process en anglais). Puis à partir de la carte de la désertification et de dégradation de la terre (DDT) obtenue ; on réalise un échantillonnage et à travers ce dernier, on établit une classification non supervisée représentée par l'analyse en composante principale (ACP) par laquelle on élimine les données spatialement corrélées.

L'obtention de l'ACP ne représente pas la dernière phase de cette méthode, car on réintègrera par la suite les coordonnées des vecteurs propres dominants dans un processus de classification non supervisée, appelé "Ward's agglomeration method" qui est une méthode d'apprentissage automatique (AA), et qui permet de discriminer et de reconstituer les classes de la désertification (DDT), et de produire un moyen de validation de carte obtenue par la technique AHP (la méthodologie sera expliquée en détail dans la partie III).

Le nombre de classe de la carte (DDT) réalisée est quatre, elle varie de la classe de type "Non affecté" jusqu'à la classe "Critique" passant par les classes "Potentiel" et "Fragile" respectivement.

10.3. La stratégie Apprentissage Automatique

C'est une méthode adoptée par [Feng et al. \(2022\)](#) qui a été appliquée dans la région chinoise de "Mu Us Sandy" et qui sert à réaliser la carte de la désertification (ensablement) à partir des données biophysiques (Albédo, TGSI, NDVI et Température de surface) issues de l'imagerie spatiale et technique d'apprentissage automatique (AA) à caractère supervisé. Comme toutes les méthodes d'apprentissages automatiques supervisées ; un échantillon d'apprentissage provenant du terrain est nécessaire pour réaliser ce type de traitement (la méthodologie sera expliquée en détail dans la partie II).

Le nombre de classe utilisé dans la carte d'ensablement établie par cette technique est de l'ordre de quatre " Faible", "Moyenne", "Sévère" et "Extrêmement Sévère (E Sévère)".

11. Géosciences et apprentissage automatique

L'intelligence artificielle a considérablement modifié de nombreux processus de travail, élargissant ainsi les notions antérieures de limites, de résultats, de prix et de taille. La "GeoAI" est un domaine multidisciplinaire qui englobe l'ingénierie, l'informatique, les statistiques et les sciences à référence spatiales. Parce que ce sujet se concentre sur des questions du monde réel, il a un impact significatif sur la société et l'économie ([Alastal and Shaqfa 2022](#)) . Le rapprochement de la géographie et de l'intelligence artificielle (AI en Anglais) s'effectue dans un contexte large qui intègre des questions fondamentales de théorie, d'épistémologie et de méthode scientifique, ce qui peut avoir des répercussions

considérables sur l'étude de la géographie. La "GeoAI", ou la combinaison de la géographie et de l'intelligence artificielle, offre des solutions uniques à une variété de problèmes liés au suivi intelligent des phénomènes environnementaux (ELISE 2023).

L'intelligence artificielle (AI) à caractère géo-spatiale, souvent connue sous le nom de "GeoAI", a récemment suscité beaucoup d'intérêt. La "GéoAI", qui est un domaine en pleine évolution visant à organiser la façon dont nous pensons et abordons le traitement et l'analyse des grandes données spatiales. Elle peut être décrite comme une discipline scientifique émergente qui combine des innovations en science spatiale, des méthodes d'AI telles que l'apprentissage automatique (AA) (Machine Learning (ML) en anglais) et l'apprentissage profond (AP) (Deep Learning en anglais (DL)). L'exploration de données et l'informatique à haute performance. "GeoAI" est l'utilisation de méthodes d'AI, y compris la AA et la AP, pour produire des connaissances par l'analyse de données et d'images spatiales (ELISE 2023). La disponibilité accrue des données géo-spatiales, les progrès de l'AI et la disponibilité d'une puissance de calcul massive ont renforcé la pertinence et le potentiel de la "GeoAI". Le concept a été placé dans le cadre plus large des relations intra-IA en tant que sous-discipline de l'IA qui utilise l'apprentissage automatique(AA) pour extraire des connaissances à partir de données spatiales (ONU-expert 2015).

Il est également remarquable que les données géo-spatiales sont largement répandues dans de nombreux domaines scientifiques et d'application tels que les villes intelligentes, la résilience aux catastrophes naturelles, le changement climatique, les transports, la santé publique, les entreprises, la sécurité publique, etc. Au-delà de ces questions, l'objectif global est d'améliorer la qualité de vie de l'homme et la conservation de la nature et protection des écosystèmes. Diverses disciplines sont impliquées dans l'élaboration de ces domaines interdisciplinaires, notamment l'informatique, la géographie, la science de l'information géographique (SIG), l'imagerie spatiale, ainsi que les études relatives à l'environnement (ONU-expert 2015).

La section suivante donne un aperçu de la technologie "GeoAI", y compris les définitions de l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et profond, la "GeoAI" et les différences entre la "GeoAI" et l'AI traditionnelle (Hu et al. 2019; WGIC 2021).

11.1. Intelligence artificielle

L'étude et la conception de machines ou de méthodes informatiques capables d'effectuer des tâches qui requièrent normalement l'intelligence humaine, telles que le raisonnement, l'apprentissage et la prévision, qui leur permettent de fonctionner de manière appropriée dans leur environnement (Hu et al. 2019).

11.2. Apprentissage automatique

Un sous-domaine de l'IA qui s'appuie sur des méthodes statistiques ou des techniques d'optimisation numérique pour dériver des modèles à partir de données sans programmer explicitement chaque paramètre du modèle ou chaque étape de calcul (WGIC 2021).

11.3. Apprentissage profond

Un type particulier d'apprentissage automatique dans lequel les réseaux neuronaux artificiels et les algorithmes inspirés du cerveau humain apprennent les modèles et les règles de prédiction à partir de grandes quantités de données (Baydin et al. 2018).

11.4. GeoAI

Il s'agit d'une discipline scientifique émergente qui combine des innovations dans le domaine des sciences spatiales, des méthodes d'IA (AA et AP), l'exploration de données et le calcul à haute performance pour extraire des connaissances à partir de données spatiales de grande ampleur ("big data") (Liu and Biljecki 2022).

11.5. Géo-spatial

Terme collectif désignant les données et les technologies associées ayant une composante géographique ou de localisation, souvent par rapport à la Terre (Deren 2016).

Pour chacun des termes précédents, il existe un certain nombre de définitions, et la définition de chaque terme a été choisie pour être adaptée à cette étude. L'IA et d'autres sont des termes populaires à cette époque. Savoir ce que c'est et la différence entre eux est plus crucial que jamais. Bien que ces termes puissent être étroitement liés, il existe des différences entre eux (figure 5).

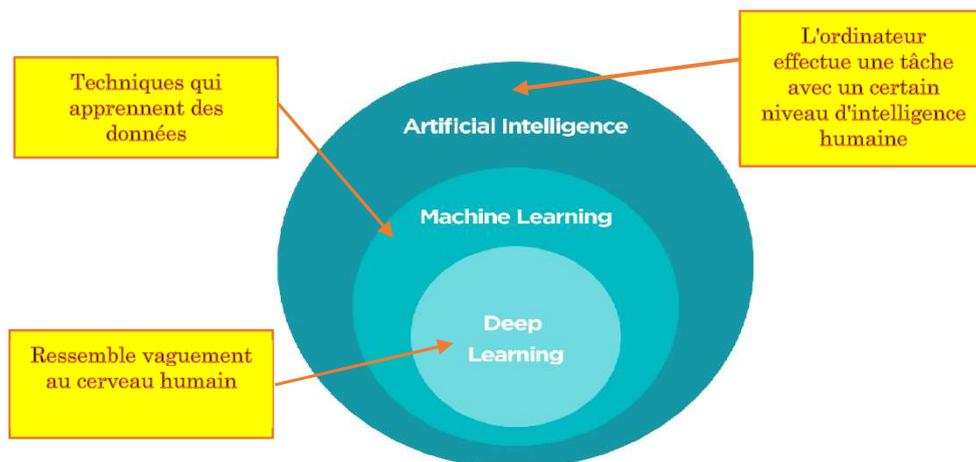


Figure 5: Relation au sein de l'IA (Esri 2023)

VoPham et al. (2018) ont défini "GeoAI" comme "une discipline scientifique émergente qui combine les innovations en sciences spatiales, les méthodes d'intelligence artificielle, l'extraction de données et l'informatique de haute performance pour extraire des informations à partir des données larges de type spatial".

Kamel Boulos et al. (2019) illustrent que "l'assemblage de l'Intelligence Artificielle (IA) et la planète des systèmes d'information géographique (GIS) crée le GeoAI".

Le "GeoAI" est le domaine où la technologie géo-spatiale, l'imagerie spatiale et l'intelligence artificielle convergent. De plus, l'IA géo-spatiale peut également être définie comme une nouvelle forme d'apprentissage automatique basée sur une composante géographique. La figure 6 illustre le concept de "GeoAI".

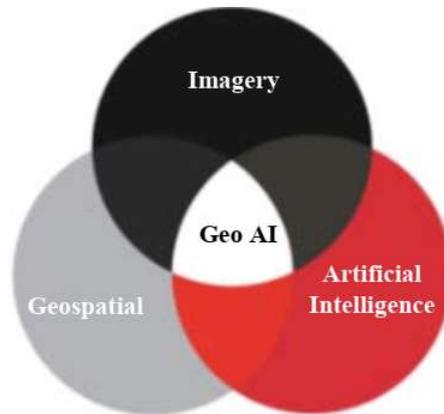


Figure 6: La conception du GeoAI (Alastal and Shaqfa 2022)

Pour répondre aux objectifs qu'est la réalisation de la carte de vulnérabilité à la désertification en particulier la carte d'ensablement et la carte de dégradation des terres, une multitude de méthodes d'apprentissage automatique (AA) supervisées et non-supervisées sont adoptées avec l'intégration des couches d'information de la zone d'étude préparées par des outils de SIG, imagerie spatiale et également des données statistiques. Dans la section qui suit, on trouvera les méthodes d'apprentissage automatique les plus fréquentes dans le monde de l'environnement, et les géomatiques toutes en concentrant de plus, sur les méthodes utilisées dans cette étude.

Mais avant d'entamer cette section, on va définir quelques notions de données d'échantillonnage nécessaire pour réaliser les techniques d'apprentissage automatique.

11.6. Données nécessaires dans l'apprentissage automatique

11.6.1. Données d'entraînement

C'est la base de connaissance adoptée pour entraîner un algorithme d'apprentissage, pendant cet apprentissage, le modèle peut être ajusté en dépendance des performances réalisées.

11.6.2. Données de test

C'est un ensemble de données non-vue utilisées pour évaluer un modèle. Dans le cas pratique l'ensemble de données réservées à l'entraînement est plus grand que celle adoptée pour le test.

11.7. Type d'apprentissage automatique

Il existe trois types d'apprentissage automatique qui peuvent être représentés par le schéma (figure 7).

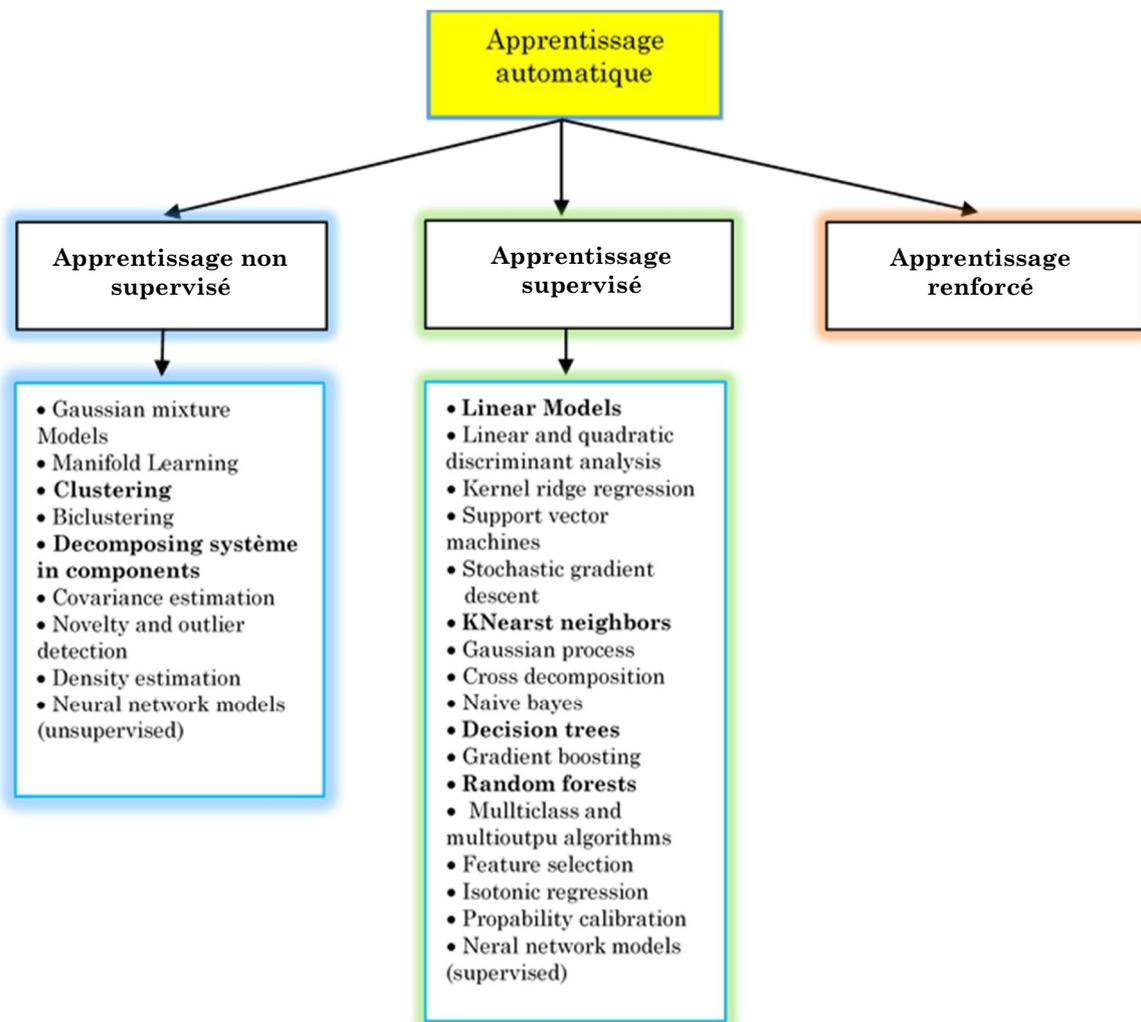


Figure 7: Algorithmes utilisés dans l'apprentissage supervisé et non supervisé (scikit-learn-developers 2023)

11.7.1. Apprentissage supervisé

On l'appelle aussi apprentissage prédictif. Une machine prédit la classe d'objets inconnus sur la base d'informations antérieures relatives à la classe des objets similaires. L'ensemble de données de l'échantillon à traiter sont des objets étiquetés. Dans ce type d'apprentissage, généralement, les algorithmes les plus importantes sont : "régression linéaire", "K Nearest Neighbors", "Random forest (RF)", les "Decision trees (DT)", "Neural Network " ... etc.

Random Forest (RF)

La RF est une méthode d'apprentissage automatique qui attribue une valeur ou une classe à une variable de réponse en utilisant des arbres de régression ou de classification (figure 8). En mode classification, la RF utilise une classification d'ensemble avec plusieurs classificateurs et une méthode statistique entièrement non paramétrique (Breiman 2001).

Des centaines d'arbres de décision sont intégrés à la classification RF et leurs décisions sont généralement combinées par des votes multiples. Le principe général du groupe

d'entrainement est que l'ensemble des modèles soit supérieurs aux modèles uniques, pour éviter ce qu'on appelle les conflits entre les sous-ensembles de même caractère.

Par conséquent, la méthode de classification RF est largement utilisée pour traiter les données images en télédétection. Les options les plus importantes d'entrainement du model dans la méthode RF sont : le nombre d'arbres, le nombre maximum des attribusés (features en anglais) pour le processus de fragmentation, et les variantes statistiques sont utilisées pour le processus d'échantillonnage (Belgiu and Drăguț 2016).

Le nombre maximum d'arbres utilisé dans cette étude est de l'ordre de 100, et dix (10) est le nombre sélectionné des attribusés pour le fractionnement. En outre, la technique "out-of-pocket" (OOP) était choisies pour le model statistique de l'échantillon.

Ce modèle a été exécuté à l'aide du module " `sklearn.ensemble` " de la bibliothèque " `scikit-learn` " dans l'environnement "Anaconda 5.0".

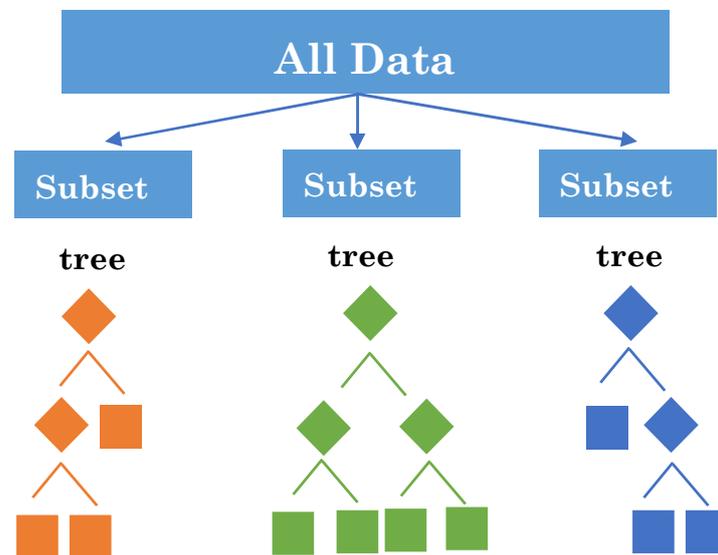


Figure 8 : Le schéma général de la méthode "Random Forest" (Lateef 2020)

Decision Trees (DT)

(Arbre de décision) c'est une méthode d'apprentissage supervisé non paramétrique et non linéaire utilisée pour la classification et la régression (Duan et al. 2019). Elle a une structure hiérarchique, arborescente, composée de nœuds racines, des branches, des nœuds internes et de nœuds feuillent. Son objectif est de créer un modèle qui prédit la valeur d'une variable cible en apprenant des règles de décision simples déduites des caractéristiques des données (figure 9).

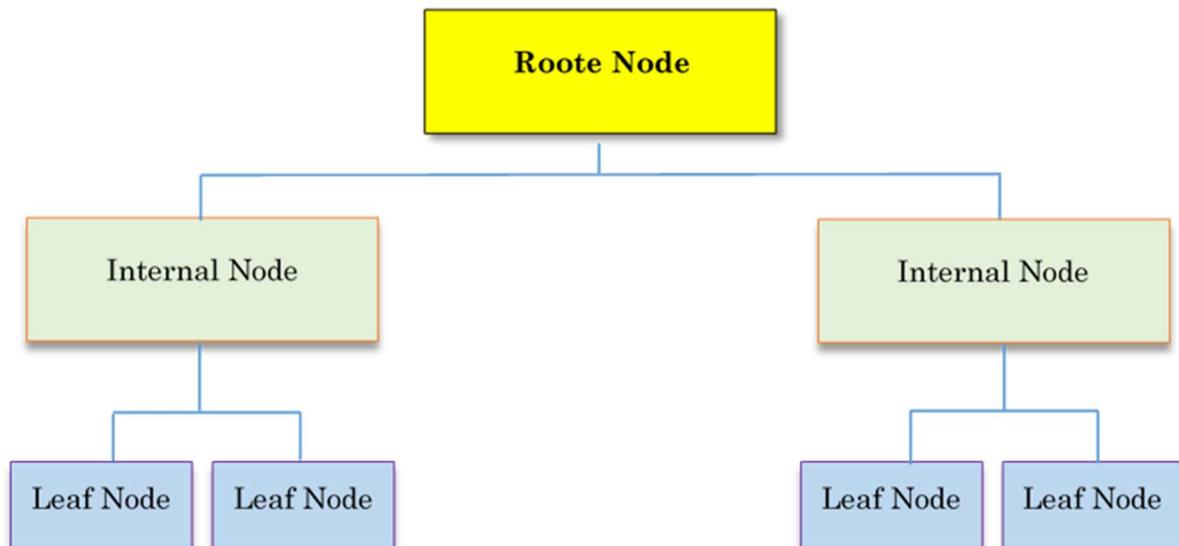


Figure 9: Le schéma général de la méthode "Decision Trees" (IBM 2023)

Il existe plusieurs algorithmes de nature "Decision Trees" ; qui sont: "ID3", "C4.5" et le plus important est le "CART".

- L'algorithme D3 : qui est l'abréviation de "Iterative Dichotomiser 3". Cet algorithme exploite le gain d'informations et l'entropie pour évaluer les fractionnements candidats.
- L'algorithme C4.5 : Cet algorithme est une itération ultérieure d'ID3, il utilise des informations de gain ou de ratios de gain pour estimer des points de fractionnement au sein des arbres de décisions.
- L'algorithme CART suppose que l'arbre de décision est constitué de tous les arbres binaires. L'arbre de décision divise récursivement chaque attribut (feature) en deux parties avant d'obtenir le résultat de la décision. En d'autres termes, l'espace des attributs est divisé en éléments finis par le biais d'une division continue. Par conséquent la distribution de la probabilité de la prédiction peut être déterminée par ces éléments finis (Larose and Larose 2014).

Parmi ces trois méthodes (ID3, C4.5, CART-DC), l'algorithme de "CART-DT" est adopté pour classifier les éléments de vulnérabilité à la désertification (ensablement).

Ce choix est justifié par les avantages données par la (scikit-learn-developers 2023).

L'erreur de test est évaluée en utilisant un nombre de validation croisée égale à 10. Dans le même temps, la profondeur maximale choisie pour le modèle de l'arbre de décision est de 2. Ce modèle a été exécuté en utilisant le module "`sklearn.tree`" de la bibliothèque "scikit-learn" dans l'environnement "Anaconda 5.0".

K Nearest Neighbors (KNN)

Le K proche voisin est algorithme discriminant qui appartient à la famille des techniques d'apprentissage automatique supervisé et non paramétrique qui utilise la proximité pour effectuer des classifications ou des prédictions sur le regroupement d'un point de données individuel (attributs). Il est généralement utilisé comme algorithme de classification en

partant de l'hypothèse que des points similaires (pixels) peuvent être trouvés les uns à côté des autres, bien qu'il puisse être utilisé pour des problèmes de classification ou de régression.

Pour les problèmes de classification, une étiquette de classe est attribuée par vote à la majorité : l'étiquette de classe le plus fréquemment représenté autour d'un point de données va être adopté.

Le terme "vote majoritaire" est plus souvent utilisé dans la littérature. Ce vote nécessite une majorité technique supérieure à 50 %, ce qui est principalement efficace dans les situations où il n'y a que deux catégories. Lorsque on a plusieurs classes, comme trois ou quatre catégories, on n'a pas nécessairement besoin de 50 % des voix pour tirer une conclusion sur une classe. L'étiquetage des points dans ce cas-là peut-être effectué avec un vote supérieur à 25 % (sebastianraschka 2018).

K définit le nombre de point proche (pixels) que peut l'utilisateur choisir pour établir sa classification (figure 10).

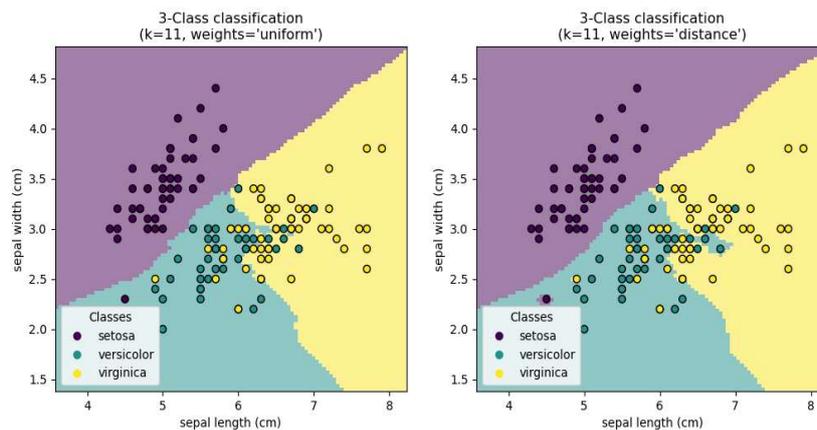


Figure 10: Exemple de classification par l'utilisation du méthode KNN(scikit-learn-developers 2023)

Pour réaliser cet algorithme, il existe plusieurs types de distance qu'on peut les intégrer dans le processus de la classification des points (pixels), parmi elles (IBM 2023):

- **Distance Euclidienne (P = 2)**

$$D(P1, P2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{P1,i} - X_{P2,i})^2} \tag{1}$$

P1: est le point P1

P2: est le point P2

$X_{P1,i}$: la valeur de l'attribut i du point 1

$X_{P2,i}$: la valeur de l'attribut i du point 2

- **Distance de Manhattan (P = 1)**

$$D(P1, P2) = \sum_{i=1}^n |X_{P1,i} - X_{P2,i}| \tag{2}$$

P1: est le point P1

P2: est le point P2

$X_{P1,i}$: la valeur de l'attribut i du point 1

$X_{P2,i}$: la valeur de l'attribut i du point 2

▪ **Distance de Minokwski**

$$D(P1, P2) = \left(\sum_{i=1}^n |X_{P1,i} - X_{P2,i}| \right)^{1/p} \quad (3)$$

P1: est le point P1

P2: est le point P2

$X_{P1,i}$: la valeur de l'attribut i du point 1

$X_{P2,i}$: la valeur de l'attribut i du point 2

La distance de Minkowski est la forme générale de mesure de distance euclidienne et de Manhattan dont le coefficient $p=2$ pour la première distance et $p=1$ pour la deuxième sera remplacé par le coefficient inverse de ces deux distances et à l'utilisateur de choisir son ordre de grandeur.

▪ **Distance de Hamming**

$$D(P1, P2) = \sum_{i=1}^n |X_{P1,i} - X_{P2,i}| \quad (4)$$

Avec

$$\begin{cases} X_{P1,i} = X_{P2,i} , D(P1, P2) = 0 \\ X_{P1,i} \neq X_{P2,i} , D(P1, P2) = 1 \end{cases}$$

P1: est le point P1

P2: est le point P2

$X_{P1,i}$: la valeur de l'attribut i du point 1

$X_{P2,i}$: la valeur de l'attribut i du point 2

Pour les travaux réalisés dans cette étude : la réalisation de la carte d'ensablement avec l'intégration des paramètres biophysiques et les méthodes d'apprentissage automatique (KNN), la distance adoptée est la distance à caractère Euclidien alors que le nombre de points nécessaires pour classifier un nouveau point (pixel) est de l'ordre de 10.

Ce modèle a été exécuté à l'aide du module "[sklearn.neighbors](#)" de la bibliothèque "scikit-learn" dans l'environnement "Anaconda 5.0".

11.7.2. Apprentissage non-supervisé

On l'appelle aussi apprentissage descriptif. Une machine trouve les motifs (patterns en anglais) dans les objets inconnus pour le but de regrouper les objets similaires. L'ensemble de données de l'échantillon à traiter ne sont pas des objets étiquetés. Parmi les algorithmes les plus fréquentés dans ce type d'apprentissage est "clustering", l'analyse en composante principale ("ACP"), LDA ...etc.

L'établissement de la carte de la désertification et la dégradation de la terre (DDT) par un type de classification supervisé évoque un défi difficile à réaliser quand le nombre de classe est supérieure à trois.

Le nombre de classe choisie préalablement est de l'ordre de quatre ; dont les classes extrêmes 1 et 4 sont un petit peu faciles à déterminer et à utiliser pour l'entraînement et la validation, tandis que les classes qui se trouvent au milieu c.-à-d. 2 et 3 représentent un problème de reconnaissance pour ce genre de classification.

L'apprentissage automatique non-supervisé vient de surmonter ce type de classification par l'introduction de plusieurs algorithmes. Dans cette étude, on a utilisé la technique de "clustering" représentée par la méthode de "ward Agglomeration" (Salvati and Zitti 2009) associée d'une distance de type "Euclidien" pour classifier des coordonnées issues de la technique d'analyse en composante principale (ACP).

(La partie III) décrit en détail la méthodologie adoptée pour réaliser la carte de désertification et de dégradation des terres (DDT) du HPO.

Clustering :

Est une technique de classification non supervisée qui permet de regrouper les points (Pixels) par distance ou similarité (IBM 2023). Il existe plusieurs algorithmes dans cette catégorie de classification parmi eux : "MinBatch Kmeans", "Affinity Propagation", "Spectral clustering", "Ward agglomeration"... etc (figure 11).

▪ **Agglomération**

C'est une technique de classification non supervisée qui a pour but d'effectuer un regroupement hiérarchique en utilisant une approche ascendante : chaque observation commence dans son propre "cluster" et "les clusters" sont successivement fusionnés. Les critères de liaison déterminent la métrique utilisée pour la stratégie de fusion (scikit-learn-developers 2023):

Ward : minimise la somme des carrés des différences au sein de tous "les clusters". Il s'agit d'une approche de minimisation de la variance et en ce sens elle est similaire à la fonction objectif "k-means" mais abordée avec une approche hiérarchique agglomérative.

La liaison complète : minimise la distance maximale entre les paires d'observation de même clusters.

La liaison moyenne : minimise la distance moyenne entre les paires d'observation de même clusters

La liaison unique minimise la distance la plus proche entre les paires d'observation de même clusters.

Pour appliquer cette technique ("Clustering") , on s'est basé sur les solutions données par le logiciel "Orange Data mining 3.361.1" développé par Bioinformatics Lab (2023) (University of Ljubljana, Slovenia).

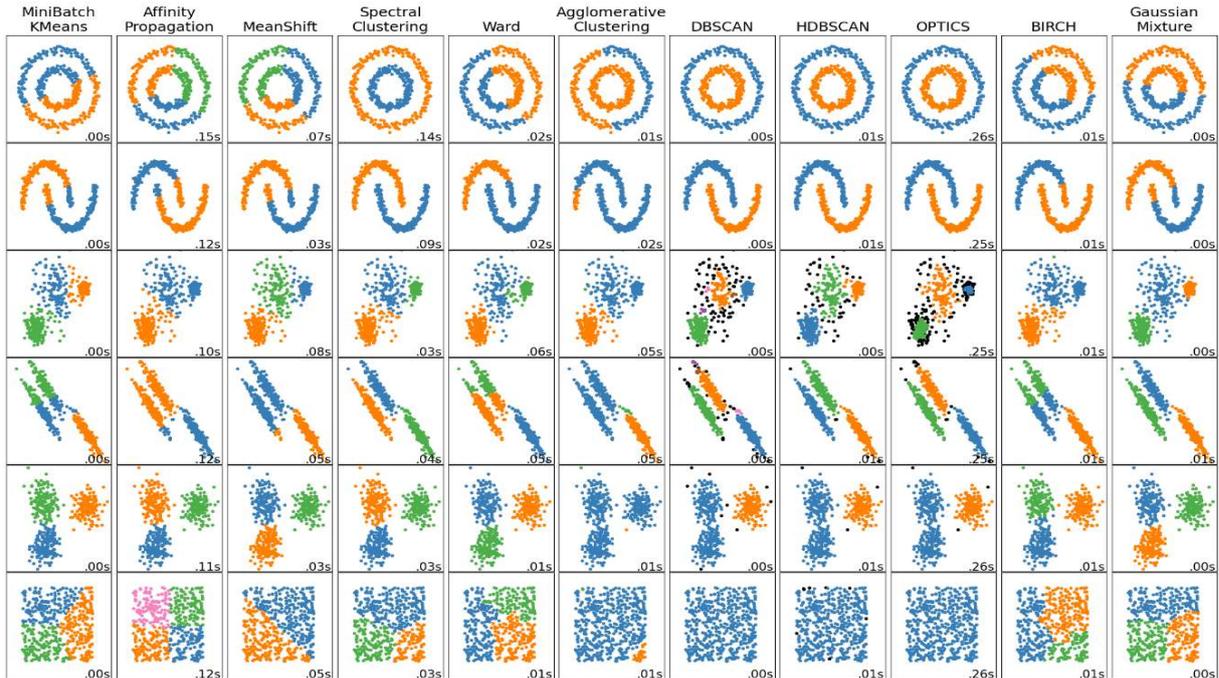


Figure 11: Les différents types de " clustering " (scikit-learn-developers 2023)

Analyse en composante principale

C'est une technique qui aide à décomposer un ensemble de données (attributs) multivariées en un ensemble de composantes orthogonales successives qui expliquent une quantité maximale de variance.

Dans notre étude on a utilisé cette technique pour dé-corréler (enlever la dépendance) les couches d'information utilisées pour réaliser la carte de la dégradation des terres et réduire le nombre d'attributs initiale vers un nombre de dimension qui peut être représenté par un graphe en deux ou trois dimensions (figure 12).

Pour appliquer cette technique (Analyse en composante principale), nous nous sommes basé sur les solutions données par le module statistique "XLSTA".

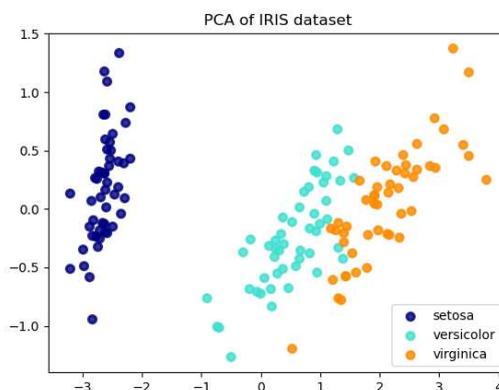


Figure 12: Exemple d'une re-projection des données réalisées par ACP (scikit-learn-developers 2023)

12. Apprentissage renforcé

Une machine apprend à agir par elle-même pour atteindre les objectifs donnés.

13. Conclusion

Le processus de la désertification des régions steppiques en Algérie continue à s'intensifier ces dernières années.

L'aridité, la pression anthropique, le surpâturage, la sécheresse, l'irrigation mal maîtrisée, l'extension des terres cultivées, la dégradation des points d'eau, le défrichement, la sédentarisation représentent les principales causes de la dégradation de la végétation et l'apparition de nouvelles espèces considérées comme indicateur de cette dégradation.

La diminution croissante du couvert végétal et la pauvreté du sol en matière de substances organiques exposent ce dernier aux érosion éolienne et hydrique ce qui entraîne des effets négatifs aux milieux environnementaux et socio-économiques.

L'Algérie a mis en place un ensemble d'actions et de mesures stratégiques pour lutter contre le processus de la désertification ; afin de protéger la steppe et mettre une fin à cette détérioration, parmi ces dispositifs :

- réorganiser et transformer les services qui s'occupent de suivre ce phénomène depuis l'échelle de la wilaya à une échelle à caractère régionale comme le HPO.
- mettre en place des moyens financiers et humaines afin d'aider ces services à réaliser ses objectifs dans les meilleures conditions.
- sensibilisation de la population locale des répliques engendrées de ce genre de phénomène.
- l'adoption de nombreuses législations qui contribueraient à réduire l'impact de ce phénomène sur la population et l'environnement.
- l'implication de la communauté scientifique et les universitaires dans la recherche des meilleures solutions pour faire face à la désertification et à la dégradation des terres.

Chapitre II :

Paramètres Biophysiques et Désertification

1. Introduction

Les hauts plateaux occidentaux de l'Algérie (HPO) sont typiquement l'une des régions les plus touchées par le phénomène de la désertification et la dégradation des terres. Cette situation de dégradation des terres est liée au contexte socio-économique de sur exploitation des ressources naturelles au-delà de leur capacité de restauration, aggravée souvent par les changements climatiques. Elle conduit à une détérioration continuée des activités économiques, entrant les communautés locales les plus vulnérables dans la pauvreté et dans l'obligation de quitter leurs territoires.

Le suivi, la délimitation, et la surveillance du phénomène de la désertification est l'un des sujets les plus exposés par les recherches en écologie, environnement, géographie ...etc.

Plusieurs études ont intégré uniquement une seule méthode et/ou un seul indice de télédétection pour suivre ce phénomène et par conséquent les résultats obtenus ont manqué de qualité en matière de précision et d'efficacité.

Dans cette partie de notre étude, un schéma de surveillance optimale est adopté, il prend en considération la combinaison de quatre indices biophysiques représentés par l'NDVI, l'Albédo, TGSi (Topsoil grained size index) et la température de surface (LST) avec l'intégration de plusieurs types de méthode d'apprentissage automatique (RF : Random Forest, KNN : K-nearest network, DT : Decision Tree).

Les données utilisées sont les images multi spectrales de satellite MODIS. Ce type de capteur est choisi par sa disponibilité et sa qualité de présentation des phénomènes régionaux.

Le but est de sélectionner la combinaison d'indices biophysiques les plus favorables et les meilleures méthodes d'apprentissage automatique pour bien réaliser la carte de désertification.

2. Source de données et prétraitement

L'imagerie satellite à moyenne et basse résolutions spatiales est intégrée de manière régulière depuis les années 2000 pour analyser et étudier la biosphère terrestre sur de vastes étendues.

À l'échelle de la planète, les satellites "grand champ" permettent de suivre les variations saisonnières et annuelles des indices climatiques tels que la végétation, l'humidité, l'aérosol ...etc. Ils sont des outils irremplaçables et constituent une importante source d'information pour mieux comprendre le fonctionnement de la biosphère, la répartition des types de végétation, ainsi que sa variabilité saisonnière et interannuelle et même à plus court terme. La fréquence de passage des satellites basse résolution, comme les MODIS qui couvrent pratiquement toute la surface de la terre au moins une fois par 24 heures, permet de cartographier des variations à court terme de la végétation, albédo, température, et d'autres indices à l'échelle planétaire (UVED 2023).

Aux échelles régionales, ils apportent une aide précieuse pour l'étude de l'effet de variabilité climatique sur le fonctionnement des écosystèmes et notamment le suivi de la désertification. L'imagerie satellitaire basse résolution est utilisée de manière opérationnelle en zones sèches, pour le suivi et l'évaluation des conditions environnementales liées à la sécurité alimentaire.

3. Données Images

Les données images du satellite MODIS (The Terra moderate-resolution imaging spectroradiometer) est un produit fourni par le centre de données NASA LAADS DAAC (DAAC 2023), est utilisé comme étant un outil de détermination des zones désertées.

Le MODerate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, que l'on peut traduire en français par « Radiomètre spectral pour imagerie de résolution moyenne ») est une série d'instruments d'observation scientifique couplés à un système embarqué satellitaire, lancé par la NASA à bord du satellite Terra en 1999, puis à bord du satellite Aqua (deux satellites de l'EOS -Earth Observing System, un programme de la NASA destiné à l'observation à long terme des sols, biosphère, atmosphère et océans de la Terre)(Justice et al. 1998 ; Salomonson et al. 1989).

4. Bandes et résolutions

Les instruments enregistrent des données dans 36 bandes spectrales allant de 0,4 μm à 14,4 μm , le tableau 3 résume les caractéristiques des 36 bandes.

Tableau 3 : Caractéristiques des bandes spectrales de MODIS/TERRA (NASA/GSFC 1995)

Bande	Longueur d'onde (μm)	Résolution spatiale (m)	Utilisation principale
1	0.620-0.670	250	Terre
2	0.841-0.876	250	Terre-Atmosphère
3	0.459-0.479	500	Terre
4	0.545-0.565	500	Terre
5	1.230-1.250	500	Terre
6	1.628-1.652	500	Terre-Atmosphère
7	2.105-2.155	500	Terre-Atmosphère
8	0.405-0.420	1000	Océan
9	0.438-0.448	1000	Océan
10	0.483-0.493	1000	Océan
11	0.526-0.536	1000	Océan
12	0.546-0.556	1000	Océan
13	0.662-0.672	1000	Océan
14	0.673-0.683	1000	Océan
15	0.743-0.753	1000	Océan
16	0.862-0.877	1000	Océan
17	0.890-0.920	1000	Atmosphère
18	0.931-0.941	1000	Atmosphère
19	0.915-0.965	1000	Atmosphère
26	1.360-1.390	1000	Cirrus
20	3.660-3.840	1000	Terre-Océan
21	3.929-3.989	1000	Feux -Volcan
22	3.929-3.989	1000	Terre-Atmosphère
23	4.020-4.080	1000	Terre-Atmosphère
24	4.433-4.498	1000	Atmosphère
25	4.482-4.549	1000	Atmosphère
27	6.355-6.895	1000	Atmosphère
28	7.175-7.475	1000	Atmosphère
29	8.400-8.700	1000	Terre
30	9.580-9.880	1000	Ozone
31	10.780-11.280	1000	Terre-Atmosphère
32	11.770-12.270	1000	Terre-Atmosphère
33	13.185-13.485	1000	Terre-Atmosphère
34	13.485-13.785	1000	Atmosphère
35	13.785-14.085	1000	Atmosphère
36	14.085-14.385	1000	Atmosphère

La résolution spatiale varie de 250 m à 1 km, parfois arrive jusqu'à 5600m. Ensemble, les différents spectromètres prennent une image complète de la terre tous les 1 ou 2 jours. Ils sont conçus pour fournir des mesures à grande échelle de phénomènes globaux, tels que les variations de la couverture nuageuse terrestre, le bilan radiatif, et différents processus se passant dans les océans, sur le sol, et dans la basse atmosphère. Des calibreurs embarqués permettent d'étalonner les instruments en vol.

La stratégie adoptée dans cette étude est de combiner des images fournies par MODIS à l'instar de la Réflectance (MCDA43A4), Albédo (MCDA43A3) l'indice de Végétation (MOD13A1), la température de surface (MOD11A2) et les techniques de l'apprentissage automatique pour bien cartographier des zones touchées par l'avancement du désert. L'étude intègre aussi des images USGS-Landsat série OLI8 pour la même période pour visualiser, interpréter et générer les données d'échantillon dans le but de les exploiter et valider des résultats obtenus.

La période de traitement sélectionnée est : de juin 2000 jusqu'à juin 2023. On a pris uniquement les 6 premiers mois de chaque année, correspondant à la période de grande activité chlorophyllienne.

Les données sont récoltées et traitées par Google Earth Engine (GEE) dont le nombre d'images intégrées pour le NDVI est 184 images, Albédo 2760 images, LST 368 images et TGSi 2760 images (tableau 4).

Tableau 4: Caractéristiques des quatre paramètres biophysiques fournis par MODIS/TERRA ([NASA/GSFC 1995](#))

Produit	Données Utilisées	Résolution Spatiale	Résolution temporelle	Références
NDVI	MOD13A1	500	16 jours	(Fan and Liu 2016)
Albédo	MCD43A3	500	journalier	(Wu et al. 2018)
LST	MOD11A2	1000	8 jours	(Wan 2014)
TGSi	MCD43A4	500	journalier	(Liu et al. 2018)

Où :

NDVI : est l'indice de végétation (Normal Difference Vegetation Index).

LST : est l'indice de la température de surface (Land Surface Temperature).

TGSi est l'indice de volume de grain du sol superficiel (Topsoil Grained Surface Index).

5. Température de surface (LST)

5.1. Aspect théorique

En se basant sur l'équation de transfert radiatif, la radiance spectrale I_λ détectée à partir de l'espace à la longueur d'onde λ pour une atmosphère sans nuage sous un équilibre thermodynamique local peut être écrite sous la forme suivante ([Becker and Li 1990](#) ; [Benmecheta 2017](#)):

$$I_\lambda = R_\lambda \sigma_\lambda + R_{at\lambda\uparrow} \quad (5)$$

σ_λ : représente la transmission spectrale totale de l'atmosphère.

$R_{at\lambda\uparrow}$: est la radiance atmosphérique ascendante.

Chapitre II

R_λ : la radiance spectrale observée à la surface terrestre et qui peut être écrite par l'équation suivante :

$$R_\lambda = \varepsilon_\lambda B_\lambda(T_S) + (1 - \varepsilon_\lambda)R_{at\lambda} \quad (6)$$

Où

ε_λ : l'émissivité spectrale.

T_S : la température de surface.

$B_\lambda(T_S)$: la fonction de Planck.

$R_{at\lambda}$: la radiance atmosphérique descendante au niveau du sol.

$B_\lambda(T_S)$ est la radiance du canal qui serait mesurée, à la température T_S par la loi de Planck, si la surface était un corps noir ($\varepsilon = 1$). Cette dernière suppose que le corps noir soit Lambertien (sa luminance ne dépend pas des angles d'observation, ou d'éclairement) et que la luminance soit indépendante de la nature du corps, et que seule sa température intervient.

Pour un émetteur parfait la radiance est liée à la température par la loi de Planck (un corps noir dont $\varepsilon = 1$) (Gillespie et al. 1999).

$$B(T_S) = \frac{2hc^2}{\pi\lambda^5(\exp\left(\frac{hc}{\lambda_i k T_S}\right) - 1)} = \frac{C_1}{\pi\lambda^5} \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_i T_S}\right) - 1} \right) \quad (7)$$

B : est la radiance du corps noir ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$).

λ : la longueur d'onde (μm^{-1}).

T : la température en (K°).

$C = 2.99 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$: la vitesse de lumière.

$C_1 = 1.19104 \cdot 10^8 \text{ W} \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2} \text{sr}^{-1}$.

$C_2 = \frac{hc}{k} (1.44 \cdot 10^4 \mu\text{m K}^\circ)$.

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ W.s.k}^{-1}$ constante de Boltzmann.

$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2$ 1^{ere} constante de Planck.

La température de brillance est calculée en inversant la fonction de Planck.

$$T_S = \frac{C_2}{\lambda \ln\left(1 + \frac{C_1}{\pi\lambda^5 B(T_S)}\right) - 1} \quad (8)$$

Pour obtenir des estimations relativement précises de température de surface, l'algorithme adopté est celui de la technique de split-windows.

5.2. Aspect algorithmique

Un produit MODIS appelé MOD11A2 de 1 km de résolution spatiale et 8 jours de résolution temporelle basé sur l'algorithme de "Split-windows" et avec l'utilisation de l'équation (eq. 9) permet de calculer directement la température de surface (LST) en degré Celsius (°), Où DN est donnée comme étant une valeur numérique.

$$LST = DN * 0.02 - 273.15 \quad (9)$$

Une équation de type quadratique permet aussi d'estimer la température de surface (LST) (J. Sobrino et al. 2003) :

$$LST = T_{31} + a_1 + a_2(T_{31} - T_{32}) + a_3(T_{31} - T_{32})^2 + (a_4 + a_5W)(1 - \varepsilon) + (a_6 + a_7W)\Delta\varepsilon \quad (10)$$

T_{31}, T_{32} : représentent la brillance relativement aux bandes 31 et 32.

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ et a_7 : sont les coefficients de l'algorithme split-windows qui ont pour valeurs : 1.02, 1.79, 1.20, 34.83, -0.68, -73.27 et -5.19 respectivement.

ε : La quantité de la vapeur d'eau de l'atmosphère tel que $\varepsilon = (\varepsilon_{31} + \varepsilon_{32})/2$ est définie comme étant la moyenne de l'émissivité effective relativement au canaux 31 et 32.

$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{31} - \varepsilon_{32}$ est la différence de l'émissivité spectrale.

5.3. Estimation de l'émissivité de surface

Pour l'estimation de l'émissivité de surface, la méthode de seuil d'indice de végétation NDVI (J. A. Sobrino and Raissouni 2000) est appliquée dont les caractéristiques de chaque pixel dans le sol est pris en considération.

- Pixel de sol nu : Les valeurs de NDVI inférieures à 0.2 sont considérées comme étant un sol nu (la végétation proportionnelle $P_v = 0$) qui peut inclure une végétation peu dense ou un sol nu. On prend en compte la réflectivité du bande numéro 1 du satellite MODIS (ρ_1), ε et $\Delta\varepsilon$ sont calculées de la manière suivante :

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (11)$$

$$\varepsilon = 0.9832 - 0.058 \rho_1 \quad (12)$$

$$\Delta\varepsilon = 0.0018 - 0.060 \rho_1 \quad (13)$$

Où

ρ_1 et ρ_2 : représentent la valeur de réflectance de bande 1 (rouge) et bande 2 (infrarouge) du satellite MODIS.

- Pixels Mixtes : les valeurs de NDVI sont comprises entre 0.2 et 0.5, ε et $\Delta\varepsilon$ sont calculées comme suit (eq.15 et eq.14) :

$$\varepsilon = 0.971 + 0.018 P_v \quad (14)$$

$$\Delta\varepsilon = -0.006(1 - P_v) \quad (15)$$

Où P_v : est la végétation fractionnelle qui peut être obtenue selon la formule qui suit proposée par [Carlson and Ripley \(1997\)](#).

$$P_v = \frac{(NDVI - NDVI_{min})^2}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})^2} \quad (16)$$

- Pixels avec végétation dense : Les valeurs de NDVI sont supérieures à 0.5 , ($P_v = 1$) et donc ε et $\Delta\varepsilon$ sont reformulées de la manière suivante (eq.17, eq.18 et eq.19):

$$\varepsilon = 0.985 + d\varepsilon \quad (17)$$

$$\Delta\varepsilon = 0 \quad (18)$$

Avec $d\varepsilon = 0.005 \quad (19)$

5.4. Estimation du contenu de vapeur d'eau

Pour dériver la transmittance atmosphérique du canal d'absorption et la teneur totale en vapeur d'eau atmosphérique, un rapport de deux canaux, un canal d'absorption et le canal fenêtre à l'égard des bandes 2 et 5 qui peuvent être intégrés avec les bandes d'absorption 17, 18 et 19. Cependant les trois bandes ont des sensibilités différentes dans les mêmes conditions atmosphériques. La bande 18 est marquée comme elle a la plus forte sensibilité sous une atmosphère plus ou moins sec, tandis que la bande 17 à une sensibilité signifiante sous des conditions atmosphériques humides ([Kaufman and Gao 1992](#)). Pour cette raison la moyenne de la vapeur d'eau est devenue un choix optimal pour le calcul de cette valeur.

$$W = 0.192 W_{17} + 0.453 W_{18} + 0.355 W_{19} \quad (20)$$

Où W : est le contenu total de la vapeur d'eau.

$W_i (i = 17,18,19)$: la valeur de la vapeur d'eau enregistrée pour les canaux 17,18 et19 du satellite MODIS (eq.21, eq.22 et eq.23).

$$W_{17} = 26.314 - 54.434 G_{17} + 28.449 G_{17}^2 \quad (21)$$

$$W_{18} = 5.012 - 23.017 G_{18} + 27.844 G_{18}^2 \quad (22)$$

$$W_{19} = 9.446 - 26.887 G_{19} + 19.914 G_{19}^2 \quad (23)$$

$G_i (i = 17,18,19)$: sont les rapports des radiances entre les canaux 17,18,19 et le canal numéro 2, où il est défini comme suit :

$$G_i = \frac{L_i}{L_2} \quad (24)$$

La figure 13 représente la température de la surface moyenne (2000-2023) pour la région des hauts plateaux occidentaux (HPO).

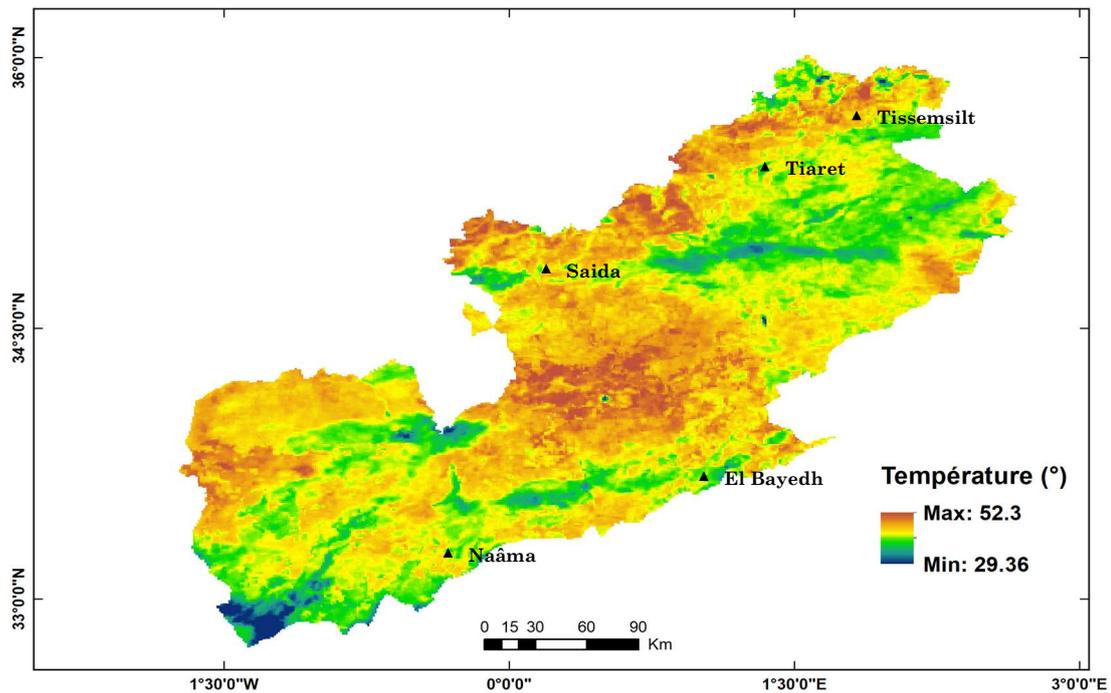


Figure 13 : La carte de la température de surface de la région du HPO

D'après la figure 13 la température de surface obtenue, de la région est caractérisée par un gradient de température de surface équivalent à 23 °.

La valeur de la température de surface minimale enregistrée est 29.36 degré saisie dans le sud-ouest de la région alors que les hautes températures sont presque concentrées dans le centre et le nord-ouest là où il y a le Chott-Echergui et Chott-Elgharbi.

Les régions du nord-est et le nord du HPO sont caractérisées par une température relativement moyenne.

En ce qui concerne la variation temporelle de ce paramètre biophysique, la figure 14 montre qu'il existe une corrélation insignifiante ou presque nulle entre les valeurs de la température durant cette période. L'intervalle des valeurs varie de 40 degré jusqu'à 43 degré. La valeur moyenne de la température dans le temps est équivalente à 41 degré. Il est remarquable que la courbure de la fonction de variation de la température de surface n'est pas linéaire ; elle est proche à une fonction sinusoïdale.

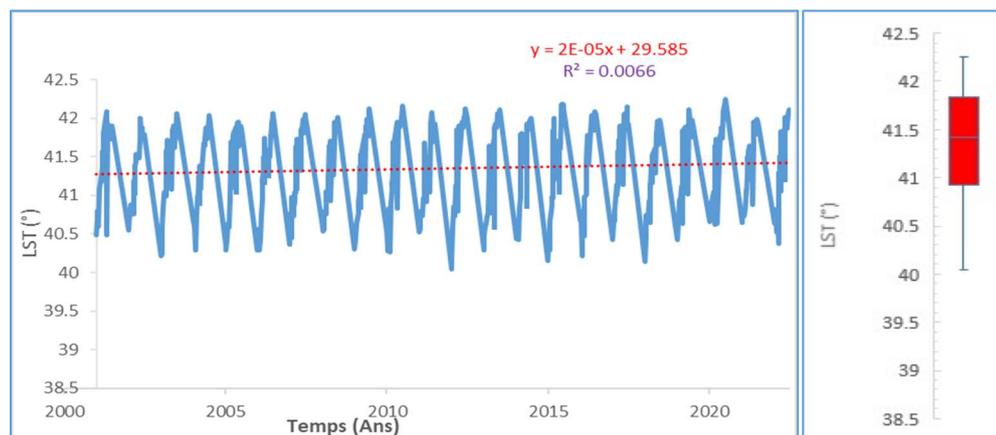


Figure 14 : Variation temporelle de la température de surface (LST) dans la région (HPO) : 2000-2023

6. L'albédo

6.1. Aspect théorique

L'albédo est le rapport entre la quantité d'énergie de rayonnement solaire réfléchi par une surface par rapport à la quantité d'énergie solaire incidente pour la partie du spectre allant de 0,3 à 3 μm (domaine visible et proche infrarouge). On utilise une échelle graduée de 0 à 1; 0 correspondant au noir sans aucune réflexion, et 1 au miroir parfait sans absorption (Yamani 2005).

L'albédo joue sur les équilibres énergétiques et sur le bilan radiatif dans la mesure où il contrôle la quantité d'énergie solaire envoyée vers l'atmosphère. L'albédo peut varier durant l'année pour une même aire géographique par suite de phénomènes physiques (ou d'effets indésirables tels que la présence de nuages sur des images à basse résolution).

L'interprétation de la valeur d'albédo et de ses variations temporelles et spatiales, conjointement à d'autres variables observables, apporte de l'information sur les processus de désertification. En effet, l'albédo d'un sol nu décroît lorsque sa teneur en eau croît. De même l'albédo d'un sol couvert de végétation dépend du taux de couverture végétale et de son activité chlorophyllienne (Bengueraï 2011).

De nombreux travaux ont cherché à étudier les relations entre albédo et désertification (essentiellement les relations entre l'albédo et les fluctuations du couvert végétal des régions arides ainsi qu'avec les modèles climatiques). Si ces fluctuations ont été mises en évidence à l'échelle continentale, la nature de leur impact sur le climat est encore discutée.

Le satellite MODIS utilise le modèle BRDF (La Fonction de Distribution de la Réflectance Bidirectionnelle) pour le calcul de l'albédo.

Le BRDF (figure 15) décrit la manière dont la surface continentale réfléchit le rayonnement solaire. Son potentiel pour de nombreuses applications dans les études environnementales a largement été démontré (Bicheron and Leroy 2000 ; Theia 2023).

$$BRDF_{\lambda} = f(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v)_{\lambda} = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v)_{\lambda}}{dE_r(\theta_i, \varphi_i)} \quad (25)$$

θ_i : représente l'angle d'incidence du faisceau lumineux ou l'angle zénithale du soleil.

φ_i : représente l'angle de d'incidence du faisceau lumineux ou l'angle azimutale du soleil.

θ_v : représente l'angle de réflectance du faisceau lumineux ou l'angle zénithale du visé.

φ_v : représente l'angle de réflectance du faisceau lumineux ou l'angle azimutale du visé.

λ : est la longueur d'onde.

dE_r : le flux du faisceau lumineux incident (irradiance) par unité de surface ($\text{Wm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$).

dL_r : le flux du faisceau lumineux réfléchi (radiance) par unité de surface et angle solide ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$).

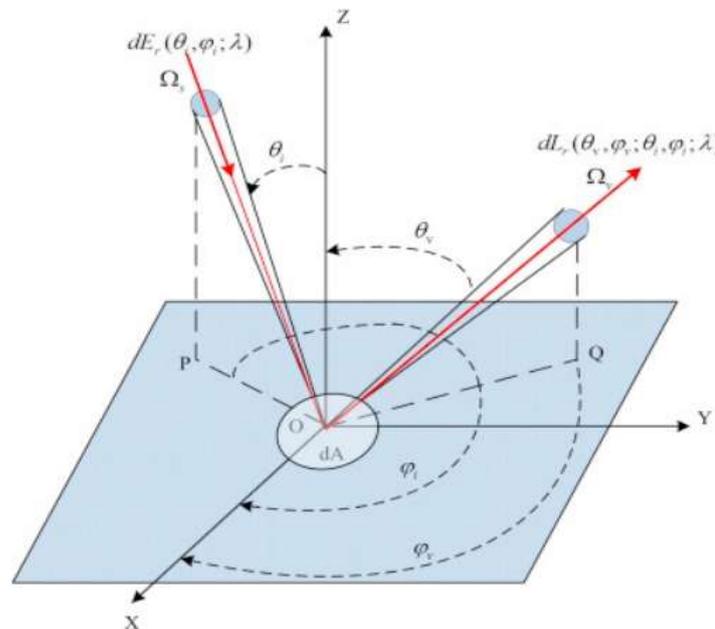


Figure 15: Géométrie d'acquisition de réflectance (Qu 2018)

L'albédo peut être directionnel (calculé pour un angle solaire donné, il est aussi appelé « black-sky albedo ») ou hémisphérique (intégré sur toutes les directions d'éclairement, il est aussi appelé « white-sky albedo »), spectral (estimé pour toutes les bandes spectrales du capteur) ou large-bande (intégré spectralement) (Theia 2023).

Soit :

$$F_u(\theta_i, \lambda) = dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v)_{\lambda} \quad (26)$$

$$F_d(\theta_i, \lambda) = dE_r(\theta_i, \varphi_i) \quad (27)$$

L'albédo inhérent ou planétaire d'un objet dans la nature pour n'importe quel angle zénithal du soleil θ_i et n'importe quelle longueur d'onde λ est défini par la relation suivante :

$$\rho_i(\theta_i, \lambda) = \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} R(-\theta_i, \theta, \varphi) \mu d\mu d\varphi \quad (28)$$

Où $\mu = \cos(\theta)$ et $R(-\theta_i, \theta, \varphi)$ est la Fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (Strahle et al. 1996) qui était adoptée pour la mesure de l'albédo hémisphérique (black-sky albedo) relative aux satellites MODIS (Strahle et al. 1996) et MISR (Diner et al. 1999).

L'albédo spectrale apparent (ρ_A) ou de surface est défini comme étant le rapport entre la radiance ascendante $F_u(\theta_i, \lambda)$ et la radiance descendante $F_d(\theta_i, \lambda)$ d'un angle zénithal θ_i donné :

$$\begin{aligned} \rho_A(\theta_i, \lambda) &= \frac{F_u(\theta_i, \lambda)}{F_d(\theta_i, \lambda)} \\ &= \frac{\frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} R(-\mu', -\mu, \varphi', \varphi_i) L^{inc}(-\mu', -\mu, \varphi', \varphi_i) \mu \mu' d\mu' d\varphi' d\mu d\varphi}{\int_0^1 \int_0^{2\pi} L^{inc}(-\mu', -\mu_i, \varphi', \varphi_i) \mu' d\mu' d\varphi'} \end{aligned} \quad (29)$$

Où $L^{inc}(-\mu', -\mu_i, \varphi', \varphi_i)$: est la radiance totale descendante (directe + diffusée) qui pris en considération les conditions atmosphériques.

Donc l'albédo apparent dans n'importe quelle gamme d'ondes est défini de la même manière :

$$\rho_A(\theta_i, \Lambda) = \frac{F_u(\theta_i, \Lambda)}{F_d(\theta_i, \Lambda)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_u(\theta_i, \lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_d(\theta_i, \lambda) d\lambda} \quad (30)$$

Où Λ : définit la gamme de longueur d'onde de λ_1 vers λ_2 . Si Λ appartient à l'intervalle (0.25 μm -5 μm) alors $\rho_A(\theta_i, \Lambda)$ est appelé l'albédo total dans la bande de courte longueur d'onde.

Si Λ appartient à l'intervalle (0.4 μm -0.7 μm) et Λ à (0.7 μm 5 μm) alors $\rho_A(\theta_i, \Lambda)$ alors ça correspond à l'albédo apparent dans le domaine visible et proche infrarouge.

D'après Liang et al. (2002), son hypothèse suppose que l'albédo apparent est une quantité qui ne dépend pas d'une dimension. Il est défini comme une moyenne de $\rho_j(\theta_i, \lambda)$ pondéré par la radiance ascendante spectrale pour n'importe gamme d'onde (eq.31 et eq.32) :

$$\rho_A(\theta_i, \Lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_d(\theta_i, \lambda) \rho_A(\theta_i, \lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_d(\theta_i, \lambda) d\lambda} \quad (31)$$

$$\rho_A(\theta_i, \Lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{F_d(\theta_i, \lambda)}{F_d(\theta_i, \Lambda)} \rho_A(\theta_i, \lambda) d\lambda \quad (32)$$

MODIS est caractérisé par ses bandes étroites (narrowband en anglais). Donc le calcul de l'albédo se fait par la prédiction de la radiance totale ascendante $F_u(\theta_i, \Lambda)$ et la radiance totale descendante $F_d(\theta_i, \Lambda)$ comme montre l'équation ci-dessous (eq.33 et eq.34) :

$$\rho_A(\theta_i, \Lambda) = \frac{f_1 [F_u(\theta_i, \Lambda_1), \dots, F_u(\theta_i, \Lambda_j)]}{f_2 [F_d(\theta_i, \Lambda_1), \dots, F_d(\theta_i, \Lambda_j)]} \quad (33)$$

Où
$$\rho_A(\theta_i, \Lambda) = f_3 [F_u(\theta_i, \Lambda_1), \dots, F_u(\theta_i, \Lambda_j)] \quad (34)$$

Où $\Lambda_1, \dots, \Lambda_j$ représente la bande J , Pour le satellite MODIS $J=7$ dans la gamme des bandes courtes.

Généralement la fonction de transformation $f_i(\)$ dépend des conditions atmosphériques. Selon Bastable et al. (1993); Pinker (1985) les mesures réalisées indiquent que l'albédo de la surface de la terre sous des conditions atmosphériques avec moins de nuage est plus variable que l'albédo sous un ciel nuageux.

Contrairement à l'albédo apparent où il est dérivé sous des conditions atmosphériques, l'albédo inhérent est le rapport de la radiance ascendante d'une surface éclairée par un faisceau atténué et la radiance descendante non atténuée qui est égale à la radiance solaire extraterrestre dans la haute atmosphère (TOA) $F_0(\theta_i, \lambda)$.

$$\rho_I(\theta_i, \Lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_0(\theta_i, \lambda) \rho_j(\theta_i, \lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_0(\theta_i, \lambda) d\lambda} \quad (35)$$

Où $\rho_j(\theta_i, \lambda)$ est défini par l'équation (eq.28). Il est remarqué que l'albédo inhérent dans les bandes larges (broadband en anglais) est complètement indépendant aux conditions atmosphériques et l'albédo ne sera que la réflectance de la surface éclairée.

Des mesures in situ d'albédo de surface permettent ensuite de déterminer par régression linéaire les coefficients de la relation (eq.34) (Menenti et al. 1989).

Tableau 5: Valeur typique de l'albédo de surface et l'albédo planétaire

Type de surface	Albédo de Surface	Albédo Planétaire
Eau	0.05	0.038
Culture Verte	0.18	0.12
Urbain	0.20	0.13
Végétation dense	0.22	0.14
Surface irriguée	0.26	0.16
Sol nu	0.36	0.21
Sable	0.41	0.24

L'albédo varie principalement selon le type de surface (Tableau 5) : il varie de 4 % pour l'eau et jusqu'à 90 % pour la neige avec des valeurs intermédiaires dépendant du type de végétation (forêt 10-15 %, cultures 15-25 %) ou du type de sol et de son taux d'humidité (10-35 %).

L'albédo est calculé par la formule proposée par Liang et al. (2002) et sous les hypothèses et conditions décrites précédemment.

6.2. Aspect Algorithmique

L'albédo peut être calculé par la formule suivante :

$$\text{Albédo} = 0.016\alpha_1 - 0.291\alpha_2 + 0.243\alpha_3 + 0.116\alpha_4 + 0.112\alpha_5 + 0.081\alpha_7 - 0.0015 \quad (36)$$

Où α_i représente les bandes :1,2,3,4,5,7.

Il y a un autre moyen de le tirer directement à partir des produit MODIS (MCD43A3) dont la bande 19 représente les valeurs de l'albédo à ciel noir (black sky-albedo (BSW)) et la bande 29 représente les valeurs de l'albédo à ciel blanc (white sky-albedo (WSW)).

La figure 16 représente l'albédo moyen dans la période (2000-2023) pour la région des hauts plateaux occidentaux (HPO).

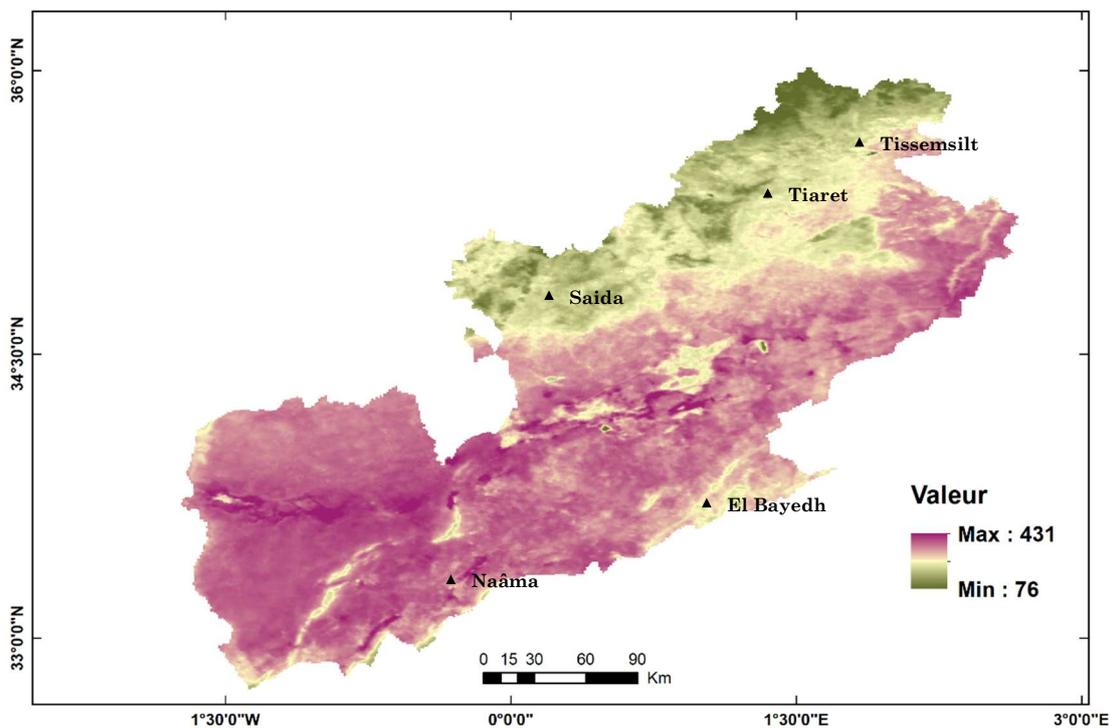


Figure 16: La carte de l'Albédo de la région du HPO

Suivant la figure 16, la région est caractérisée par un albédo moyen qui varie entre 76 et 431 (cette valeur présente la longueur d'onde des ondes courtes).

L'albédo dans les régions nord du HPO est apparu relativement faible par rapport aux régions sud. Les montagnes de l'Atlas Saharien dans le sud et les chotts ont des valeurs de l'albédo moyen similaires à celles enregistrées dans les zones nord du HPO.

En ce qui concerne la variation temporelle de l'albédo dans la région, la figure 17 montre qu'il existe une corrélation très élevée (71%) entre les valeurs dans le temps. La variation

moyenne de ce paramètre dans le temps varie entre 250 jusqu'à 360. La période entre 2010 jusqu'à 2015 enregistre une baisse des valeurs de l'albédo relativement aux extrêmes des périodes (2000-2010 et 2015-2023).

On remarque aussi que les observations traitées ne présentent pas de valeurs extrêmes "Outliers en anglais".

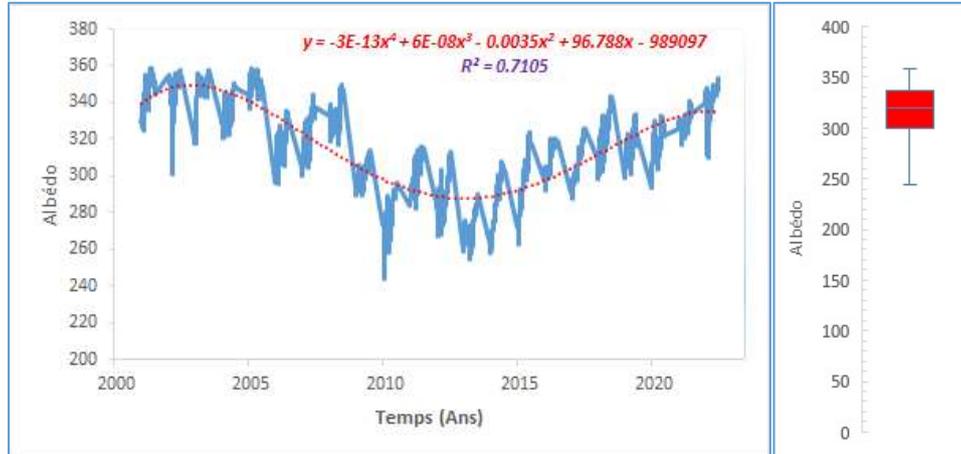


Figure 17 : Variation temporelle de l'albédo dans la région (HPO) : 2000-2023

7. L'indice de végétation

On peut définir souvent un indice de végétation à partir de plusieurs réflectances qui correspondent à des longueurs d'onde différentes. Les indices de végétation sont des combinaisons de plusieurs bandes spectrales. Le rouge (R), le proche infrarouge (PIR) et le moyen infra rouge (MIR) sont couramment utilisés. Ces indices sont choisis tels qu'ils soient peu sensibles à certains paramètres externes comme les propriétés optiques du sol, la géométrie de l'éclairement ou les effets atmosphériques.

Un grand nombre d'indices de végétation peuvent être obtenus à partir des données satellitaires. Les plus populaire sont : l'indice de végétation normalisé (NDVI) (eq.37), l'indice de végétation amélioré (EVI) (eq.38) qui élimine l'effet des aérosols sur la végétation et le (MSAVI) (eq.39) l'indice qui pris en considération la réflectance du sol et de la végétation. Sur le Satellite MODIS, les canaux les plus utilisés pour la surveillance de la végétation sont le canal 14 (rouge), le canal 5 (proche infrarouge) et le canal 9 (bleu)([IDB 2023](#)).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (37)$$

$$EVI = 2.5 \frac{NIR - R}{NIR + 6R - 7.5 B + 1} \quad (38)$$

$$MSAVI = \frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - R)}}{2} \quad (39)$$

Le NDVI est préféré pour la surveillance globale de la végétation car il compense partiellement les changements de conditions d'illumination, la pente des surfaces, et les angles de vues. Les nuages, l'eau et la neige ont un indice de réflexion plus élevé dans le visible que dans le proche infrarouge, de telle sorte que pour ces surfaces le NDVI est négatif. La roche et le sol nu ont des indices de réflexion similaires dans ces deux bandes et produisent un indice de végétation proche de zéro. Dans les scènes avec végétation, le NDVI s'étage de 0,1 à 0,6. Les valeurs les plus élevées sont associées avec une forte densité et verdure des plantes (Yamani 2005).

Les effets atmosphériques tels que la diffusion par la poussière et les aérosols, la diffusion Rayleigh, et les nuages de taille inférieure au pixel agissent tous dans le sens d'une augmentation de réflectance du R par rapport à la réflectance NIR ou proche infrarouge et réduisent l'indice de végétation calculé de telle sorte qu'une calibration des données du détecteur est obligatoire. Les ajustements doivent être effectués pour pallier l'atténuation atmosphérique, l'angle de vue satellitaire, l'angle du soleil et autres effets.

Le HPO est caractérisé par un NDVI moyen (figure 18) qui varie entre -0.18 jusqu'à 0.61. Les valeurs extrêmes positives sont enregistrées dans les régions nord du HPO à l'égard de Saïda, Tissimsilt et Tiaret. Les zones sud ont connu un couvert végétal très très faible dont ces valeurs sont équivalentes à zéro dans les régions de Naâma et El bayedh.

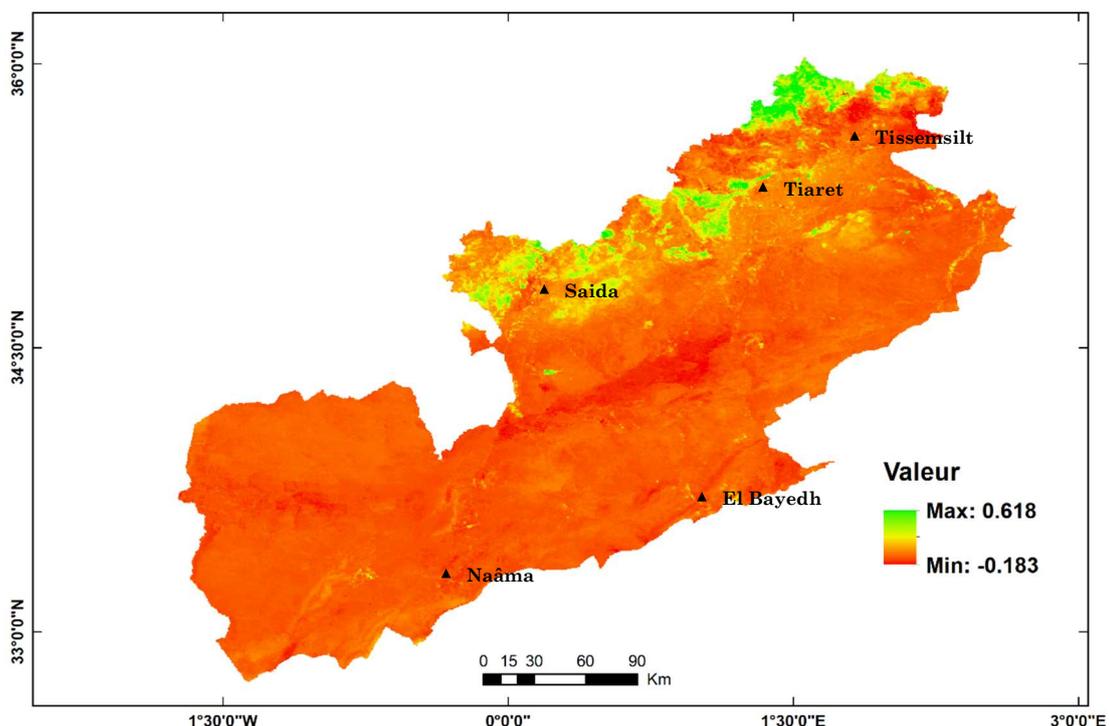


Figure 18 : La carte de l'NDVI de la région du HPO

La variation temporelle (figure 19) du NDVI dans la région est marquée par une corrélation moyenne équivalente à 42%. Les valeurs moyennes maximales correspondent à la période 2010-2015 et qui peuvent atteindre 0.23 alors que les valeurs moyennes minimales sont enregistrées durant la période 2000-2005 et 2015-2023 et qui sont égales à 0.09.

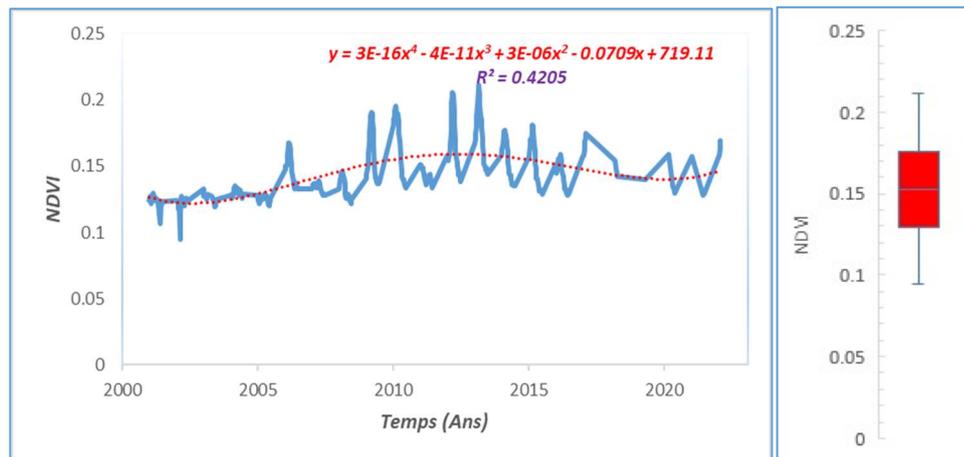


Figure 19 : Variation temporelle de l'NDVI dans la région (HPO) : 2000-2023

8. TGSI

L'indice granulométrique du sol (TGSI) a été développé à la base d'une étude in-situ de la réflectance spectrale de la surface du sol et l'analyse en laboratoire de sa composition en matière de grains. Parmi les inconvénients éprouvés, l'NDVI est considéré comme étant un indice qui interprète mal le degré réel de désertification (Xiao et al. 2006). Pour surmonter ce problème, Xiao et al. (2006) a proposé un nouvel indice, appelé indice granulométrique (TGSI) de la couche superficielle qui intègre la notion mécanique de la couche du sol dans le calcul de la réflectance du sol (eq.40). Il indique que l'augmentation de la taille des grains de la couche du sol est corrélée positivement avec la teneur en sable fin. Plus la désertification est sévère, plus la composition granulométrique de la couche superficielle a des grosses tailles (la granulométrie fait référence au diamètre moyen ou effectif des grains ou particules minéraux individuels). Une valeur TGSI élevée correspond à une zone forte en teneur en sable fin. Dans le cas où le TGSI a des valeurs faibles, le sol est considéré comme argilo-limoneux (Xiao et al. 2006). Le TGSI peut être calculé de la manière suivante (eq.40) :

$$TGSI = \frac{R - B}{R + B + G} \quad (40)$$

La figure 20 représente le TGSI moyen dans la période (2000-2023) pour la région des hauts plateaux occidentaux (HPO).

Selon la carte de TGSI (figure 20), la région est caractérisée par un TGSI moyen qui varie entre 0.009 et 0.446. Les grandes valeurs sont enregistrées dans le sud et le sud-ouest du HPO alors que le nord et le nord-est se distinguent par des valeurs relativement faibles.

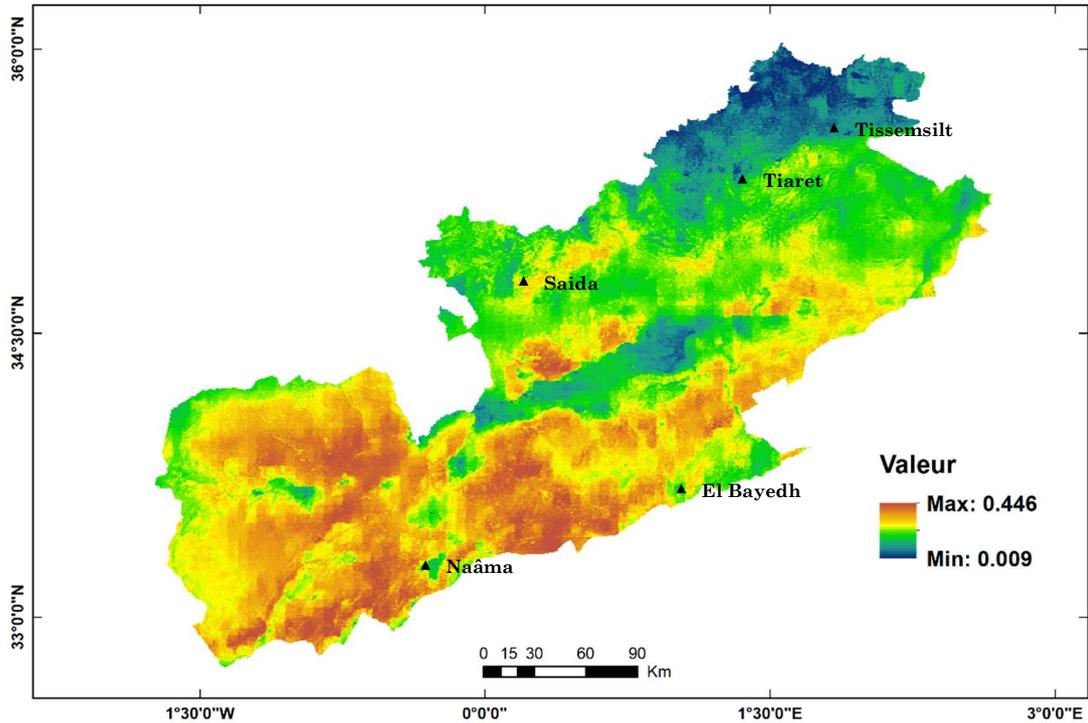


Figure 20 : La carte de TGSi de la région du HPO

La variation temporelle (figure 21) de TGSi dans la région est marquée par une corrélation moyenne équivalente à 44%. Les valeurs moyennes minimales correspondent à la période 2010-2015 et peuvent atteindre 0.15 alors que les valeurs moyennes maximales sont enregistrées dans la période 2000-2005 et 2015-2023 et peuvent atteindre 0.25. L'observation du TGSi dans cette période est caractérisée par l'existence de valeurs extrêmes ou "Outliers"

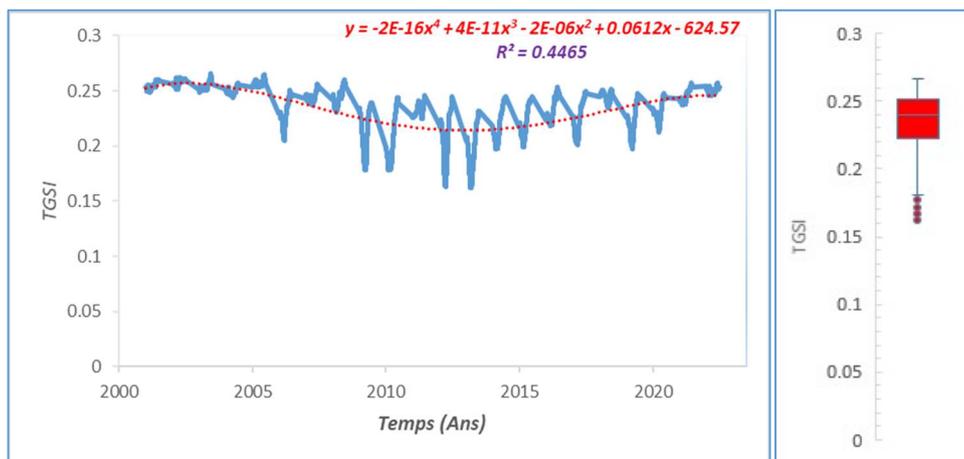


Figure 21 : Variation temporelle de TGSi dans la région (HPO) : 2000-2023

9. Indices et corrélation

La corrélation est une mesure statistique qui exprime la notion de liaison linéaire entre deux variables (ce qui veut dire qu'elles évoluent ensemble à une vitesse constante). C'est un outil courant permettant de décrire des relations simples sans s'occuper de la cause et de l'effet. Elle est définie par la relation suivante(JMP 2023) :

$$r = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X) * Var(Y)}} \quad (41)$$

Où : r : le coefficient de corrélation compris entre -1 et 1

$Cov(X, Y)$ est la covariance entre variables X et Y, Elle mesure la tendance des deux variables à être simultanément au-dessus ou en dessous de leurs espérances respectives. Elle modélise une liaison monotone (Rakotomalala 2017).

$Var(X)$, $Var(Y)$ sont les variances des variables X et Y respectivement.

La relation entre les indices (Albédo, NDVI, LST et TGSI) se caractérise par des corrélations très faibles comme l'albédo et LST avec un coefficient de corrélation $r = 0.00$ (figure 22.a), NDVI et LST avec $r = -0.09$ (figure 22.d), LST et TGSI où $r = -0.14$ (figure 22.e) et une corrélation relativement moyenne comme NDVI et TGSI dont $r = -0.36$ (figure 22.f), Albédo et NDVI avec $r = -0.68$ (figure 22.b) et Albédo et TGSI où $r = 0.68$ (figure 22.c).

La caractérisation de l'état hydrique d'une surface se fait par l'analyse des deux caractéristiques spécifiques et complémentaires de la surface du sol, qui sont l'albédo et la température de surface. Par ailleurs, l'état édaphique est caractérisé par l'analyse de la relation entre l'indice de végétation NDVI et la température de surface.

L'intégration de l'indice TGSI avec les autres indices (Albédo, NDVI et LST) permet d'associer la notion granulométrique aux résultats obtenus (dimension du grain de sable).

10. Schéma d'optimisation

Par la pris en considération de l'incertitude liée au choix des indices de suivi du phénomène de désertification et des différents avantages des techniques d'apprentissage automatique (Machine Learning (ML) en anglais), nous avons visé à explorer la combinaison idéale de ces indices et les méthodes d'apprentissage automatique d'une manière optimale adaptée à la zone d'étude.

Nous avons adopté trois techniques d'apprentissage automatique les plus couramment utilisées dans les domaines de l'environnement et les sciences de la terre, ces techniques sont : DT (Decision Tree), RF (Random Forest) et KNN (K-Nearst Nieghbors).

Pour exécuter le processus de réalisation de la carte d'ensablement (désertification). Nous avons combiné les trois techniques d'apprentissages automatiques (DT, RF, KNN) et les quatre indices (Albédo, LST, TGSI, NDVI), sachant que les indices eux même sont arrangés

Chapitre II

en couple (Albédo-LST, Albédo-NDVI, Albédo-TGSI, LST-TGSI, LST-NDVI, TGSI-NDVI), en trio (Albédo-LST-TGSI, Albédo-LST-NDVI, LST-TGSI-NDVI, Albédo-NDVI-GSI) et en quartile (Albédo, LST, TGSI, NDVI).

Donc le nombre de combinaison finale est calculé de la manière suivante :

$$NB_C = \left(\frac{4!}{(4-2)! * 2!} + \frac{4!}{(4-3)! * 3!} + \frac{4!}{(4-4)! * 4!} \right) * 3 \quad (42)$$

Par conséquent NB_C est égale à 33 combinaisons.

Ce processus a pour objectif de choisir la meilleure combinaison entre l'apprentissage automatique et les indices. Le schéma de la figure 23 présente en détail la méthode adoptée :

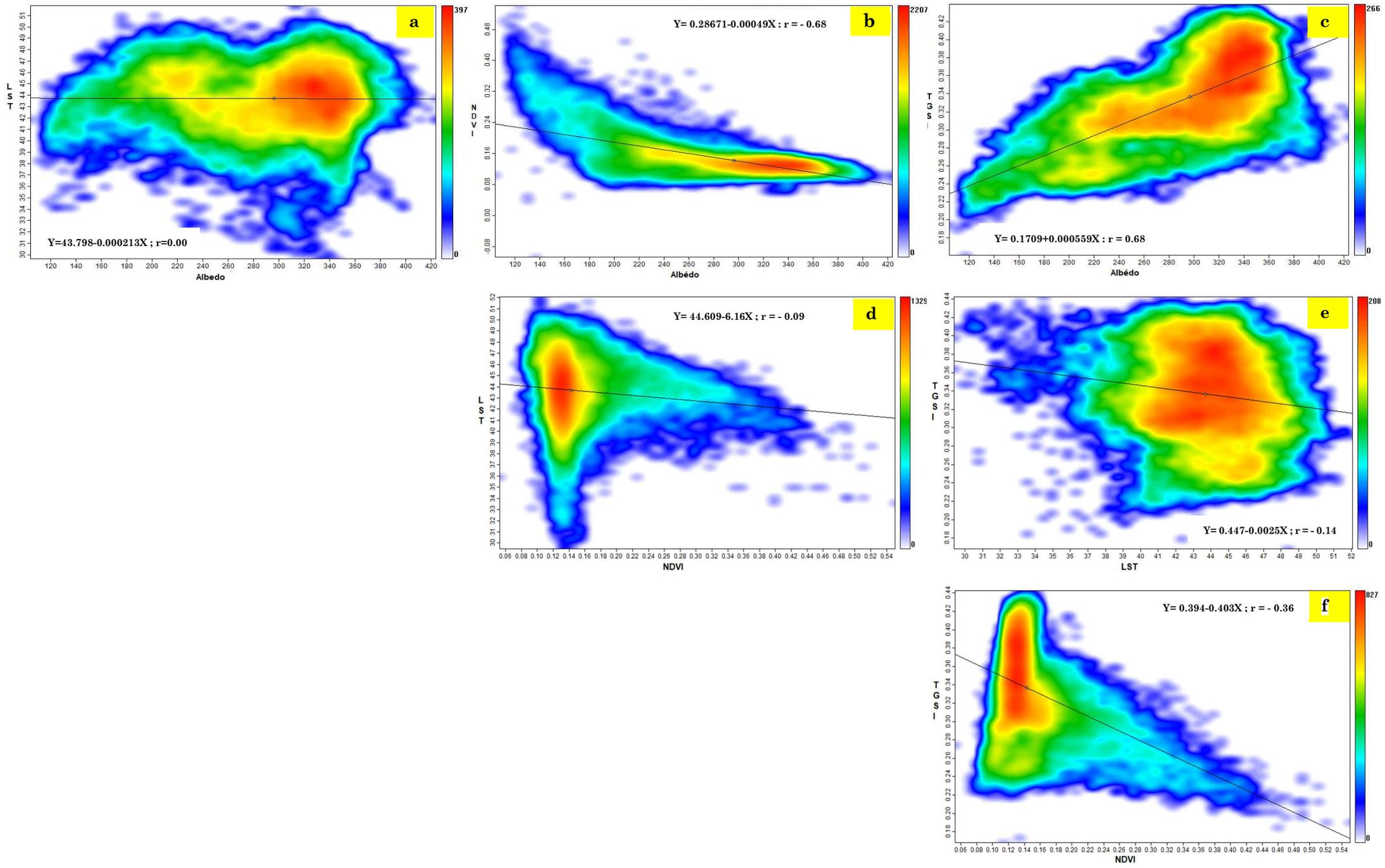


Figure 22 : Indices et corrélation

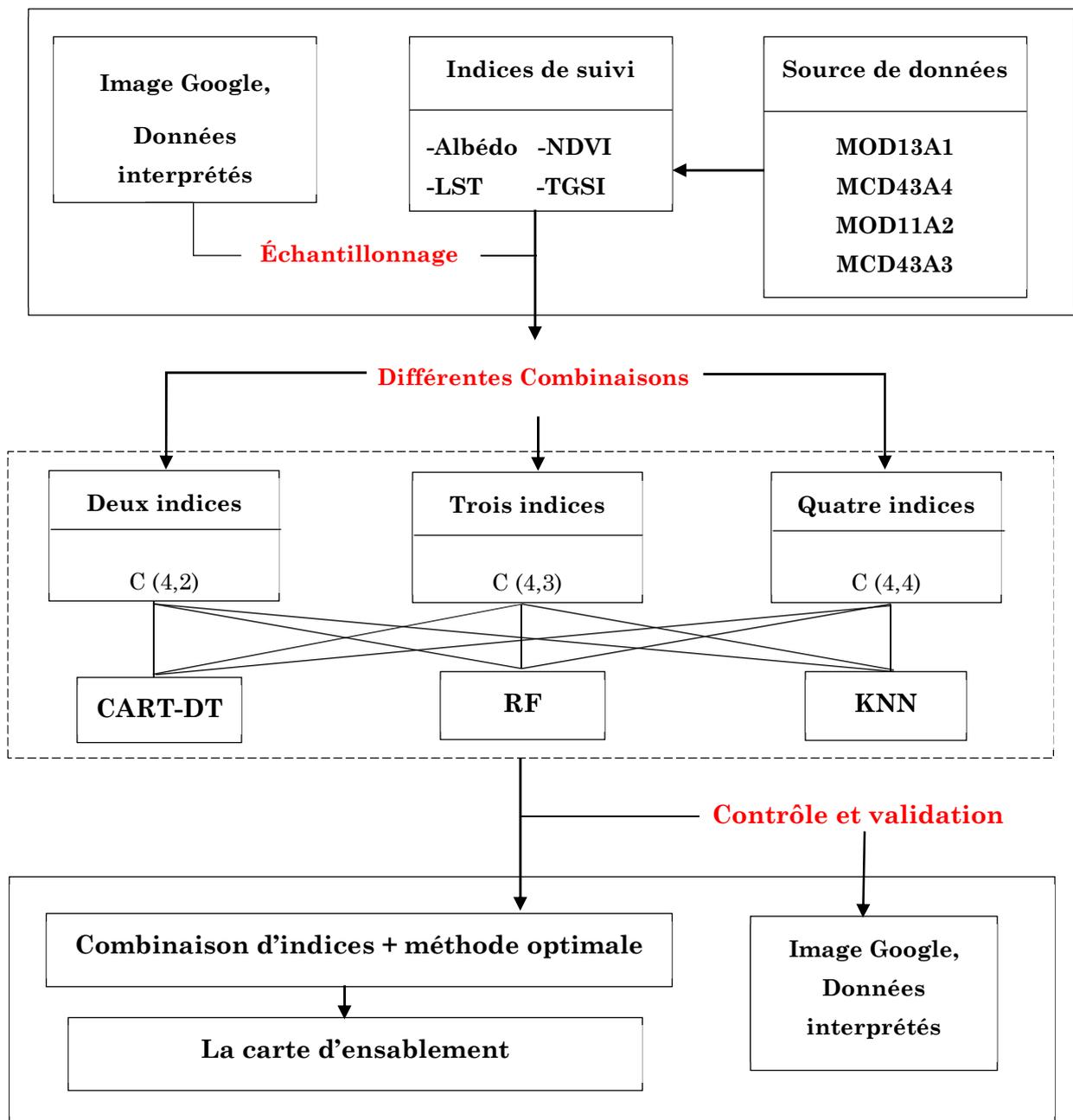


Figure 23 : Processus de combinaison des données, des indices de satellite MODIS et techniques d'apprentissage automatique (DT, RF, KNN)

11. Échantillonnage

Pour réaliser la carte d'ensablement des hauts plateaux occidentaux ; on a adopté la classification supervisée. On a choisi 2978 points bien distribués dans le territoire d'étude dont ; on a une information a priori sur chaque type de ces points à l'aide des photos prises directement du terrain où par l'outil Google-Earth.

L'ensemble des points de l'échantillon est subdivisé en quatre classes distinctes :

Chapitre II

- désertification "Faible" ou insignifiante (F).
- désertification "Moyenne" (M).
- désertification " Sévère" (S).
- désertification "Extrêmement Sévère" (ES).

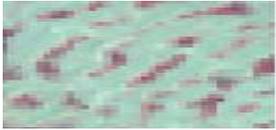
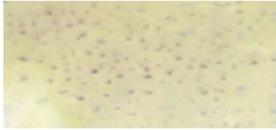
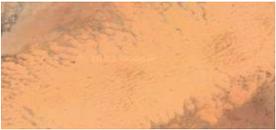
Le critère de choix des classes est basée sur les travaux réalisés par [Feng et al. \(2022\)](#) qui ont classé le paysage désertique en quatre classes citées précédemment ; ils utilisent la combinaison des images Landsat (OLI8) : le rouge, l'infrarouge et le vert et des photos prisent directement du terrain ou par Google earth pour bien distinguer la proportion de la végétation dans ce paysage. En outre, ils ont intégré la notion de texture et quantité de sable pour chaque type de classe pour bien améliorer leurs choix.

Les tableaux 6 et 7 décrivent en détaille les paramètres inclus pour affecter cette classification à l'échantillon choisi.

Tableau 6 : Les classes de la désertification ([Feng et al. 2022](#))

Classe de désertification	Pourcentage du mouvement des dunes de sable (%)	Pourcentage de végétation (%)	Caractéristique du paysage
Faible	<5	50-70	Les dunes mobiles sont tachetées et apparaissent sur le versant en face des vents. La végétation commence à décliner, mais la majeure partie de la zone ressemble toujours au paysage d'origine.
Moyenne	5-25	30-50	Il y a des plantes dégénérées et des piles de sable d'arbustifs bas
Sévère	25-50	10-30	Les dunes de sable sont dans un état à moitié mobile. La proportion de végétation est faible et elle est dispersée.
E Sévère	>50	<10	Les dunes de sable sont dans un état mobile. L'existence de la végétation est presque insignifiante

Tableau 7 : Caractéristiques de la texture des terres désertées

Classe de désertification	Texture	Photos / Google E du paysage	Image Landsat (combinaison Proche-infrarouge , Rouge et vert)
Faible	La végétation est rouge vif et discontinue. Le sable dispersé recouvre les plantes avec des taches laiteuses ou jaunes		
Moyenne	Les dunes de sable fixes et semi-fixes sont représentées sous forme de bandes ou de plaques avec des taches rouges et blanches. La végétation rouge est estimée d'environ 30 jusqu'à 50% de la surface		
Sévère	Les dunes de sable semi-fixes et semi-mobiles sont incomplètes, avec une couleur de base jaune clair ou jaune-blanche et la présence de quelques taches rouges		
E Sévère	Les dunes de sable sont représentés sous forme des ondes, les couleurs dominantes sont le blanc brillant et du jaune clair avec des points rouges		

12. Éléments de contrôle

12.1. ROC et AUC

12.1.1. ROC

Une courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) est un graphique qui montre les performances d'un modèle de classification à tous les seuils de classification. Cette courbe représente deux paramètres (Suresh 2020):

- taux de vrais positifs.
- taux de faux positifs.

Le taux de vrais positifs (TPR = sensibilité) est donc défini comme suit :

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (43)$$

TP : vrai positif

FN : faux négatif

Le taux de faux positifs (FPR = 1-specificité) est défini comme suit :

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (44)$$

FP : faux positif

TN : vrai négatif

Une courbe ROC représente les valeurs TPR et FPR pour différents seuils de classification. La diminution du seuil de classification permet de classer davantage d'éléments comme étant positifs, ce qui augmente le nombre de faux positifs et de vrais positifs. La figure 24 montre une courbe ROC typique(Suresh 2020).

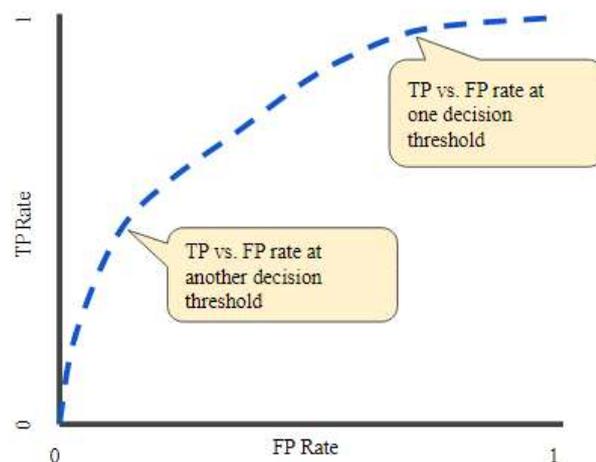


Figure 24 : Le taux de FP (vs) le taux TP au niveau de différents seuils de classification(Narkhed 2018)

Pour calculer les points d'une courbe ROC, nous pouvons évaluer un modèle d'apprentissage automatique (ML) plusieurs fois avec différents seuils de classification, mais cela ne sera pas efficace. Il existe un algorithme plus direct et objectif, basé sur le tri, qui peut fournir ces informations. Il s'agit de l'AUC.

12.1.2. AUC

IL signifie "Area under the ROC Curve" (aire sous la courbe ROC). C'est-à-dire que l'AUC mesure toute l'aire à deux dimensions sous l'intégralité de la courbe ROC, il est compris entre 0 et 1. Une augmentation de l'AUC indique une amélioration des capacités discriminatoires (figure 25a). Un AUC de 0,5 (50%) indique que le modèle est non-informatif (figure 25b) alors que un AUC de 0 est qualifié médiocre (figure 25c)(Narkhed 2018).

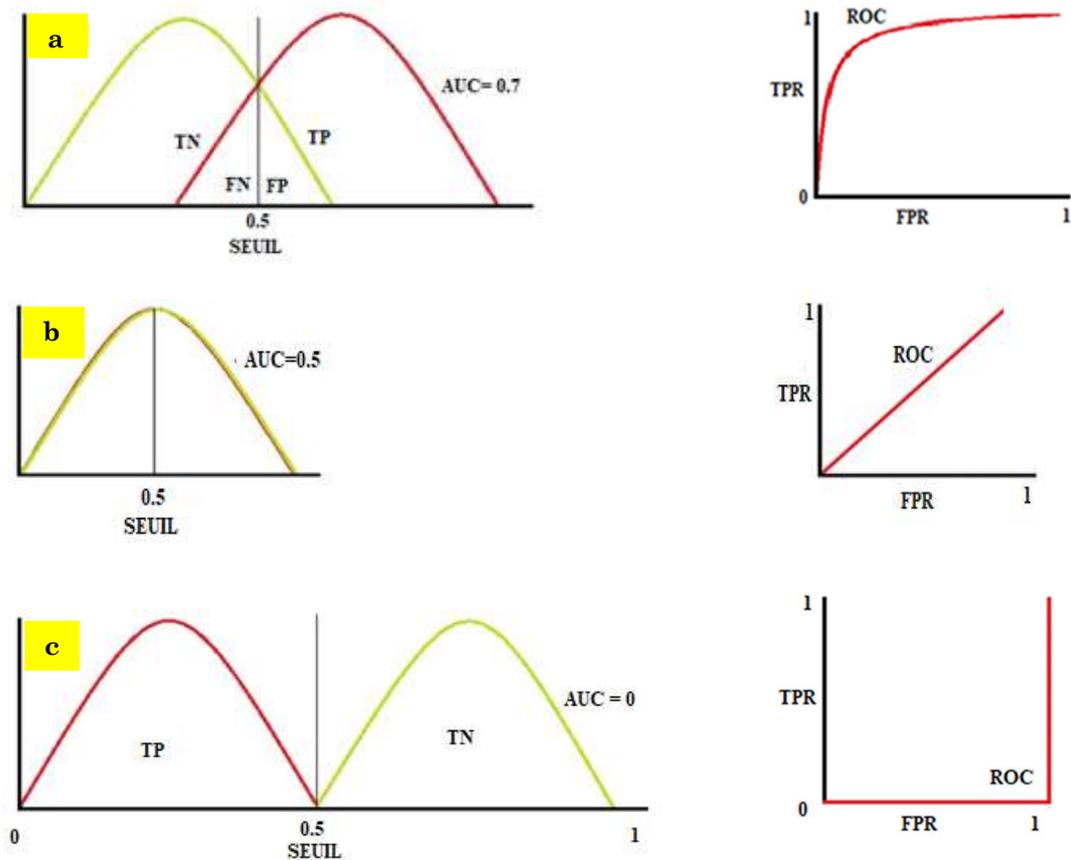


Figure 25 : AUC et ROC (Narkhed 2018)

12.1.3. Estimation et analyse du AUC

Afin de déduire le meilleur choix de la combinaison des indices biophysiques et le type de la méthode d'apprentissage automatique optimale ; On a réalisé la matrice de confusion entre les éléments de l'échantillon prédits et réel pour toutes les classes, puis on a rempli la valeur de la AUC dans le tableau 8 de la manière suivante :

Tableau 8 : Les résultats de la valeur d' AUC pour toutes les combinaisons

Différentes Combinaisons		DT	RF	KNN
		AUC		
C(4,2)	AN	0.666	0.792	0.687
	AL	0.678	0.803	0.699
	AT	0.701	0.863	0.722
	NL	0.684	0.855	0.701
	NT	0.728	0.873	0.745
	TL	0.698	0.866	0.735
C(4,3)	ANL	0.714	0.909	0.741
	ANT	0.734	0.914	0.753
	ATL	0.745	0.915	0.774
	NTL	0.754	0.920	0.777
C(4,4)	ANTL	0.766	0.940	0.794

À partir de ce tableau on a constaté que :

- la précision combinée du modèle RF et de quatre indicateurs (ANLT) est la plus élevée avec un AUC égale à 94% relativement aux autres combinaisons.
- les résultats obtenus par l'application de la méthode RF sont meilleurs relativement aux autres méthodes d'apprentissage automatique.
- les valeurs du AUC de la méthode KNN est meilleurs, si on les compare aux valeurs d'AUC produites par la méthode DT.
- presque toutes les combinaisons à trois indices donnent des bons résultats du AUC par rapport aux combinaisons à deux indices quel que soit la méthode de l'apprentissage adoptée.
- la présence du paramètre biophysique LST dans une combinaison donne une précision relativement faible par rapport aux autres combinaisons qu'ont de nombre d'indices similaires.
- la présence de deux type d'indices biophysiques NDVI et TGSi dans n'importe quelle combinaison est toujours sa valeur de AUC est plus grande relativement aux combinaisons de même nombre d'indices (Ex : NT Vs AN, AL, AT, NL TL ou NTL vs ATL, ANT, ANL).
- la combinaison d'indice biophysique albédo et NDVI (AN) présente la valeur de AUC la plus faible (RF : 0.79, DT : 0.66, KNN :0.68).

Celles les combinaisons ANTL, NTL, NT sont choisies par leur bonne qualité du AUC afin de les introduire dans une autre évaluation qu'est l'analyse de paysage.

L'analyse de paysage adoptée dans cette étude est l'analyse de séparation et l'analyse de fragmentation.

Dans la section qui suit, on réintègrera la combinaison AN (défini par sa valeur faible du AUC) avec les autres combinaisons qui ont de AUC très élevées (ANTL, NTL, NT) dans l'analyse du paysage pour mettre en valeur notre sélection.

12.2. Paysage et patches

12.2.1. Notion de paysage

Le paysage naturel est une zone de terrain contenant une mosaïque de patches où d'éléments observables à caractères naturels, semi-naturel, humains ... (Forman 1990) par exemple : paysage forestier, rural, écologique, industriel, urbain etc.

Les principaux éléments qui composent le paysage sont : patches, matrices et limites (edges en anglais) (figure 26).

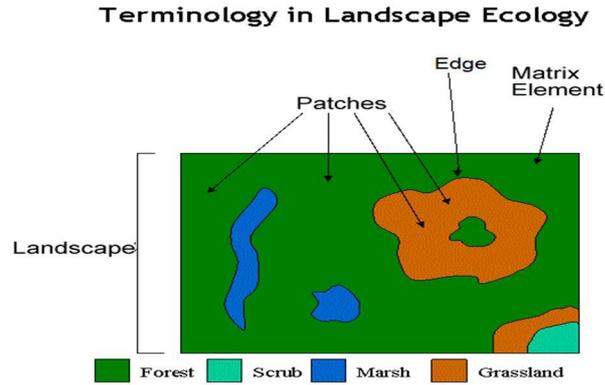


Figure 26: Principaux éléments d'un paysage (SHU 2023)

12.2.2. Notion de patch

Il est défini comme étant l'élément du paysage qui représente la surface la plus petite. Ces patches peuvent être isolés entre eux par une matrice (Fahrig 2003).

12.2.3. Indice de fragmentation

Pour évaluer le choix de la méthode d'apprentissage automatique optimale avec la combinaison du ou des meilleurs indices biophysiques engendrés à partir des images MODIS ; une analyse d'indice de fragmentation de paysage (carte de désertification) sera intégrée (Feng et al. 2022).

Il est utilisé pour définir le degré de segmentation d'un paysage et la complexité de sa structure spatiale (Sui and Zeng 2001). Sa formule est déterminée comme suit :

$$FN_1 = \frac{N_p - 1}{N_c} \quad (45)$$

Où : FN_1 est l'indice de fragmentation de tout le paysage.

N_p est le nombre total de patches de tout le paysage.

N_c représente le rapport entre la surface totale du paysage et la plus petite surface des patches de toutes classes confondues.

$FN_1 \in [0,1]$. La valeur 0 indique que le paysage est complètement non endommagé (intact) et la valeur 1 signifie que le paysage est complètement détruit.

Une portion d'image de 16992 pixels a été choisie aléatoirement tirée à partir des cartes de désertification réalisées par les combinaisons (AN, NT, NTL, ANTL) en plus des méthodes d'apprentissage (RF, DT, KNN) où elles montrent les classes de désertification obtenues (F : Faible, M : Moyenne, S : Sévère, ES : Extrêmement Sévère). Les résultats obtenus sont montrés par la figure 27.

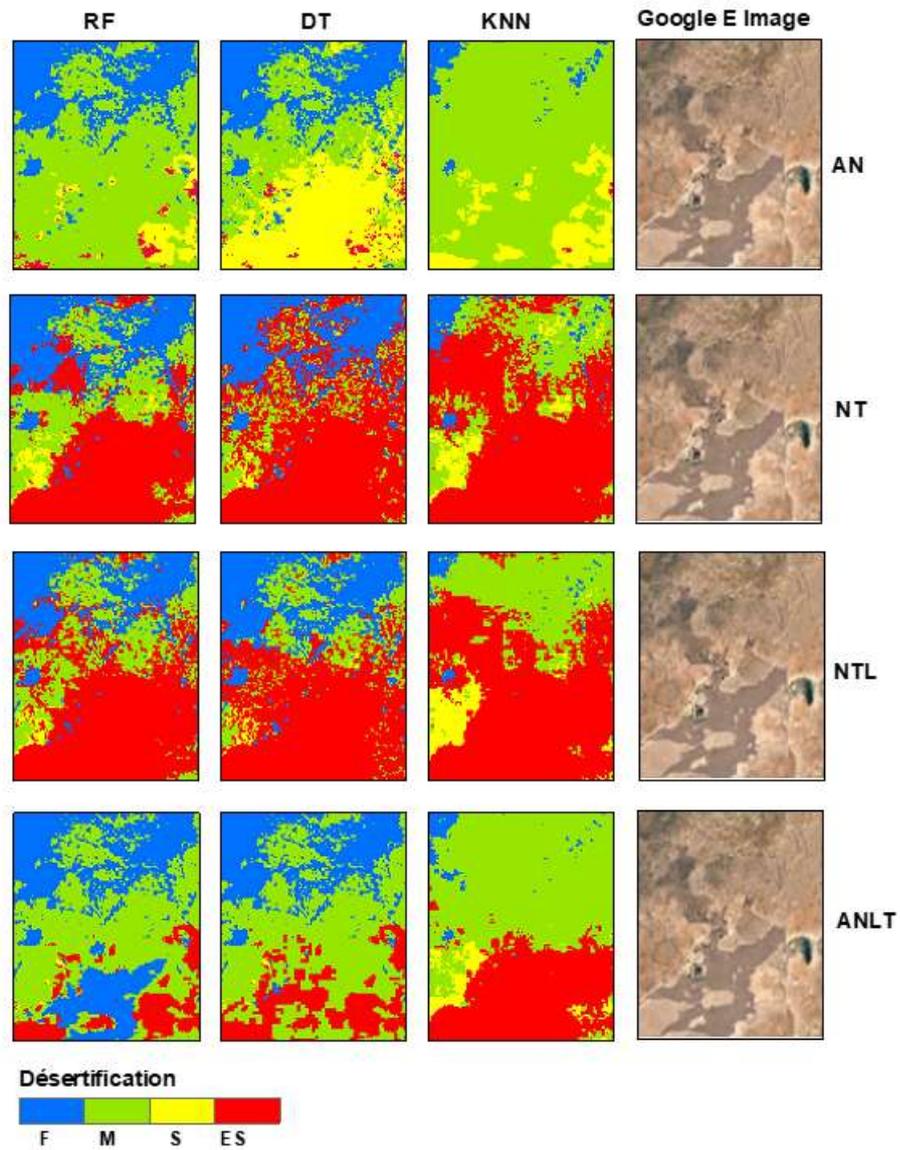


Figure 27: La carte de désertification obtenue à partir des différentes combinaisons en plus de toutes les méthodes d'apprentissage

Le tableau 9 décrit les différentes procédures nécessaires pour calculer l'indice de fragmentation d'un paysage naturel du phénomène de la désertification.

Tableau 9 : L'indice de fragmentation appliqué à la désertification basé sur les différentes combinaisons

Technique de d'apprentissage automatique	Indice	Nombre de patches	La plus petite surface (Km ²)	Surface du paysage (Km ²)	N _p	FN1
RF	AN	4019	0.214659	62997.46	293476.90	0.0137
	TN	7468	0.137463	62997.46	458286.66	0.0163
	NTL	8211	0.137463	62997.46	458286.66	0.0179
	ANTL	4095	0.137463	62997.46	458286.66	0.0089
DT	AN	9260	0.137463	62997.46	458286.66	0.0202
	TN	10766	0.137463	62997.46	458286.66	0.0235
	NTL	9795	0.137463	62997.46	458286.66	0.0214
	ANTL	4186	0.137463	62997.46	458286.66	0.0091
KNN	AN	1868	0.337463	62997.46	186679.60	0.0100
	TN	6024	0.177463	62997.46	354989.26	0.0170
	NTL	5284	0.177463	62997.46	354989.26	0.0149
	ANTL	3197	0.177463	62997.46	354989.26	0.0090

12.2.4. Indice de séparation

L'indice de séparation est un indice qui définit le degré de dispersion (agglomération) de la distribution des différents patches dans un paysage. Il est calculé de la manière suivante :

$$N_i = \frac{D_i}{S_i} \quad (46)$$

Où N_i est l'indice de séparation de paysage de type i (classe i).

D_i est l'indice de distance du paysage de type i (classe i), il est défini comme suit :

$$D_i = 0.5 * \sqrt{\frac{n}{A}} \quad (47)$$

Où n est le nombre de patches du paysage de type i (classe i).

A est la surface totale de la zone d'étude (paysage) en (km²)

S_i est l'indice de surface de paysage de type i . il est calculé comme suit :

$$S_i = \frac{A_i}{A} \quad (48)$$

A_i est la surface de paysage de type i .

Le degré de séparation est utilisé pour analyser les caractéristiques de distribution spatiale des éléments du paysage. Plus le degré de séparation est grand, plus les patches sont discrets et plus la distance entre les patches est grande.

Le tableau 10 décrit les différentes procédures nécessaires pour calculer l'indice de séparation du phénomène de la désertification de type i (classe). La classe choisie dans cette étude est celle de l'extrêmement sévère (ES) du phénomène de la désertification.

Tableau 10 : L'indice de séparation appliqué à la désertification basé sur les différentes combinaisons

Technique de d'apprentissage automatique	Indice	Nombre de patches	La surface A (Km ²)	La surface Ai (Km ²)	Di	Si	Ni (ES)
RF	AN	1361	62997.46	3313.475	0.073	0.053	1.40
	TN	3536	62997.46	10732.687	0.118	0.170	0.70
	NTL	3502	62997.46	11939.025	0.118	0.190	0.62
	ANTL	1780	62997.46	8616.410	0.084	0.137	0.61
DT	AN	3280	62997.46	6304.318	0.114	0.100	1.14
	TN	1437	62997.46	26311.819	0.076	0.418	0.18
	NTL	2478	62997.46	26085.354	0.099	0.414	0.24
	ANTL	2621	62997.46	12274.198	0.102	0.195	0.52
KNN	AN	1395	62997.46	723.830	0.074	0.011	6.48
	TN	966	62997.46	22184.786	0.062	0.352	0.18
	NTL	1241	62997.46	20780.488	0.070	0.330	0.21
	ANTL	773	62997.46	8428.368	0.055	0.134	0.41

12.2.5. Analyse et évaluation

À partir des tableaux 9 et 10 :

- il est remarquable que l'indice de fragmentation et l'indice de séparation qui correspond à la méthode d'apprentissage automatique RF diminuent quand les valeurs du AUC de la même famille augmentent.
- la même remarque était observée pour la méthode d'apprentissage DT, on distingue que les valeurs de l'indice de paysage pour cette méthode (séparation et augmentation) sont faibles par rapport à la méthode RF et quand les valeurs de l'indice de paysage diminuent, les valeurs du AUC augmentent mais les valeurs du AUC restent toujours faibles par rapport aux résultats obtenus par la méthode RF.
- les valeurs de l'indice de paysage produites par l'application de la méthode KNN n'ont pas la même tendance observée par rapport aux autres méthodes et elles ne respectent pas la même tendance établie par la variation du AUC.
- l'indice de paysage observé par la combinaison AN, enregistre les valeurs les plus élevées alors que ses AUC correspondent les valeurs les plus faibles.

- selon [Feng et al. \(2022\)](#) ; la méthode KNN est largement exploitée dans les phénomènes à des échelles très petites comparée à la méthode RF où elle donne des bons résultats lorsque le phénomène étudié est à une échelle grande ou moyenne.
- parmi les avantages prometteurs de la méthode RF ; elle évite les problèmes de sur-apprentissage engendrés par la méthode DT ([Ma et al. 2017](#)).
- actuellement, le RF devient la méthode d'apprentissage automatique la plus utilisée pour la classification dans la plateforme GEE ([Tamiminia et al. 2020](#)).

On remarque que l'application de l'indice de paysage dans ce type de phénomène n'est pas totalement déterministe mais il peut aider à avoir une vision globale de l'application de combinaisons et méthodes d'apprentissages automatiques.

À partir de la figure 27, et l'analyse de la tendance de combinaison AN, on peut déduire que la combinaison ANTL avec la méthode d'apprentissage automatique RF est plus favorable pour réaliser la carte de désertification :

- À un AUC est le plus grand.
- À un indice de paysage significatif.
- À une classification la plus proche de la réalité.

13. Résultats

13.1. Statut actuel de la désertification dans HPO

13.1.1. Statut régional

La figure 28 montre la carte de désertification de la région des hauts plateaux occidentaux (HPO) réalisée à partir des paramètres biophysiques constitués de l'albédo, LST, TGSi et NDVI récoltés dans la période 2000-2023.

La combinaison adoptée dans cette étude est celle de ANTL avec la méthode d'apprentissage automatique "RF".

La carte de la désertification est composée de quatre classes qui sont : la classe faible où la désertification est insignifiante, la classe "moyenne", la classe "Sévère" et la dernière classe est celle d'extrêmement sévère ou "ESévère".

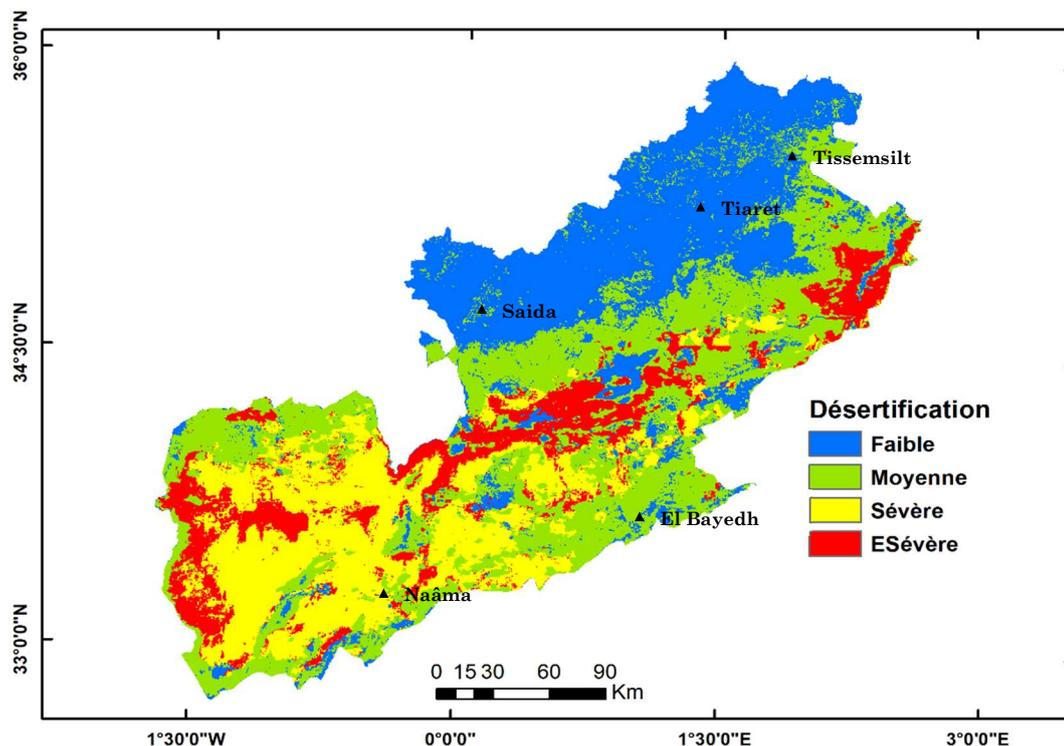


Figure 28 : Distribution spatiale de la désertification dans la région du HPO

Il est remarquable que la distribution de la classe " Faible" est concentrée dans le nord avec une proportion qui arrive jusqu'à 30% de la totalité de la surface du HPO (figure 29) qui est équivalente à 21666 km². La deuxième classe est celle de la classe "Moyenne" ; elle est concentrée dans le centre et les alentours du HPO. Elle a la plus grande proportion par rapport autres classes, elle couvre presque 35% de la surface totale du HPO qui est équivalent à 25281 km² (figure 29).

En ce qui concerne la troisième classe dont la désertification est considérée comme étant "Sévère", elle occupe environ 20% du HPO (figure 29) qui est équivalente à 16495 km². Elle occupe la partie nord de Naâma et d'El Bayedh.

La dernière classe est nommée "ESévère" dont l'état des terres est considéré la plus grave. Elle occupe environ 15% de la totalité de la surface du HPO (figure 29) qui équivalente à 10045 km² et elle est considérée comme la surface la plus petite relativement aux autres. Elle se concentre dans le centre du HPO là où il y a des Sebkhha (El khaïther, Roggasa et Ain skhona), la partie nord-ouest de Naâma et le sud de Tiaret dans la région de Serghine et Zmalet el Amir AbdeElkader.

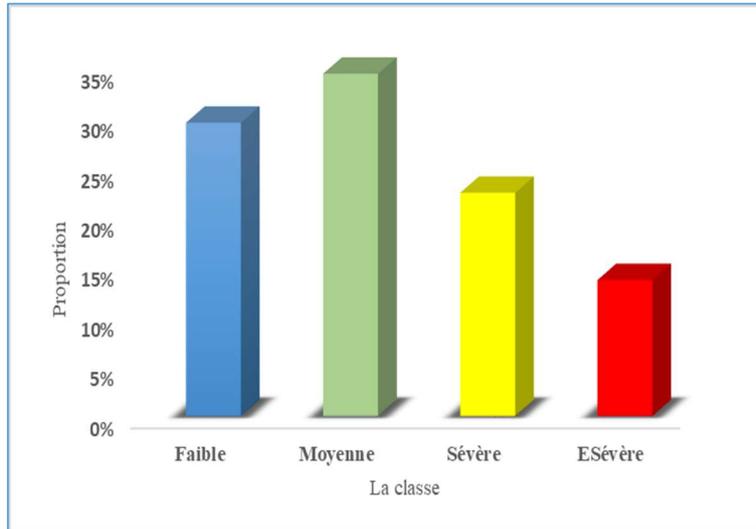


Figure 29: Proportion des classes de la désertification dans HPO

13.1.2. Statut local

Wilaya de Tissimsilt

La wilaya de Tissimsilt se retrouve dans l'extrême nord-est du HPO, sa surface est environ 3300 km² (5% du HPO). La carte de la désertification dans cette wilaya est marquée par l'existence de deux types de classe : la première classe est la classe "Faible", elle domine la totalité de la surface de la wilaya, la deuxième classe est celle de la "Moyenne" ; elle occupe environ 17% de la surface totale, elle se concentre dans le sud et le sud-est de la wilaya (figure 30).

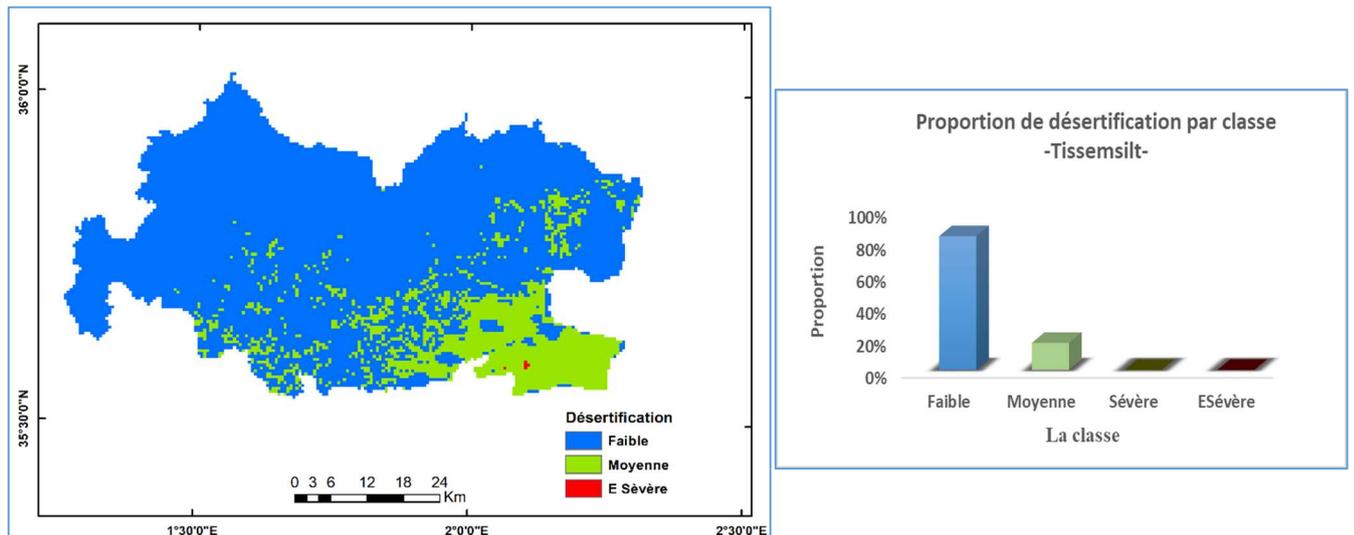


Figure 30 : Distribution spatiale de la désertification dans la wilaya de Tissemsilt

Wilaya de Tiaret

La wilaya de Tiaret se localise dans le nord central du HPO, elle a une surface qui est égale à 20786 km² (32% du HPO). La carte de la désertification est caractérisée par l'existence de quatre types de classe. La première classe est la classe "Faible" ; elle occupe environ 50% de la surface de la wilaya, elle se concentre dans le nord et est entrecoupé par une autre classe qu'est la classe "Moyenne". Cette dernière est localisée dans le centre de la wilaya, elle occupe environ 45% de la surface. La classe "Sévère" représente la classe la plus faible relativement aux d'autres classes, elle est équivalente à 600 km² (3%) et elle se propage sous forme de taches intermittentes dans le sud-ouest de la wilaya (figure 31). En ce qui concerne la classe "ESévère", elle représente 10% de la surface totale de la wilaya, elle se rencontre dans le sud-est ; dans la région de Serghine, Zmalet el Amir Abdelkader et Faidja et le sud-ouest : Sidi Abderahman, Chehaima et Ain dhab.

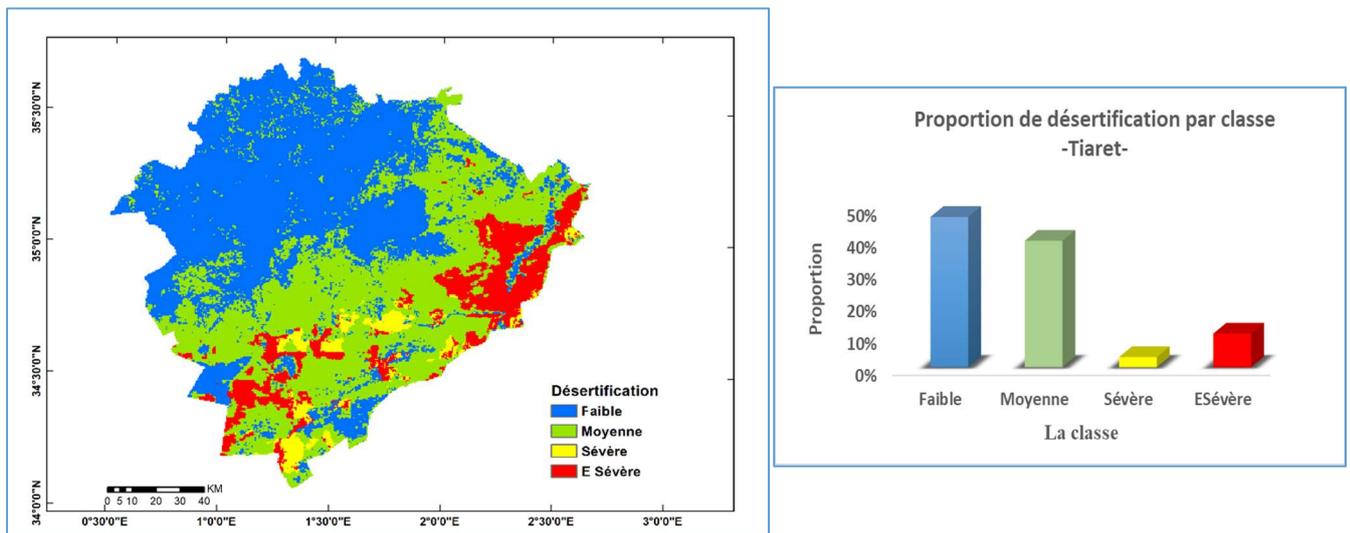


Figure 31 : Distribution spatiale de la désertification dans la wilaya de Tiaret

Wilaya de Saïda

La wilaya de Saïda occupe une surface de 6987 km² qui est équivalente à 11% de la surface du HPO. La carte de la désertification (figure 32) est caractérisée par deux types de classes de désertification, la première classe est celle de niveau "Faible" ; c'est une classe dominante dans cette wilaya, elle occupe environ 70% de la surface de la wilaya et elle est concentré dans le nord. La deuxième classe est la classe "Moyenne", se retrouve dans le sud de la classe précédente et occupe environ 30%. En ce qui concerne les autres classes ; ses proportions sont insignifiantes.

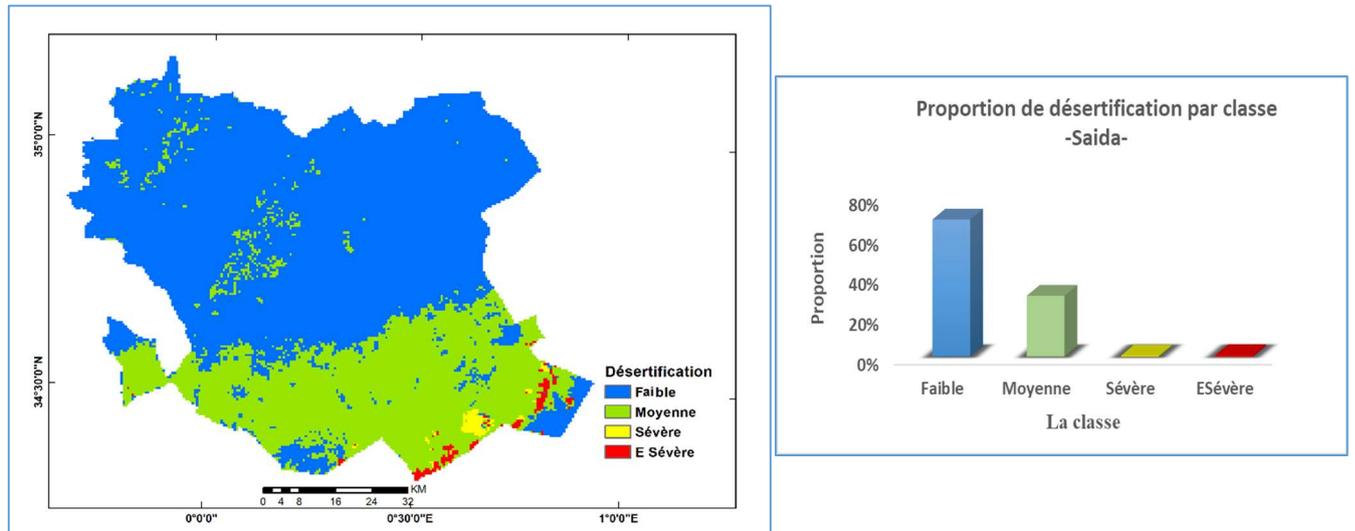


Figure 32 : Distribution spatiale de la désertification dans la wilaya de Saïda

Le nord de Naâma

Le Nord de Naâma occupé une surface d'environ 21817 km² (34% du HPO). Il se localise dans l'extrême sud-ouest du HPO. La carte de désertification dans cette région est marquée par l'existence de quatre types de classes (Faible, Moyenne, Sévère et ESévère) (figure 33). La classe de type "Faible" représente la proportion la plus faible comparée à la même classe dans les autres régions. Elle occupe environ 700 km² (3% de la surface de la région). La classe de type "Moyenne" se retrouve dans les alentours de la région c-à-dire dans le nord et le sud et elle est équivalente de 5935 km² (27% de la surface de la région). En ce qui concerne la classe "Sévère" ; elle occupe environ 50% de la surface de la région et elle concentre dans le centre et l'est. La dernière classe est la classe de type "ESévère" ; elle a une surface égale à 4260 km² (20% de la surface de la région). Elle est concentrée dans le centre et l'extrême ouest dans les communes de Kasdir et Makmen Ben Amar et on peut la retrouver aussi dans la commune d'El biod dans les zones frontalières avec la commune d'El kheither.

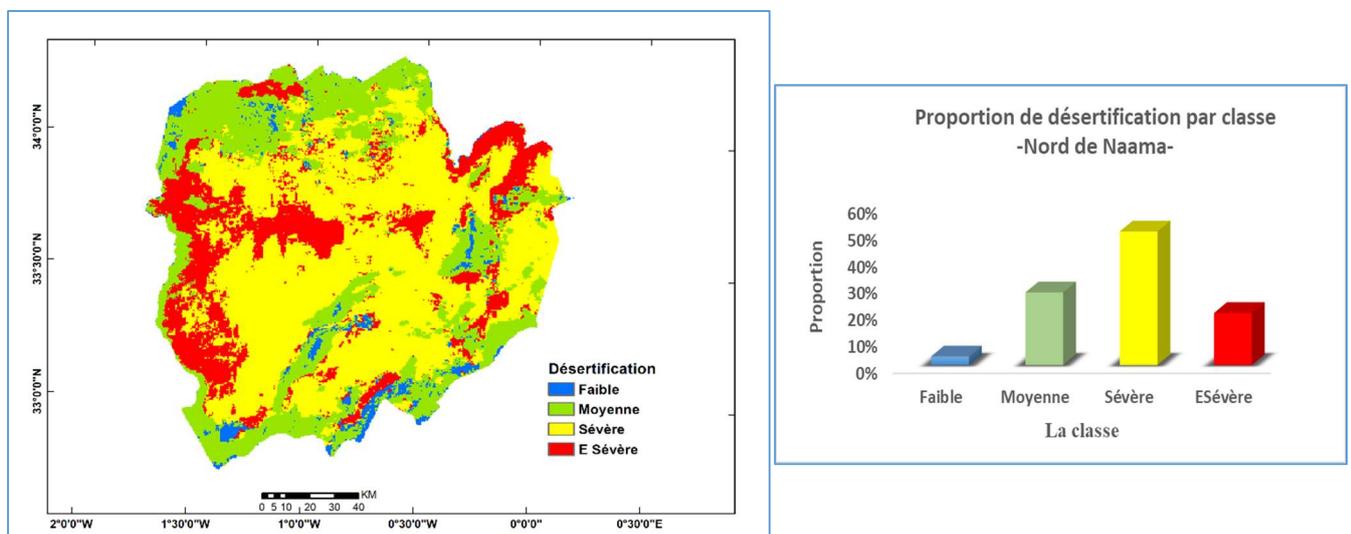


Figure 33 : Distribution spatiale de la désertification dans le nord de Naâma

Le nord d'El bayedh

La région nord d'El bayedh occupe une surface de 12206 km² (18% du HPO). La carte de la désertification dans la région se distingue par l'existence de quatre types de classe de désertification (Faible, Moyenne, Sévère et ESévère) (figure 34). La classe dominante est de type "Moyenne" elle occupe environ 45% de la totalité de la surface de la région et se rencontre dans la partie centrale de la wilaya (Bougtoub) et le sud.

La deuxième classe en matière de dominance est celle de de la classe de type "Sévère" ; elle occupe environ 25% de la surface de la région. Elle est concentrée dans le centre (Bougtoub et Kef El Ahmar) et le sud-ouest (Tousmouline et Elmehara) et quelques zones du nord de la commune d'El kheither.

Le troisième type de classe est celui de "ESévère", elle occupe environ 19% de la surface de la région. Elle est concentrée dans le nord d'une manière continue dans les communes de Rogassa et el kheither.

La dernière classe présente dans cette carte est celle de la classe "Faible" ; elle occupe une surface de 1200 km² et peut se retrouver dans un état sporadique dans les quatre coins de la wilaya.

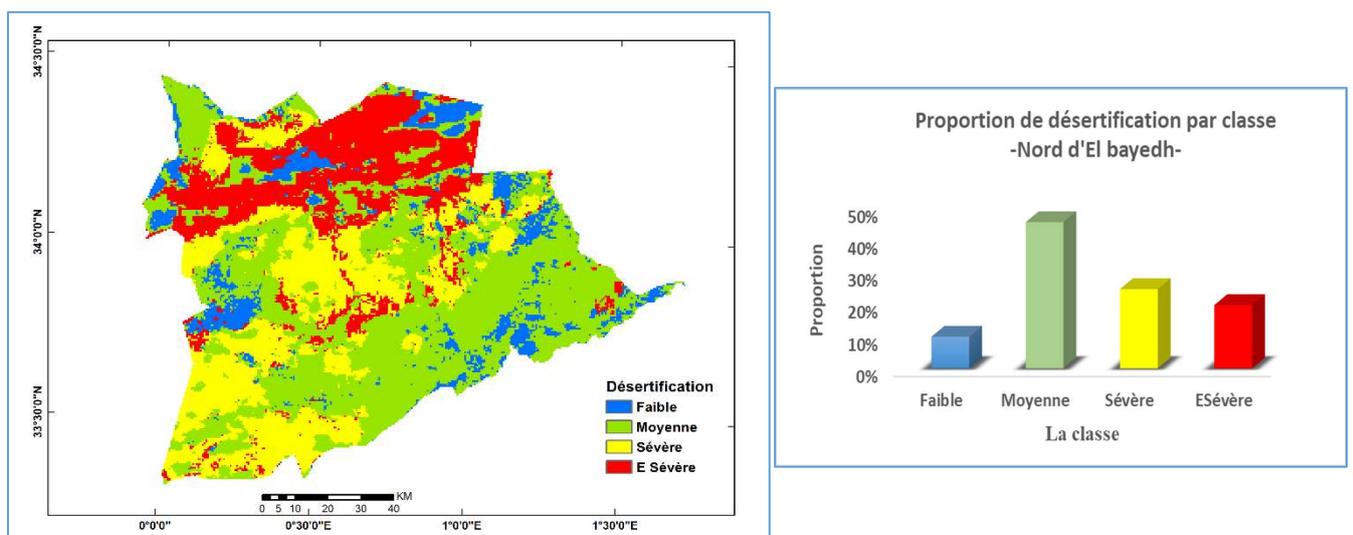


Figure 34: Distribution spatiale de la désertification dans le nord d'El bayedh

14. Contribution des Indices

Pour contrôler la contribution individuelle de chaque indice dans chaque type de classe, on fait extraire un échantillon aléatoire d'une portion d'image, composé de 16922 pixels à partir de la carte de la désertification classifiée par la combinaison ANTL et la méthode d'apprentissage "RF" (figure 35).

À partir de cette portion de la carte de désertification, on a extrait leurs homologues aux niveaux des cartes d'indices biophysiques (Albédo, NDVI, TGSI et LST) et avec lesquelles, nous pouvons établir des boîtes à moustache (box plot), par la suite (figure 36).

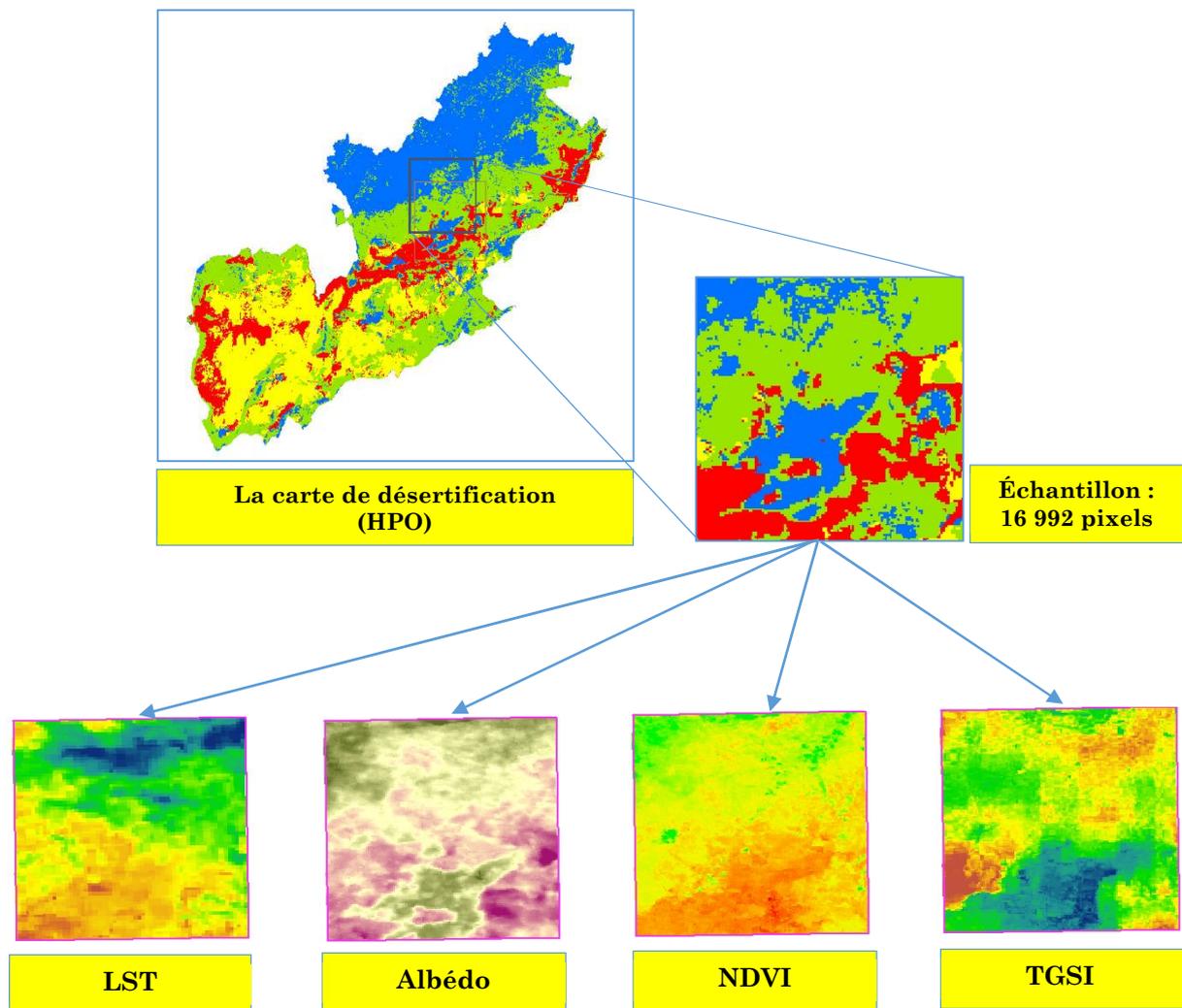


Figure 35 : Échantillonnage de la contribution individuelle des indices dans la classification de la désertification

La contribution de chaque type d'indice dans la réalisation de la carte de désertification variait avec les limites d'intervalles de chaque classe. Pour la classe de type "ESévère", les indices de TGSI, NDVI et LST ont la capacité de la discriminer des autres classes (Faible, Moyenne et Sévère) contrairement à l'indice de type Albédo (figure 36b). La contribution de l'NDVI (figure 36d) est très remarquable pour la séparation de toutes les classes de désertification. La contribution de l'albédo est très bonne dans la séparation des deux premières classes (Faible et Moyenne) et modérée avec la classe Sévère. LST (figure 36a) a également la possibilité de discriminer les classes (Faible, Sévère et ESévère) avec une excellente performance et elle a la difficulté de les séparer de la classe "Moyenne".

D'après la figure 36c, le résultat obtenu par la contribution de TGSI dans l'établissement de la carte de désertification n'a pas la capacité de séparer les classes : "Faible", "Moyenne" et "Sévère".

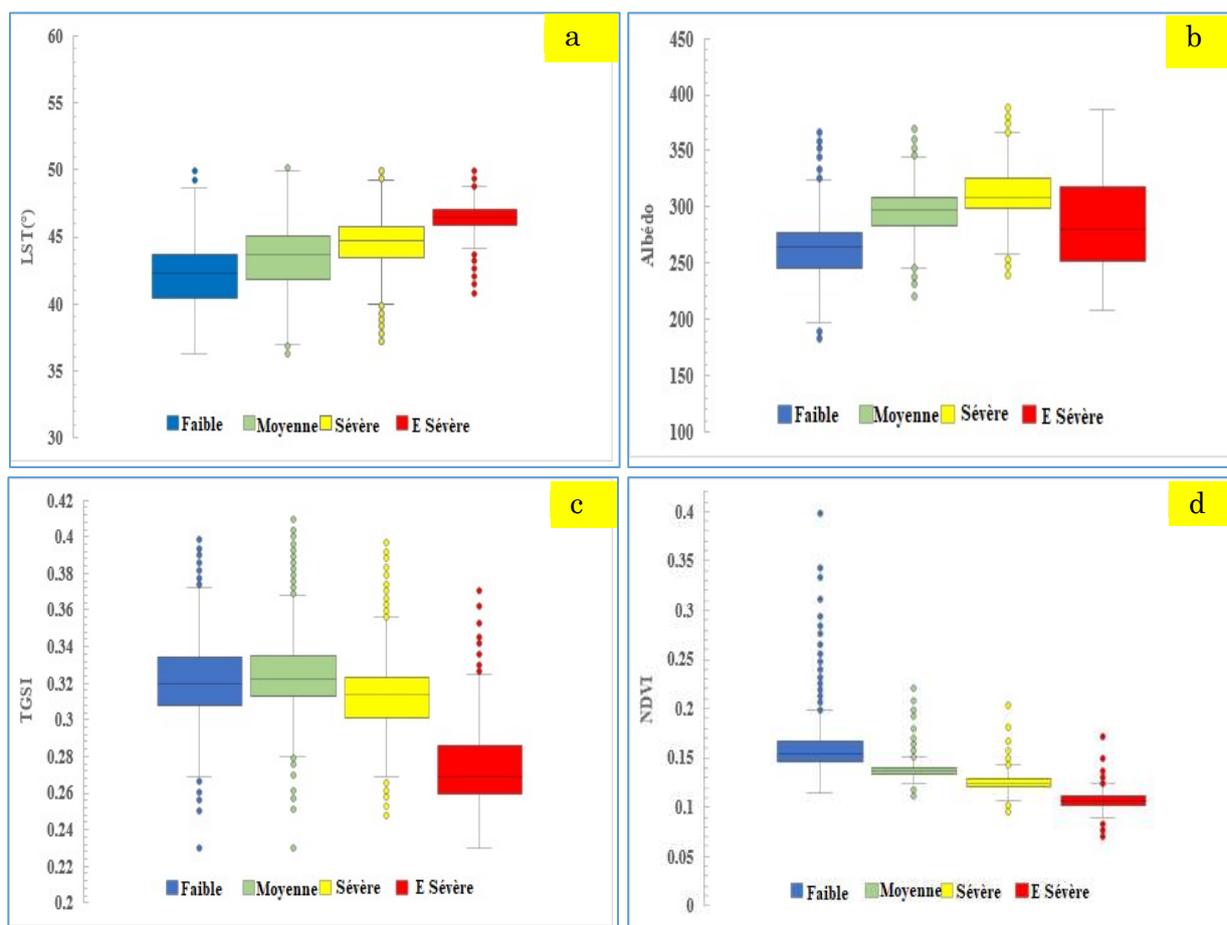


Figure 36 : Seuil de contribution des indices dans l'établissement de la carte de désertification

15. Discussion

Bien que les processus biophysiques de la désertification à l'échelle locale (HPO) ont fait l'objet de recherches approfondies à travers des observations à long terme et in-situ, à savoir [Aïdoud et al.\(2006\)](#); [Aidoud and Touffet \(1996\)](#); [Nedjraoui \(2003\)](#); [Nedjraoui and Bédrani \(2008\)](#).

Les recherches sur la variabilité spatio-temporelle de la désertification, et en particulier l'ensablement à petites échelles, font actuellement défaut et nécessitent une exploration plus approfondie.

À l'échelle nationale, deux études ont été mentionnées, menées respectivement par [Benslimane et al. \(2008\)](#) et [Benguerai \(2011\)](#) qui ont exploité les paramètres de l'albédo, la température de surface et l'NDVI pour établir la carte d'ensablement par l'intégration d'images MODIS.

L'étude établie par [Benguerai \(2011\)](#) a visé le sud oranais comme région pilote de sa recherche, alors que [Benslimane et al. \(2008\)](#) ont pris en considération tout le nord de l'Algérie. Les deux études ont pris uniquement une courte série temporelle ne dépassant pas cinq ans, de plus leurs recherches ont manqué d'outils d'évaluation et de validation.

Dans notre étude, tout comme [Wei et al. \(2018\)](#) , [Feng et al. \(2022\)](#) et [Jiang et al. \(2023\)](#) nous avons intégré quatre paramètres biophysiques, à savoir l'albédo, la température de surface, l'NDVI et le TGSI, en élargissant la plage d'étude des séries temporelles sur une durée de 23 ans. Afin de valider la carte d'ensablement réalisée, nous avons incorporé trois moyens de validation tels que l'indice de séparation, l'indice de fragmentation et le taux du surface au-dessous de la courbe de ROC. Ces trois outils ont montré une bonne cohérence en terme de validation, similaire aux résultats obtenus par [Feng et al.\(2022\)](#) et [Jiang et al. \(2023\)](#) , qui' ont utilisé ces mêmes outils pour valider la carte d'ensablement en Chine; précisément dans les région de "Mu Us Sandy Land" et le nord de la Chine respectivement.

Les deux études [Benguerai \(2011\)](#) et [Benslimane et al. \(2008\)](#) ont conclu que le paramètre de NDVI est l'élément crucial dans établissement de la carte de l'ensablement. Cependant dans notre étude, en plus de l'NDVI, nous avons constaté que le paramètre TGSI représente également un élément important dans la réalisation de cette carte.

L'intégration de ce paramètre (TGSI) a fait une bonne différenciation dans l'identification des zones les plus désertifiées (E Sévère) avec un taux de signification (p-value) inférieur à 5%. Par conséquent, son effet a été clairement montré dans les zones où le sable était prédominant (exemple : l'extrême ouest de la commune d'El-kasdir, nord de Mecheria, Kef-lahmar).

Comparativement à l'étude menée par [Feng et al. \(2022\)](#), notre recherche a démontré que la combinaison des paramètres biophysiques "ANTL" avec la méthode d'intelligence artificielle "RF" constitue le choix le plus optimal pour établir la carte de l'ensablement. Cependant, la précision de la classification obtenue par [Feng et al. \(2022\)](#) est supérieure à celle de notre étude, et cela s'explique principalement par la qualité de l'échantillon choisie et à la nature de la région étudiée.

Toujours en comparant les résultats obtenus par notre étude, et celle de [Feng et al. \(2022\)](#), l'implication du paramètres TGSI dans l'étude établie par ces derniers permet de bien séparer les classes de désertification "Faible", "Moyenne", "Sévère" et "ESévère" entre elles avec un taux de signification (p-value) inférieur à 5%, alors que dans notre étude, cette contribution est observée uniquement pour la classe "ESevère" (figure [36c](#)).

Contrairement à l'étude menée par [Feng et al. \(2022\)](#), où la contribution du parametre de l'NDVI dans la séparation des classes de désertification est faible, dans notre étude, cette implication a une contribution très remarquable (p-value < 5%) (figure [36d](#)).

Pour les deux autres parametres, la température de surface (LST) et l'albédo, les deux études ont conclu que LST n'a pas d'influence perceptible dans la séparation des classes de désertification (p-value > 5%) (figure [36a](#)). Quant à l'albédo, sa contribution dans la séparation des classes de l'ensablement varie de bonne pour les classes "Faible", "Moyenne" , "Sévère" (p-value inférieur à 5%) à médiocre pour la classe de type "ESévère"(p-value supérieur à 5%).

L'intégration de l'imagerie satellitaires multi spectrale et hyper spectrale dans l'étude des phénomènes régionaux de telle complication comme la désertification présente une solution importante dans l'observation des facteurs impliqués dans ce phénomène.

Depuis les années 2000, le suivi des paramètres biophysiques à des fins écologiques et environnementaux (en particulier l'ensablement), est devenu l'une des pistes les plus explorées dans plusieurs pays de sud, principalement, la Chine, l'Inde, l'Iran, le Mexique, la Mongolie, la Tunisie ... etc (Duan et al. 2019), (Pi et al. 2020), (Lyu et al. 2022).

L'Algérie fait partie des pays qui n'ont pas échappé aux répercussions engendrées par ce phénomène. Dans ce cadre, cette étude vient de montrer la contribution des paramètres biophysiques dans la cartographie de la désertification. Elle représente, aussi un appui crédible pour les futures recherches qui s'intéressent au suivi de ce phénomène dans la région.

16. Évolution spatio-temporelle de la désertification

16.1. Évolution globale

Depuis les années 1960, le réchauffement climatique provoqué par les activités humaines et le changement appliqué à l'occupation du sol (LULC) a aggravé le problème de la dégradation des parcours et la désertification dans le HPO.

Quant au but de suivre l'évolution du phénomène de la désertification dans la région ; on a réalisé deux cartes de désertisation dans deux périodes différentes : 2000 et 2023 avec les mêmes conditions de procédures et de traitement (figure 37).

La figure 38 montre que le HPO a connu une diminution de la surface de la classe "Faible" de 43% de la surface totale en 2000 à 30% en 2023, ceci montre que la classe de type "faible" a perdu plus que le 1/10 de sa surface, tandis que la classe de type "moyenne" a gagné plus de terrain en 2023 qu'en 2000. En ce qui concerne la classe de type "Sévère", on remarque qu'il y a une stagnation de sa surface entre les deux périodes ; bien qu'elle ne conserve pas les mêmes terrains, mais elle a gardé la proportion de sa surface par rapport à la surface totale.

Pour la dernière classe qu'est "ESévère", il est clair que la surface de cette classe a augmenté de 8% en 2000 à 14% de la surface totale en 2023.

Il y a lieu de savoir que les quantités de variation de chaque type de classe entre deux périodes est important, mais le plus important est de connaître dans quel sens ces variations se sont opérés c.-à-d. de connaître le changement interclasse.

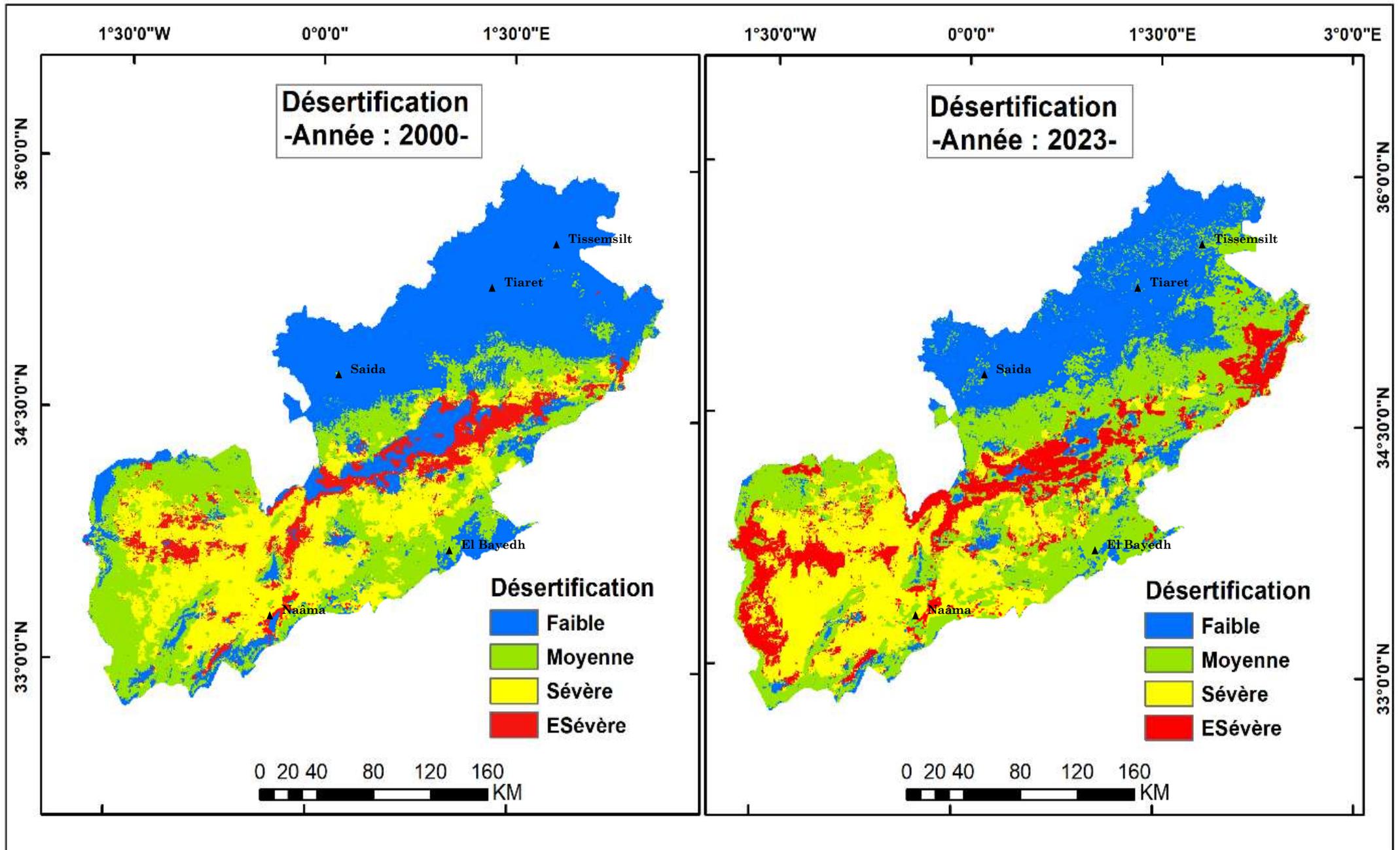


Figure 37 : Comparaison de l'état de la désertification entre la période 2000 et 2023

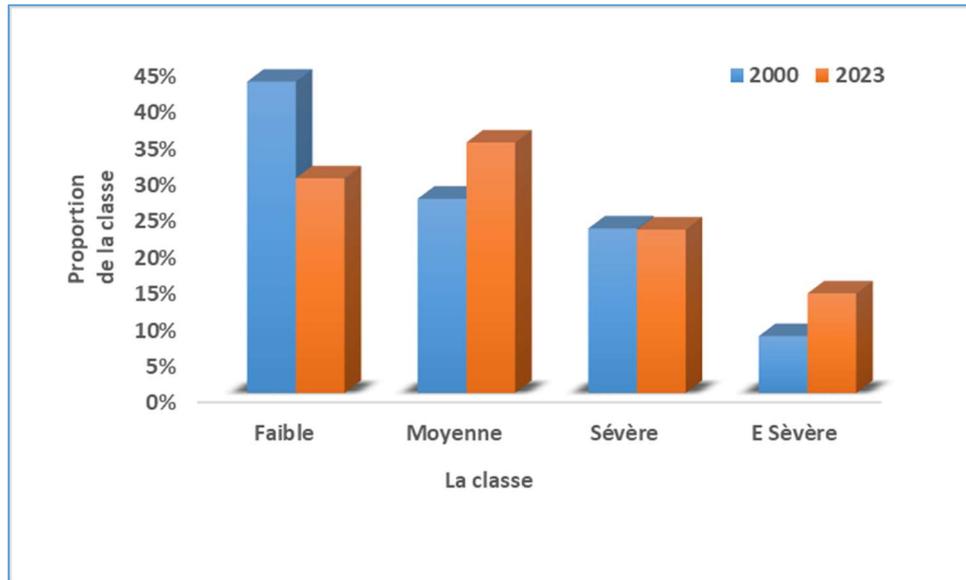


Figure 38 : Évolution par classe du phénomène de la désertification dans la période 2000-2023

16.2. Évolution interclasses

Dans cette partie, nous allons réaliser une analyse spatiotemporelle partielle ou interclasses qui permet de savoir la quantité des pixels déplacés de chaque type de classe vers les autres.

La figure 39 représente les 16 combinaisons possibles de l'immigration de chaque classe vers les autres.

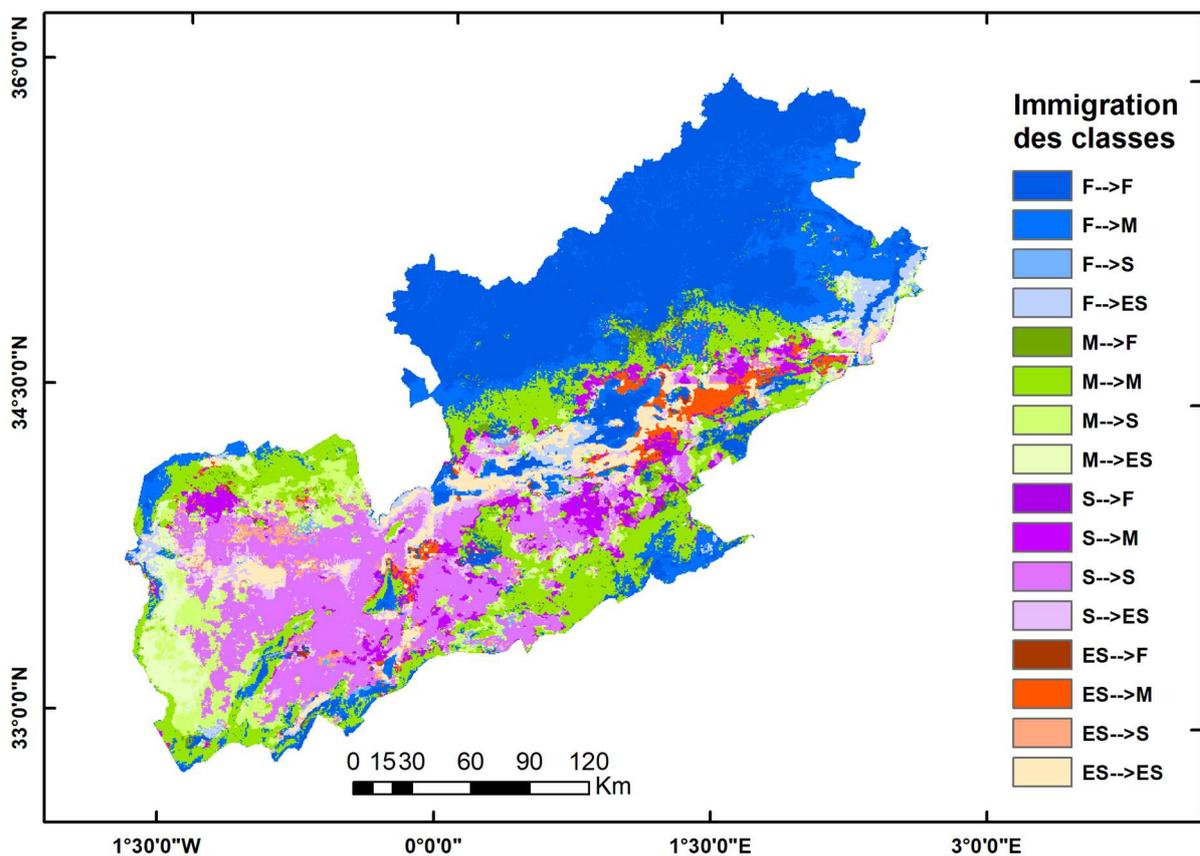


Figure 39 : Immigration des classes de désertification dans la période 2000-2023

F : Faible, M : Moyenne, S : Sévère, ES : ESévère

Cette variation interclasse durant la période 2000 à 2023 du HPO est caractérisée par :

- 65% des pixels de la classe "Faible" ont maintenu leurs caractéristiques entre la période 2000 et 2023 alors que 29% de pixels qui ont la qualité "Faible" en 2000, ils deviennent "Moyenne" en 2023, tandis que 5% de ces pixels deviennent "ESévère" et uniquement 1% des pixels qui ont une qualité "Faible" deviennent "Sévère". On conclut pour cette classe que la classe de type "Moyenne" est la classe a la plus de chance de gagner plus de terrain provenant de la classe de qualité "Faible" (figure 40).
- en ce qui concerne la classe à caractère "Moyenne", on note que 59% des pixels de cette classe ont conservé leurs statuts entre 2000 et 2023 et 22% de pixels de cette classe deviennent "Sévère". La deuxième classe qui a gagné plus de terrain provenant de la classe de type "Moyenne" est celle de la classe "ESévère" avec une proportion de 14%. La classe de type "Faible" a également profité de 5% des pixels de la classe "Moyenne" (figure 40).
- 66% de pixels de qualité "Sévère" ont gardé leurs statuts, et 19% de pixels ont changé leur classe et deviennent "Moyenne" en 2023. 13% de pixels qui ont un statut de type "Sévère" en 2000 deviennent "ESévère" en 2023 et uniquement 2% de pixels sont transformés en classe à caractère "Faible" (figure 40).
- la dernière classe est celle de "ESévère", il est remarquable que 55% des pixels dans cette classe ont conservé leurs qualité, 27% de ces pixels deviendront "Moyenne" tandis que 15% transformé en classe de type "Sévère" et enfin pour le reste de cette classe qui est 3% ont changé leurs statuts est deviendrons une classe de type "Faible" (figure 40).

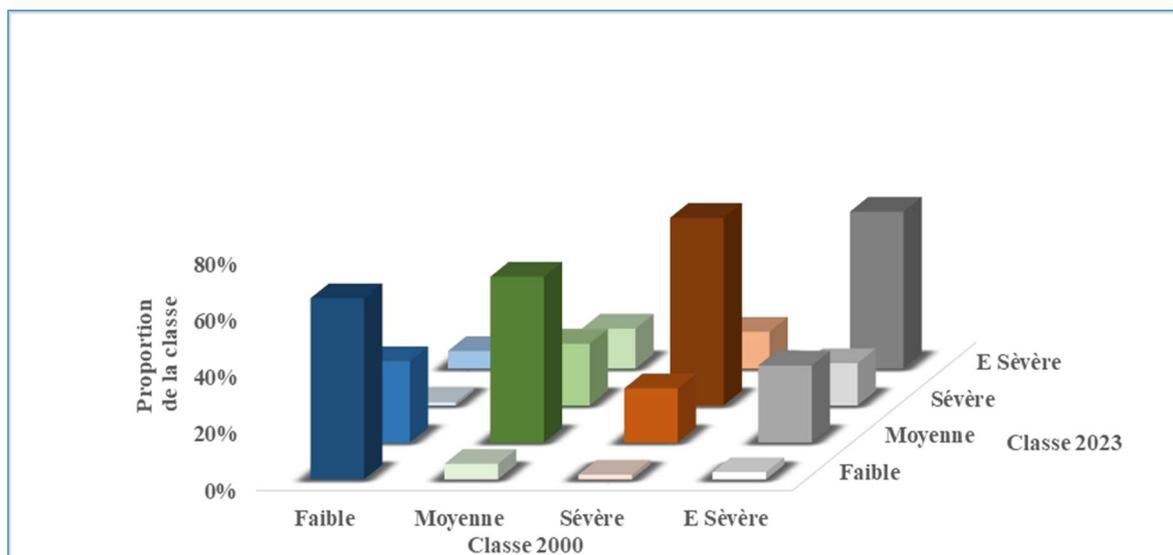


Figure 40 : Évolution Interclasse du phénomène du désertification dans la période 2000-2023

D'après les analyses de la section précédente, on constate que :

- l'immigration des pixels de la zone étudiée (HPO) présente une variation significative, plus prononcée du sens "Faible" vers "ESévère", avec une surface de dégradation équivalente à 15 570 km² (25% de la surface totale).
- l'immigration des pixels de la zone étudiée (HPO) a une grandeur de variation relativement faible dans le sens "ESévère" vers "Faible" avec une surface de régénération équivalente à 6072 km² (9% de la surface totale).

Par conséquent, on conclut que le bilan est nettement négatif.

17. Conclusion

Le HPO est l'une des régions les plus exposées au phénomène de l'ensablement en Algérie, qui peut rendre son écosystème plus en plus très fragile. Ce phénomène affecte sans aucun doute les plantes, les animaux et par conséquent la population.

La surveillance et le contrôle de ce phénomène restent une priorité absolue pour les autorités et la communauté locale.

Dans cette partie, on a combiné des paramètres biophysiques (Albédo, TGSI, LST et NDVI) avec des techniques d'intelligence artificielle (Random Forest), ce qui a permis d'identifier le degré de la vulnérabilité des zones du HPO relativement à ce phénomène.

Les résultats obtenus, montrent que 30% du HPO ne sont pas concernées par l'ensablement, tandis que 35% sont considérées comme des zones potentiellement exposées à ce phénomène. Quant aux zones où l'ensablement est considéré comme sévère, son taux est de l'ordre de 20%. Le dernier type de cette classification d'ensablement est à caractère "E Sévère" avec une quantité égale à 15% de la superficie totale.

Pour les futures investigations nous recommandant les points suivants :

- intégration d'autres paramètres biophysiques liés à la végétation comme EVI, SAVI et MSAVI au lieu de l'NDVI et faire une analyse comparative par rapport aux résultats obtenus par cette étude.
- incorporation du paramètre précipitation dans l'analyse interannuelle de la désertification.
- la nécessité d'intégrer aussi, le paramètre évapotranspiration dans l'étude du phénomène de la désertification.
- l'analyse par paire des paramètres biophysiques choisis et détermination de l'influence de ces paires pour chaque classe de désertification séparément.
- calcul de tendance de chaque classe pour bien prédire l'état de la désertification.
- identification du seuil d'influence pour chaque paramètre intégré.

Chapitre III :

Évaluation de la Dégradation des Terres par l'Analyse Multicritère

1. Introduction

La dégradation des terres est l'un des phénomènes environnementaux les plus inquiétants aux niveaux : mondial, régional et local. Plusieurs facteurs influent sur le degré de détérioration des terres, notamment la texture du sol, la roche mère, la pente, le drainage, les précipitations, la couverture végétale, l'aridité, la densité de la population, la densité du réseau routier et le pâturage.

L'un des objectifs de cette thèse est de réaliser la carte des zones vulnérables à la dégradation des terres dans la région du HPO.

Dans ce chapitre une technique d'analyse multicritère représentée par "l'Analyse multicritère hiérarchique" (AHP) a été intégrée dans un environnement SIG (ArcGIS et QGIS) pour établir la carte de désertification et de dégradation des terres. Une matrice de comparaison par paires (PCM : "pairwise comparison matrix" en anglais) a été utilisée pour déterminer les poids des critères influençant ce phénomène. En outre, un score attribué aux sous-critères a été appliqué. Enfin, la carte de désertification et de dégradation des terres (DDT) a été générée à l'aide d'un outil d'analyse excessive pondérée (WOA : "weighted overly analysis " en anglais).

Par conséquent quatre classes de dégradation des terres (DDT) ont été retenues. Ces classes sont : a) la classe "Non-affectée" là où la dégradation est presque marginale, b) la classe de type "Potentielle" dont la "DDT" se bascule entre "DDT" légère et "DDT" moyenne, c) la classe à caractère "Fragile" là où la "DDT" est estimée au-dessus de la classe "Potentielle" et d) la classe où la "DDT" était "Critique".

En ce qui concerne l'évaluation de la qualité de la carte réalisée, les classes "Fragile" et "Non-affectée" ont été estimées avec une bonne précision relativement aux classes "Critique" et "Potentielle". Ce type d'évaluation est dégagé par la matrice de confusion, dont on a comparé un échantillon de la carte du DDT réalisée par la méthode d'analyse multicritère et le même échantillon re-classifié par la combinaison de deux techniques : l'analyse en composante principale (ACP) et la méthode d'apprentissage automatique non supervisé représentée par la technique "Ward agglomeration" (décrite dans la partie I).

2. Analyse multicritère

2.1. Définition

L'analyse multicritères (AMC) est une technique utilisée pour évaluer plusieurs critères, à la fois quantitatifs et qualitatifs, afin de comparer différentes alternatives et options. Elle vise à évaluer une famille cohérente de critères pour éclairer un processus de décision. L'utilisateur du AMC doit fournir des informations, y compris les rôles et les responsabilités, les techniques d'évaluation, les critères et la notation ([WK-NZT.Agency 2023](#)).

L'analyse multicritère à caractère "spatiale" est une technique d'analyse spatiale qui permet de combiner plusieurs critères de différentes natures afin d'obtenir un résultat à référence spatiale révélant les zones candidates à la résolution du problème (Ex: "Désertification").

Depuis les années 1970, l'analyse multicritère, définie également par l'appellation "aide multicritère à la décision", a connu un développement considérable et peut désormais être considérée comme un outil scientifique à part entière (Balzarini et al. 2011).

2.2. Principe

Le processus d'AMC a une nature participative qui se réalise en impliquant divers acteurs concernés par la problématique. Afin d'obtenir un jugement le plus objectif possible, un groupe d'experts représentant des intérêts distincts doit être sélectionné pour évaluer les différents critères. Ainsi, chaque acteur doit répondre à la problématique en tenant compte de ses propres intérêts (Dean 2022).

2.3. Concepts

2.3.1. Action

C'est un type de représentation de l'élément de solution qui contribue à la décision (une région, un site, un projet, ...etc.). On utilisera le terme "variantes" quand 'il s'agit des actions exclusives (Habenicht et al. 2002).

2.3.2. Alternatives

Représentent les différentes pistes d'action possibles (Bernard et al. 1971).

2.3.3. Attributs

Convient aux caractéristiques des alternatives. Son but est l'évaluation du niveau des objectifs (Bernard et al. 1971).

2.3.4. Critères

Sont établis à la base de décision mesurables ou estimables. C'est une indication par laquelle une décision est prise. Il existe deux catégories de critères : facteurs et contraintes (Habenicht et al. 2002; Trendowicz and Kopczyńska 2014).

2.3.5. Pondération

Définie l'importance relative attribuée à chaque critère par rapport à l'ensemble des critères (Habenicht et al. 2002; Trendowicz and Kopczyńska 2014).

2.3.6. Agrégation

Elle fait référence à l'examen des performances d'une alternative sur la base de critères spécifiques pour décider de l'alternative (Habenicht et al. 2002; Trendowicz and Kopczyńska 2014).

2.3.7. Espace de décision

Représente les alternatives réalisables (Bernard et al. 1971).

2.3.8. Préférences

Sont définies : comme une alternative répondant au besoin d'un décideur concernant un attribut donné (Habenicht et al. 2002; Trendowicz and Kopczyńska 2014).

2.4. Les principales méthodes d'analyse multicritères (AMC)

Taherdoost and Madanchian (2023) résumant dans le tableau 11, les vingt méthodes d'analyse multicritère, les plus importantes de l'univers d'aide à la décision. Il est remarquable que la méthode AHP (Analytical hierarchical Process en anglais (Saaty 1980)) occupe le nombre le plus grand des résultats obtenus par cette méthode dans les recherches et les projets scientifiques entre la période 2012 jusqu'à 2022 par un chiffre égale à 15452, suivie par la méthode DEA (Decision efficiency Analysis (Charnes et al. 1978)) avec 9367 recherches et dans le troisième rang, on trouve la méthode FST (Fuzzy sets theory (Zadeh 1965)) avec 8730 résultats.

Tableau 11 : Les principales méthodes d'analyse multicritères (Taherdoost and Madanchian 2023)

Méthode	Descriptions	Sources	Nombre d'articles de recherche 2012-2022
<i>AHP</i>	<i>Comparaison par paires des critères hiérarchisés</i>	(Saaty 1980)	<i>15452</i>
DEA	Évaluation des performances d'un ensemble d'unités DM homogènes avec plusieurs entrées et sorties	(Charnes et al. 1978)	9367
FST	Quantifier la facette linguistique des données et préférences accessibles pour résoudre des problèmes subjectifs et ambigus	(Zadeh 1965)	8730
TOPSIS	Évaluer en fonction de la distance de l'alternative au solution idéale	(Hwang and Yoon 1981)	8241

Chapitre III

GP	Minimiser la dérivation de chaque objectif à partir d'une cible souhaitée	(Charnes and Cooper 1957)	4113
CPR	Faire des recommandations à partir de l'analyse des données historiques	(Kolodner 1993)	3258
GRA/GRM	Diviser les informations en blanc, noir et gris (entre connu et inconnu)	(Ju-Long 1982)	3176
ANP	Un type d'AHP non linéaire et plus général utilisant Agrégation basée sur la chaîne de Markov	(Saaty 1996)	586
FUZZY AHP	AHP avec l'évaluation floue des alternatives	(Van Laarhoven and Pedrycz 1983)	2804
ELECTRE	Surclasser la relation des alternatives et utiliser une comparaison par paire	(Benayoun et al. 1966)	2782
PROMETHEE	Méthode de sur classement (type ELECTRE) comportant plusieurs itérations	(Brans 1982)	2715
VICOR	Une version compensatoire de TOPSIS basée sur minimiser la distance jusqu'à la solution idéale en utilisant une approche de normalisation linéaire	(Opricovic 1998)	2691
FUZZ TOPSIS	Basé sur TOPSIS dans un environnement flou	(Chen 2000)	2014
DEMATEL	Vérifier les relations/interdépendances entre les variables	(Gabus and Fontela 1972)	1378
PRAGMA	Comparaison de profils partiels d'alternatives par la considération de toutes les paires de critères possibles	(Churchman and Ackoff 1954)	1267
BWM	Identifier les meilleurs et les pires critères, puis effectuer des comparaisons par paires entre chacun des meilleurs et des pires critères et les autres	(Rezaei 2015)	867

SMART	Pondérer les critères en fonction de leur importance et convertir les poids d'importance en nombres réels	(Edwards 1971)	646
FUZZY ANP	Expression floue des poids des critères dans la méthode ANP	(Mikhailov and Singh 2003)	586
MAUT	Basé sur l'intégration de facteurs d'incertitude et de préférences en matière de risque dans les méthodes d'aide à la décision	(Keeney and Raiffa 1993)	948
SAW	Il s'agit d'une simple addition de scores représentant les objectifs atteints en tenant compte de tous les critères, multipliés par les pondérations des critères	(Churchman and Ackoff 1954)	976

Cet alignement des recherches scientifiques envers la méthode hiérarchique (AHP) n'est pas survenu par hasard, mais plutôt grâce à un ensemble d'avantages que nous énumérons comme suit :

- structuration de la complexité : AHP excelle dans la structuration hiérarchique de problèmes complexes, multicritères, multi-personnes et multi-périodes ([Tahar and Fares 2015](#)).
- la comparaison binaire des éléments (alternatives, critères et sous critères).
- Analyse hiérarchique : AHP décompose le problème étudié en sous-problèmes hiérarchiques facilement compréhensibles et autoévalués, facilitant la compréhension et l'évaluation ([Fenniche 2018](#)).
- polyvalence : L'AHP est applicable dans divers domaines, y compris les processus de prise de décision et la résolution de problèmes impliquant plusieurs critères ([Fenniche 2018](#)).
- aide à la décision : la méthode sert d'outil d'aide à la décision, aidant à résoudre les problèmes de décision multicritères grâce à la disposition hiérarchique des critères ([Lumivero 2023](#)).

3. Système d'information Géographique (SIG)

[Denègre and Salgé \(2004\)](#) ont défini le SIG comme étant : "Système informatique de matériel, de logiciels et de processus conçu pour permettre la collecte, la manipulation, la gestion, la modélisation, l'analyse et l'affichage de données à référence spatiale pour résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion".

[Esri \(2023\)](#) a également une autre définition similaire est courte : le SIG "est un système spatial pour créer, gérer, analyser et cartographier tous types de données".

4. Complémentarité d'AMC et de SIG

L'intégration du couple SIG-AMC n'est pas une nouvelle question. [Malczewski \(2006\)](#) a démontré que de 1990 à 2004, plus de 300 articles ont été publiés dans des domaines où les résultats obtenus étaient le fruit de la combinaison des deux axes.

La complémentarité entre l'analyse multicritère (AMC) et les systèmes d'information géographique (SIG) constitue une approche puissante dans la prise de décision spatiale. L'AMC offre un cadre méthodologique permettant de prendre en compte plusieurs critères simultanément, facilitant ainsi la gestion complexe des données spatiales. En intégrant l'AMC dans les SIG, il devient possible d'exploiter pleinement les fonctionnalités de ces systèmes en termes de visualisation, de manipulation et d'analyse des données géographiques. Les SIG fournissent une plateforme efficace pour la gestion, l'analyse et la représentation spatiale des critères d'évaluation, tandis que l'AMC permet de pondérer ces critères en fonction de leur importance respective. Ainsi, cette synergie entre l'AMC et les SIG permet d'améliorer la qualité des décisions prises dans des contextes variés tels que la planification territoriale, la gestion des ressources naturelles ou la localisation d'infrastructures.

5. Méthode et matériels

Après avoir examiné une grande quantité de littératures scientifiques qui s'intéressent à l'environnement, et la prévention des terres du phénomène de la désertification et la dégradation des terres (DDT), dix critères ont été sélectionnés pour la cartographie géospatiale de la désertification. La technique AHP a été utilisée pour identifier différentes classes de désertification dans la zone d'étude (HPO). La méthodologie suivie est montrée par la figure 41 :

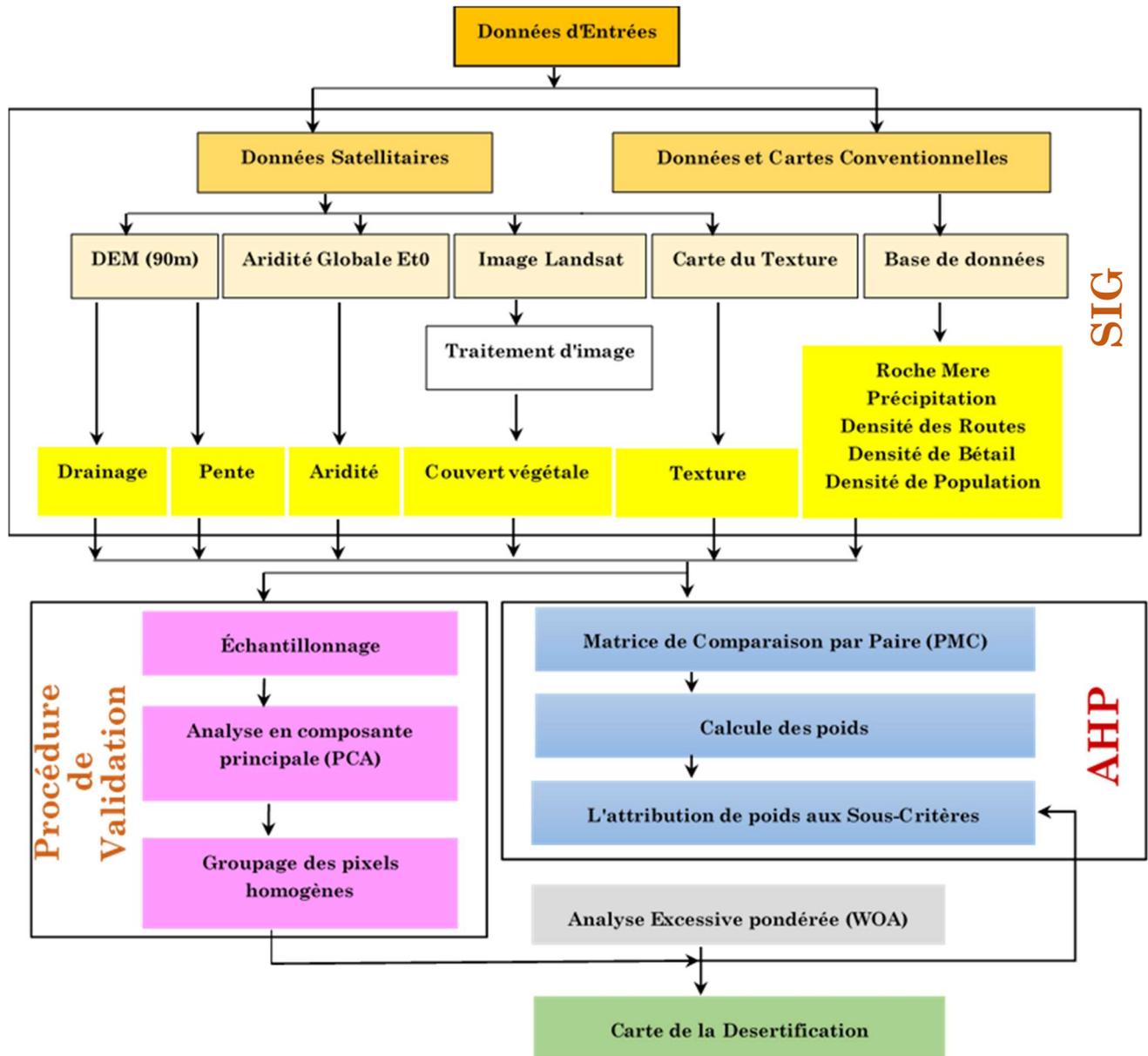


Figure 41 : Procédure suivie pour générer la carte du désertification et dégradation des terres dans HPO (Kadri and Nasrallah 2023)

5.1. Choix des critères

Il n'existe pas de consensus sur les critères à utiliser pour déterminer le degré de dégradation d'une zone. Les paramètres considérés dans le présent travail ont été sélectionnés en fonction de leur capacité à influencer la dégradation des terres et de leur utilisation relative dans la littérature comme détaillé ci-dessous :

La pente (Kirkby and Cox 1995; Kosmas et al. 2000; Kosmas et al. 1999; Lahloui et al. 2017), la texture du sol (Basso et al. 2012; Foster 1983; Kosmas et al. 2000; CKosmas et al. 1999; Momirović et al. 2019), le couvert végétal (Kadović et al. 2016; Kosmas et al. 2000; Nedjraoui 2003; Ravesh et al. 2010; Türkeş et al. 2020), l'aridité (Basso et al. 2012; Ferrara et al. 2020; Kosmas et al. 2014), la précipitation (Basso et al. 2012; Ferrara et al. 2020; Kosmas et al. 1999; Kosmas et al. 2014; Lahloui et al. 2017; Negaresh et al. 2016; Zdruli 2011) , la roche mère (Ferrara et al. 2020; Kosmas et al. 2000), le drainage (Ferrara et

al. 2020; Kacem et al. 2021), la densité de population (Boudjemline and Semar 2018; Ferrara et al. 2020; Momirović et al. 2019), la densité du réseau routier (Boudjemline and Semar 2018), la densité du bétail (Boudjemline and Semar 2018; Kosmas et al. 1999).

La méthodologie était adoptée à la base de l'approche AHP et de l'analyse excessive pondérée (WOA). Les cartes thématiques ont été préparées et générées à l'aide de l'environnement (ArcGIS et QGIS) afin de bien comprendre les différents paramètres qui influencent le phénomène de la désertification. Pour une analyse spatiale objective, toutes les couches d'information sont converties en format raster sous le système WGS84 avec une résolution spatiale ré-échantillonnée égale à 90 m.

Le tableau 12 décrit les données utilisées et leurs sources pour réaliser la carte de DDT.

Tableau 12: Description des données nécessaires pour réaliser la carte du DDT

Critère	Échelle/ Résolution Spatiale	Type de Source	Source	Données de sortie
Pente, Drainage	30m*30m	Raster	Extrait, calculé et cartographié à partir de (USGS 2021)	Couche Raster (90m*90m)
Texture du sol	250m*250m	Raster	Extrait de (Gridsoil 2021)	Couche Raster (90m*90m)
Roche Mère	1/1000000	Vecteur	Extrait et cartographié à partir de la carte de géologie d' Algérie	Couche Raster (90m*90m)
Précipitation	-	Données Tabulées	Interpolé et cartographié à partir de (NMO 2021) Algérie	Couche Raster (90m*90m)
Aridité	30 arc second	Raster	Cartographié à partir de (Platts et al. 2015)	Couche Raster (90m*90m)
Couvert Végétal	30m*30m	Raster	NDVI: Calculé à partir de l'USGS Landsat8-image (USGS 2021), été 2021	Couche Raster (90m*90m)
Densité de Population	-	Données Tabulées	Calculé et cartographié à partir de (NSO 2021) Algérie	Couche Raster (90m*90m)
Densité du réseau routier	-	Vecteur	Extrait et cartographié à partir de réseau routier mondiale (Esri 2021a)	Couche Raster (90m*90m)
Densité du bétail	-	Données Tabulées	Calculé et cartographié à partir de (NSO 2021) Algérie	Couche Raster (90m*90m)

5.2. Analyse multicritère hiérarchique (AHP)

Saaty (1980) a développé un outil robuste et utile pour gérer les éléments multicritères de types qualitatifs et quantitatifs impliqués dans le comportement décisionnel. Ce modèle est appelé "Analyse multicritère hiérarchique" (AHP), elle est basée sur une structure hiérarchique. Elle est largement utilisée dans les sciences de l'environnement et l'écologie pour résoudre des problèmes spatiaux (Zolekar and Bhagat 2015).

Dans le processus décisionnel, l'importance relative entre les paramètres est un facteur crucial pour déterminer le poids de chaque critère (Doke et al. 2021).

Au cours des vingt dernières années, l'utilisation de l'approche AHP a permis des progrès significatifs dans les recherches scientifiques liées à l'environnement, l'écologie et à d'autres dilemmes spatiales complexes. La technique AHP a été utilisée avec succès dans des études sur la désertification et la dégradation des terres (DDT) dans différentes régions telles que le sud de l'Iran (Negaresh et al. 2016), le nord de la Mésopotamie en Turquie (Budak et al. 2018), Turquie (Türkeş et al. 2020) et les régions sud de l'Inde (Sandeep et al. 2021).

Le principal avantage de l'AHP est sa faisabilité concernant l'attribution de facteurs d'importance aux critères par des experts et sa flexibilité pour réorganiser ces classifications en cas d'exactitude intolérable. Dans cette étude, les paramètres et indicateurs ont été évalués de manière comparative par trois experts dans le domaine de l'environnement et la désertification des terres (tableau 13).

Tableau 13 : Échelle de comparaison par paires (Saaty 1980)

Intensité de l'importance		Explication
1	Importance Équivalente	Deux activités contribuent également à l'objectif
3	Faible importance de l'un par rapport à l'autre	L'expérience et le jugement favorisent légèrement une activité par rapport à une autre
5	Importance essentielle ou forte	L'expérience et le jugement favorisent fortement une activité plutôt qu'une autre
7	Importance très forte	Une activité est très fortement favorisée par rapport à une autre ; sa domination démontrée dans la pratique
9	Importance extrême	Privilégier une activité plutôt qu'une autre est très confirmé
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires	Quand un compromis est nécessaire

AHP calcule le poids de chaque critère à l'aide de la matrice de comparaison par paires (PCM). Les coefficients de la matrice (PCM) ont été sélectionnés en fonction de l'importance relative de ces critères en utilisant une échelle de mesures de 9 points, comme indiqué dans le tableau 13.

Cette matrice (PCM) est une matrice carrée de dimension($n*n$); dont n représente le nombre de critères à évaluer. Si nous posons (a_{ij}) un terme de PCM (avec (i) la (i^{eme}) ligne et (j) est la (j^{iem}) colonne, donc (a_{ij}) représente le poids du (i^{eme}) critère relativement au (j^{iem}).

Dans la (PCM), les valeurs de la diagonale sont égales à 1, car l'importance dans ce cas-là est équivalente.

De même le terme $a_{ji} = 1/a_{ij}$ pour tout $i \neq j$.

Une fois la PCM est calculée, l'étape suivante consiste à calculer les valeurs et les vecteurs propres, dont le vecteur propre normalisé de la plus grande valeur propre contenant les poids relatifs (tableau 14) (Saaty 1980).

Tableau 14: Matrice de comparaison par paire (PCM)

Critère	Pente	Texture du sol	Roche Mère	Drainage	Précipitation	Aridité	Couvert végétal	Densité de Population	Densité du réseau routier	Densité du bétail	Poids (%)
Pente	1	1	1	2	0.33	1	0.33	3	2	2	9
Texture du sol	1	1	2	2	0.5	2	1	5	4	5	14
Roche Mère	1	0.5	1	2	0.142	0.166	0.33	2	1	1	6
Drainage	0.5	0.5	0.5	1	0.5	1	0.25	1	3	2	7
Précipitation	3	2	7	2	1	3	2	3	8	5	23
Aridité	1	0.5	6	1	0.33	1	3	5	3	3	14
Couvert végétal	3	1	3	4	0.5	0.33	1	4	3	5	15
Densité de Population	0.33	0.2	0.5	1	0.33	0.2	0.25	1	1	0.5	4
Densité du réseau routier	0.5	0.25	1	0.33	0.125	0.33	0.33	1	1	0.33	3
Densité du bétail	0.5	0.2	1	0.5	0.2	0.33	0.2	2	3	1	5

5.2.1. Rapport de cohérence

À tout moment dans la technique AHP, les jugements relatifs entre les paramètres ne sont pas toujours cohérents. Il est possible de vérifier cette cohérence des jugements en calculant un taux nommé rapport de cohérence CR (Cohérence Ratio en Anglais). Le CR constitue un test d'acceptation des poids des différents critères tels qu'introduits par Saaty (1980) et il est déterminé comme suit (eq.49 et eq.50) :

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{49}$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{50}$$

Où : (CI) est l'indice de cohérence (Consistency Index en anglais), (RI) est l'indice de cohérence aléatoire (Random Index en anglais) comme mentionné dans le tableau 15, n est le nombre d'éléments comparés dans la matrice et λ_{max} est la valeur propre principale de la matrice.

Tableau 15: Indice de cohérence aléatoire (Saaty 1980)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Si le CR est inférieur à 10 %, cela fonctionne bien et le jugement est considéré cohérent. Sinon, le choix du paramètre de comparaison relatif n'est pas acceptable (Saaty 1977).

À partir du remplissage de la matrice de comparaison (PCM) (tableau 14) selon l'échelle de Saaty (1980), on a trouvé les résultats suivants:

Valeur propre maximum ($\lambda_{\max} = 11.13807$).

Le nombre de critère $n=10$.

L'indice de cohérence (CI) = $(\lambda_{\max} - n)/(n - 1) = 0.1264$.

L'indice aléatoire (RI)=1.49.

Rapport de cohérence (CR)=CI/RI = 8% (OK).

5.2.2. Attribution des scores aux sous-critères

Afin d'établir la carte de désertification et la dégradation des terres (DDT) dans la région du HPO ; Les critères utilisés dans cette étude sont : la pente, la texture du sol, la roche mère, la précipitation, le couvert végétal, l'aridité, la densité du réseau routier, la densité de la population et la densité du bétail.

Une échelle de 1 à 9 a été utilisée pour attribuer un facteur aux sous-critères basés sur des conditions appropriées. La valeur de (1) est le score le plus bas, a été attribuée aux sous-critères les moins souhaités, tandis que le score le plus élevé (9) a été attribué aux sous-critères les plus souhaités et les valeurs intermédiaires ont été accordées aux sous-critères moyennement souhaités.

5.2.3. Analyse successive pondérée

L'analyse excessive pondérée (WOA) est l'une des approches les plus couramment utilisées pour l'analyse des phénomènes complexes. Elle est utilisée pour résoudre des problèmes multicritères tels que l'adéquation des sites. Conformément à toute autre analyse excessive, WAO nécessite la définition du problème, la division du modèle composé en sous-modèles et l'identification des informations d'entrée (Couches d'information) (Esri 2021b).

Comme évoqué dans le paragraphe (P 5.2.2), Chaque cellule de chaque critère doit être réévaluée selon une échelle de préférence commune de 1 à 9. Les poids inclus dans le vecteur propre normalisé (déduit de la valeur propre la plus grande) vont être affecté à chaque critère qui leur correspond, et bien sûr sera affecté automatiquement pour chaque cellule de ce critère.

Une fois les critères se multiplieront par les poids qui leurs correspond, une opération d'accumulation sera effectuée pour réaliser la carte du (DDT), comme indiqué par l'équation (eq.51) :

$$S = \sum_{1}^{n} w_i * X_i \quad (51)$$

Où

S : est la désertification totale des terres (DDT).

w_i : indique le poids des critères de désertification.

X_i : représente un score de sous-critère de critères i et n désigne le nombre total des critères qui affectent la désertification.

6. Résultats

Cette étude constitue la première tentative d'identification de la dégradation des terres dans les hauts plateaux occidentaux de l'Algérie (HPO) ; la procédure consiste à pondérer différentes données thématiques à références spatiales à l'aide de l'approche AHP et de l'outil WOA.

Un compte rendu détaillé de ces critères est fourni ci-dessous.

6.1. Critères et HPO

6.1.1. La pente

La pente est un élément crucial qui influence directement l'érosion du sol, il dépend du taux d'infiltration, le taux de percolation et le ruissellement de surface (Das 2021). Kosmas et al. (1999) ont mentionné que, le sédiment du sol peut être estimé par le produit du gradient de la pente, la quantité de ruissèlement des eaux de surface et une constante qui dépend de la propriété de la surface du sol. Ces auteurs indiquent que, quand la pente a un caractère plus raide, le coefficient de ruissèlement devient plus grand et entraîne un accru au niveau de la stabilité du sol et diminution au niveau du sédiment.

D'un autre côté Das and Pal (2020) montrent que, lorsque le gradient de la pente diminuait légèrement, le ruissellement diminuait et le rapport entre infiltration et percolation augmentait.

Dans la région du HPO, comme le montrent les figures 42, 43 et le tableau 16, le gradient de la pente est classifié en cinq classes distinctes, en fonction de leur effet sur l'érosion du sol (Ferrara et al. 2020). Les pentes dans l'HPO, se distinguent généralement par : une classe "faible à plate" dominante et occupe environ 75 % de la superficie du HPO. La classe "très faible" occupait environ 17 % de cette superficie, et la troisième est la classe de type "faible", qui représente environ 6 % de la superficie totale. La classe "raide" représente environ 2,5 % du HPO, tandis que la classe "très raide" ne représente qu'un pourcentage inférieur à 1 % qu'on peut l'observer dans le nord-est du HPO et les régions de l'Atlas saharien.

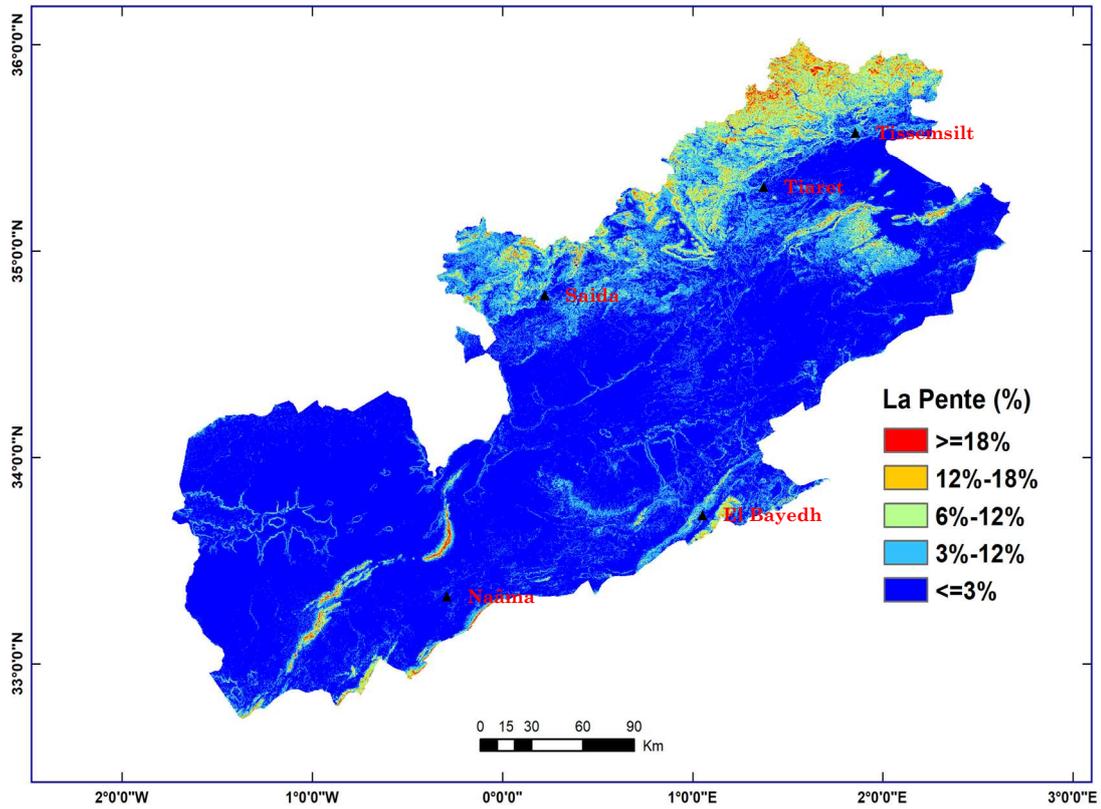


Figure 42: La carte des pentes de la région du HPO (Kadri and Nasrallah 2023)

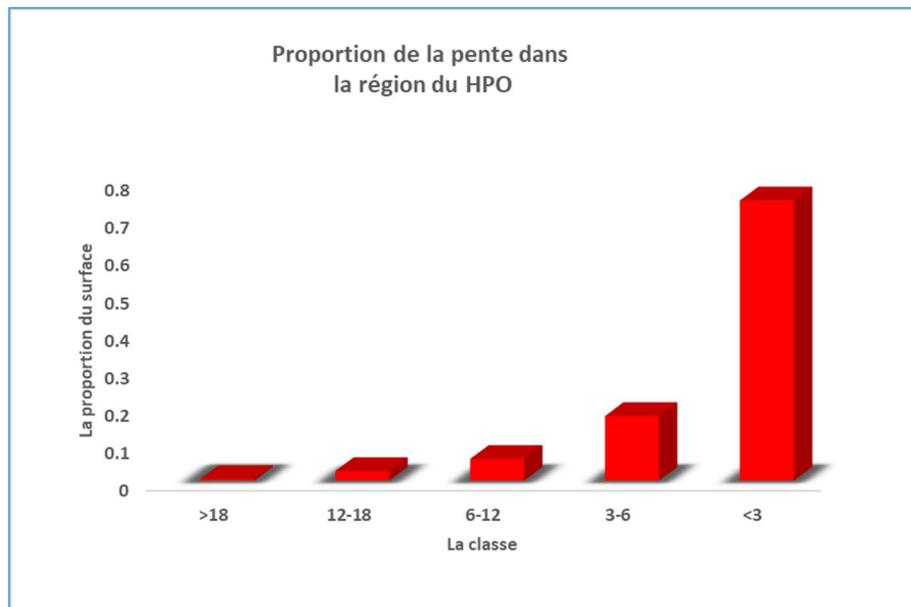


Figure 43 : Proportion du critère pente dans la région du HPO

Tableau 16: Poids et scores des critères et sous-critères

Critère	Poids (%)	Sous-critère	Surface (km ²)	Surface (%)	Score
Pente (%)	9	>18	324	0.4	1
		12-18	1896	2.5	3
		6-12	4321	5.7	5
		3-6	12970	17.1	7
		<3	56276	74.3	9
Texture du sol	14	Très-Médiocre	2304	4.00	1
		Médiocre	2803	4.05	3
		Modérée	8	0.05	6
		Bonne	54747	91.00	9
Roche Mère	6	Médiocre	67257	88	1
		Modérée	5726	8	5
		Bonne	2988	4	7
Drainage	7	M, TM, Excessive	5082	7	1
		Peu Excessive	13177	17	3
		Imparfaite	20605	27	5
		Modérée	24572	32	7
		Bonne	12537	17	9
Précipitation (mm)	23	<280	50422	66.5	1
		280-310	7417	9.8	2
		310-345	7242	9.5	3
		345-390	8851	11.6	4
		390-440	1224	1.6	5
		440-490	584	0.8	6
		490-570	118	0.2	7
		>570	3	0.0	8
Aridité	14	Aride	54408	72	2
		Semi-aride	18314	24	4
		Sub_humide	3251	4	7
Couvert végétale	15	<0.10	16152	21.31	1
		0.10-0.11	36174	47.73	2
		0.11-0.13	18535	24.26	3
		0.13-0.18	4007	5.24	4
		0.18-0.26	927	1.22	5
		0.26-0.38	143	0.19	6
		>0.38	37	0.05	8
Densité de Population	4	Très-Élevée	5046	7	1
		Élevée	16909	22	2
		Modérée	9749	13	5
		Faible	11070	15	7
		Très-Faible	33188	43	9
Densité du réseau routier	3	Très-Élevée	826	1	1
		Élevée	6586	9	3
		Modérée	20232	27	5
		Faible	33650	44	7
		Très-Faible	14678	19	9
Densité du bétail	5	Élevée	21923	29	1
		Modérée	9942	13	3
		Faible	28037	37	5
		Très-Faible	16060	21	7

6.1.2. La texture du sol

La désertification est un phénomène d'érosion et de dégradation des sols qui entraîne une perte de nutriments et de matières organiques. La terre devient sèche et perd sa capacité à nourrir les plantes. Par conséquent, l'un des principaux facteurs à l'origine de la désertification est le type de sol, appelé aussi propriétés ou texture du sol. La texture fait référence à la proportion de particules de sable, de limon et d'argile (classement granulométrique) qui constituent la fraction minérale du sol indépendamment de la nature et la composition de ces minéraux et indépendamment aussi de sa structure. Les classes de texture du sol sont divisées en quatre groupes en fonction de leur capacité de rétention d'eau (FAO 1998):

- la première catégorie est considérée comme étant une bonne texture, dans cette classe le sol a une nature : loam, limon argile-sableux, loam sableux, sable limoneux, loam argileux (figure 44).
- la deuxième classe est considérée comme une texture modérée, elle est composée de : l'argile sableux, loam limoneux et loam argilo-limoneux (figure 44).
- la troisième classe est estimée avoir une texture médiocre, on trouve dans cette catégorie : le limon, l'argile et l'argile limoneux (figure 44).
- la dernière catégorie dont la texture est définie pauvre, on trouve uniquement la classe de type sableux (Basso et al. 2012; Kosmas et al. 1999) (figure 44).

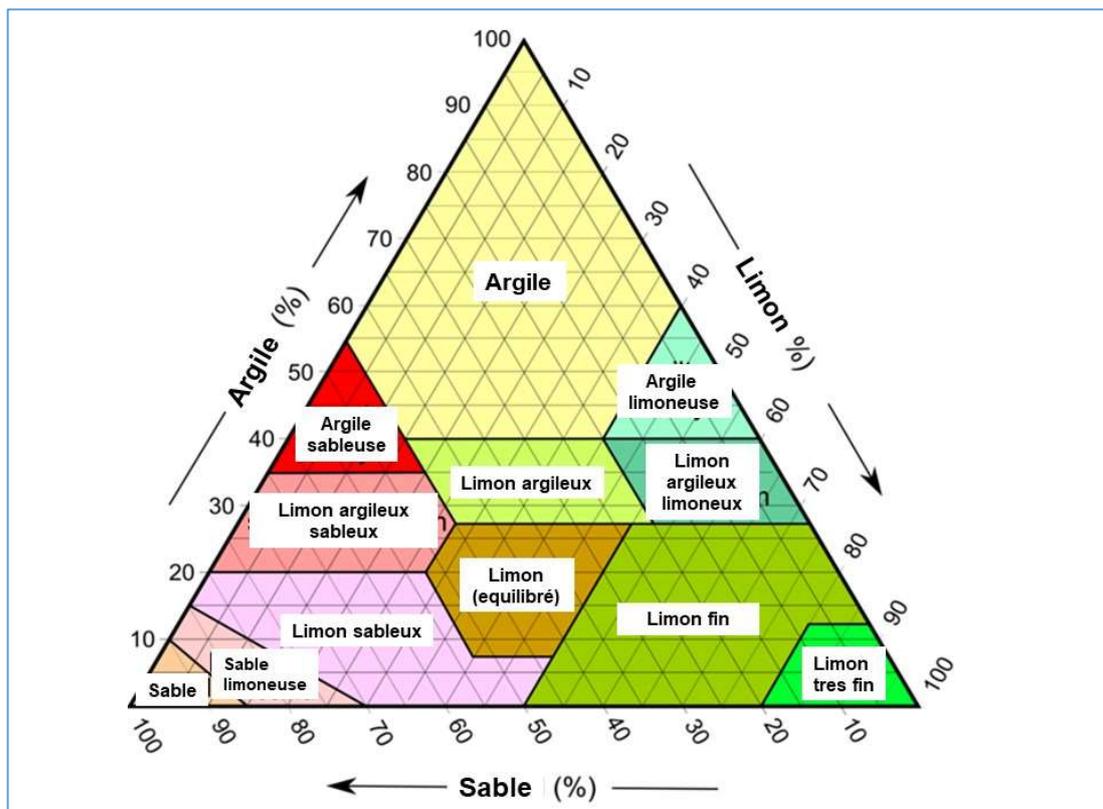


Figure 44: Classification granulométrique du sol (smallholder 2023)

Chapitre III

Ces quantités peuvent être obtenues par l'algorithme suivant [Murano et al. \(2015\)](#):

Sable

a/ limon +1.5*argile <15%

Sable limoneux

a/ (limon +1.5*argile >= 15%) et (limon + 2*argile < 30%)

Loam sableux

a/ (argile >= 7%) et (argile < 20%) et (sable > 52%) et (limon+2*argile >= 30%) ou

b/ (argile <7%) et (limon<50%) et (limon+2*argile>=30%)

Loam

a/ (argile >= 7%) et (argile < 27%) et (limon > =28%) et (limon < 50%) et (sable <=52%)

Loam limoneux

a/ (limon >= 50%) et (argile >= 12%) et (argile < 27%) ou

b/ (limon >=50%) et (limon<80%) et (argile < 12%)

Limon

a/ (limon >= 80%) et (argile < 12%)

Limon argilo-sableux

a/ (argile >= 20%) et (argile < 35%) et (limon < 28%) et (sable > 45%)

Loam argileux

a/ (argile >= 27%) et (argile < 40%) et (sable > 20%) et (sable < =45%)

Loam argilo-limoneux

a/ (argile >= 27%) et (argile < 40%) et (sable <= 20%)

Argile sableux

a/ (argile >= 35%) et (sable >45%)

Argile limoneux

a/ (argile >= 40%) et (limon >=40%)

Argile

a/ (argile >= 40%) et (sable < 45%) et (limon < 40%)

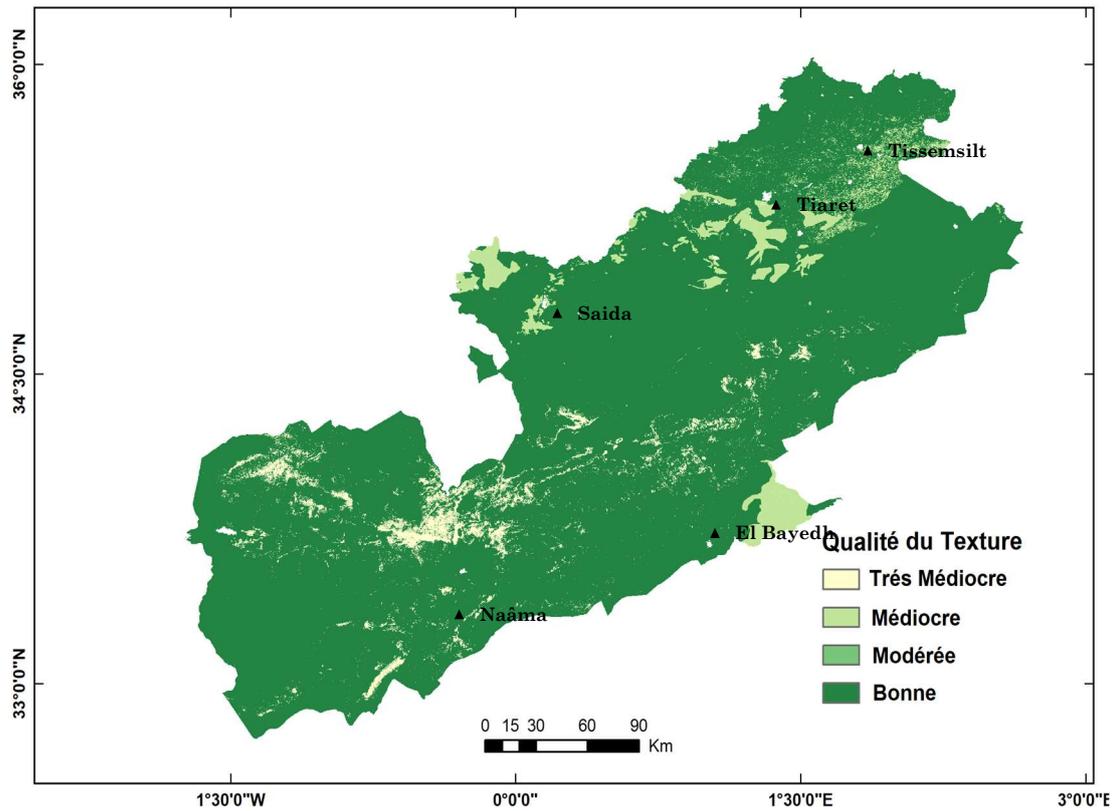


Figure 45: La carte de la qualité du texture dans la région du HPO (Kadri and Nasrallah 2023)



Figure 46: Proportion du critère texture dans la région du HPO

Dans la région du HPO, la qualité du sol limoneux est la principale texture du sol, qui représente environ 90 % des terres (figure 45, figure 46, tableau 16), tandis que le reste de la zone est réparti entre texture médiocre (argile) et très médiocre (sable).

6.1.3. La roche mère

Le sol obtenu à partir de différentes roches mères réagit différemment à l'érosion, à la végétation et à la désertification (Kosmas et al. 1999). Par conséquent, l'origine et l'état de la désertification peuvent être facilement interprétés par une profonde connaissance de la géologie d'une région.

Le HPO est composé de trois groupes de formations géologiques (figure 47, figure 48, tableau 16) :

- a) grès, marne et pyroclastique.
- b) calcaire, marbre, granite et rhyolite.
- c) schiste et conglomérats.

Le premier groupe représente environ 88% du HPO. Cela signifie que ce type de roche mère occupe une grande zone. Selon Basso et al. (2012) ; Ferrara et al. (2020) ; Kosmas et al. (1999), plusieurs zones avec une formation pyroclastique sont caractérisées par la productivité des sols peu profonds avec une érodabilité élevée et par conséquent un risque élevé de désertification. Cependant, le deuxième groupe est estimé à environ 8%, similaire au premier groupe ; le calcaire et le marbre produisent des sols peu profonds avec une humidité relativement faible ; ils ont une influence modérée sur les phénomènes de désertification. Le troisième groupe, occupe environ 4 % du HPO. Il est classé comme étant une formation géologique de bonne qualité ; les sols pierreux dérivés de ce groupe peuvent fournir des quantités significatives d'eau précédemment stockée aux plantes stressées et assurer une importante biomasse.

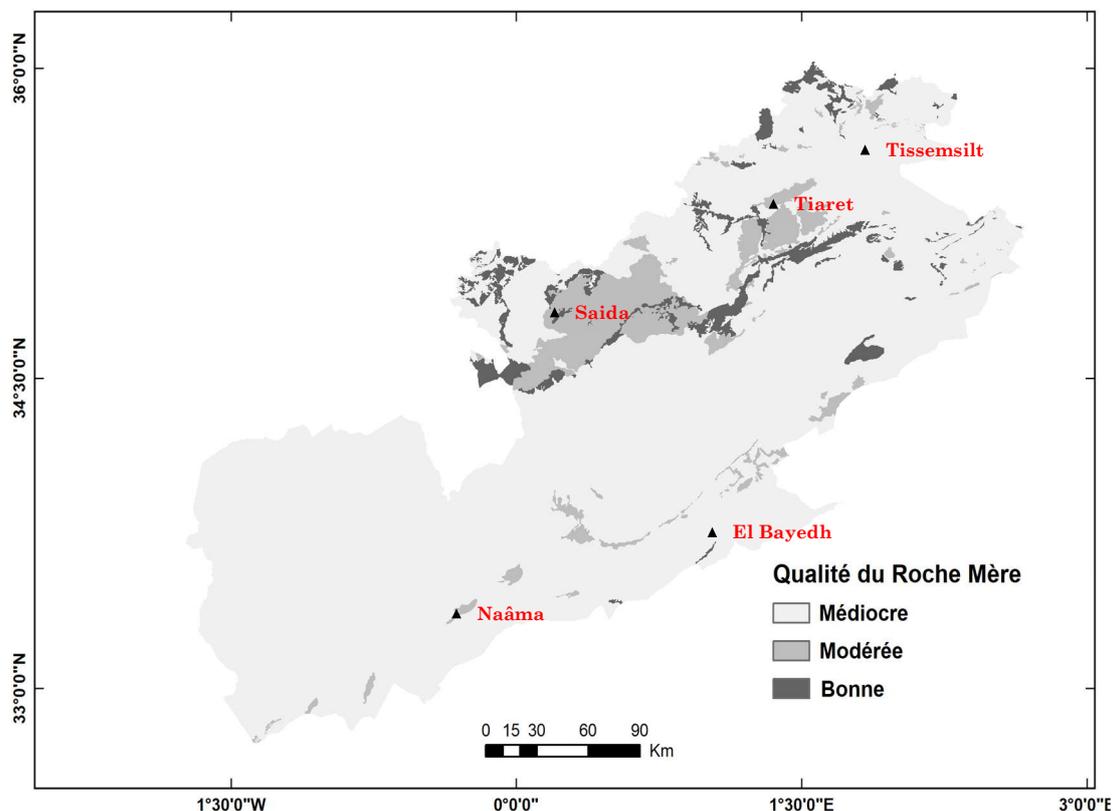


Figure 47: La carte de la qualité du roche mère dans la région du HPO (Kadri and Nasrallah 2023)

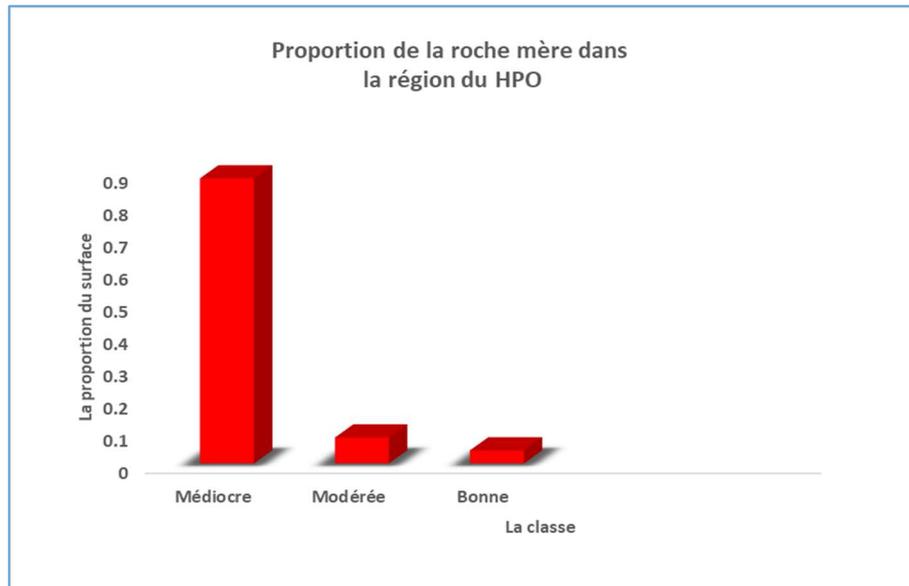


Figure 48 : Proportion du critère roche mère dans la région du HPO

6.1.4. Le drainage

La densité de drainage est représentée par le rapport entre la longueur du cours d'eau et la superficie du bassin (Kosmas et al. 1999). Il s'agit d'un indicateur hydrogéologique qui peut être utilisé pour déterminer l'infiltration et la lithologie d'une région (Murmu et al. 2019).

Les propriétés de drainage peuvent être divisées en cinq classes naturelles (figure 49, figure 50, tableau 16) en fonction de la vitesse à laquelle l'eau est perdue dans le sol et de la durée pendant laquelle le sol reste humide au cours d'une année (Franzmeier et al. 2001). Le HPO est caractérisé par la présence de cinq classes de densité de drainage. La première classe occupe environ 7 % de la superficie du HPO ; elle est considérée comme étant une plaine.

La surface dans ce type de classe est décrite "mal drainée" ; l'eau est évacuée si lentement qu'elle reste à la surface du sol ou au-dessus pendant une grande partie de la saison de croissance (Survey 1993). Le taux de salinité est très élevé en raison de la nature de la roche mère, de l'évapotranspiration, de la température élevée, de la pente et d'autres facteurs directs et indirects. La seconde représentait environ 17% de la superficie totale, l'eau est perdue lentement, de sorte que le sol est périodiquement mouillé à faible profondeur pendant la saison de croissance et elle peut retenir l'eau pendant une longue période (Survey 1993). La troisième classe est considérée comme une région de drainage imparfait et elle est estimée à 27% de la superficie du HPO et qui peut être identifié lorsque l'eau est éliminée lentement pendant certaines périodes de l'année et que le sol conserve son caractère humide pendant la saison de croissance. La quatrième classe occupe environ 32 % de la superficie totale. C'est la classe la plus dominante, elle peut être considérée comme une classe modérément bien drainée, où l'eau est éliminée du sol facilement mais pas rapidement. Elle est disponible pour les cultures pendant la plus grande partie de l'année (Survey 1993). Enfin, la dernière catégorie est celle où le sol est bien drainé, elle occupe

environ 17% de la surface totale du HPO. Dans ce type de classe, l'eau est éliminée très rapidement et le sol a une perméabilité très élevée (Survey 1993).

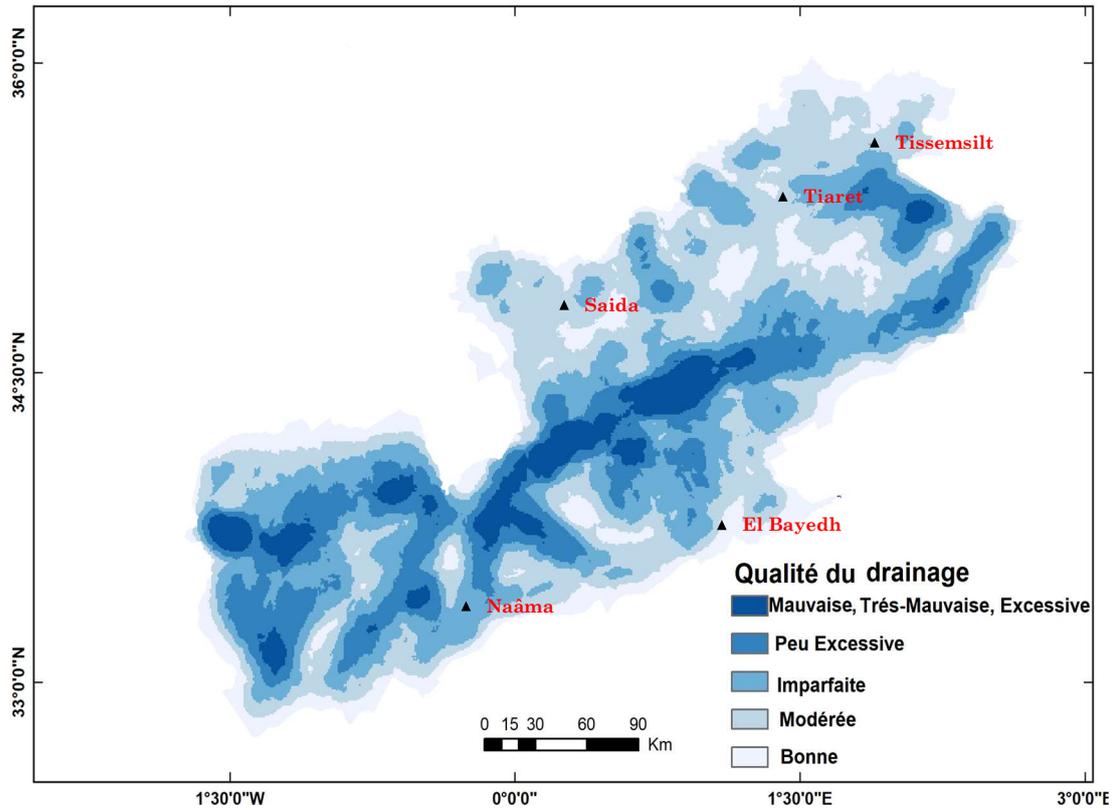


Figure 49 : La carte de la qualité du drainage dans la région du HPO (Kadri and Nasrallah 2023)

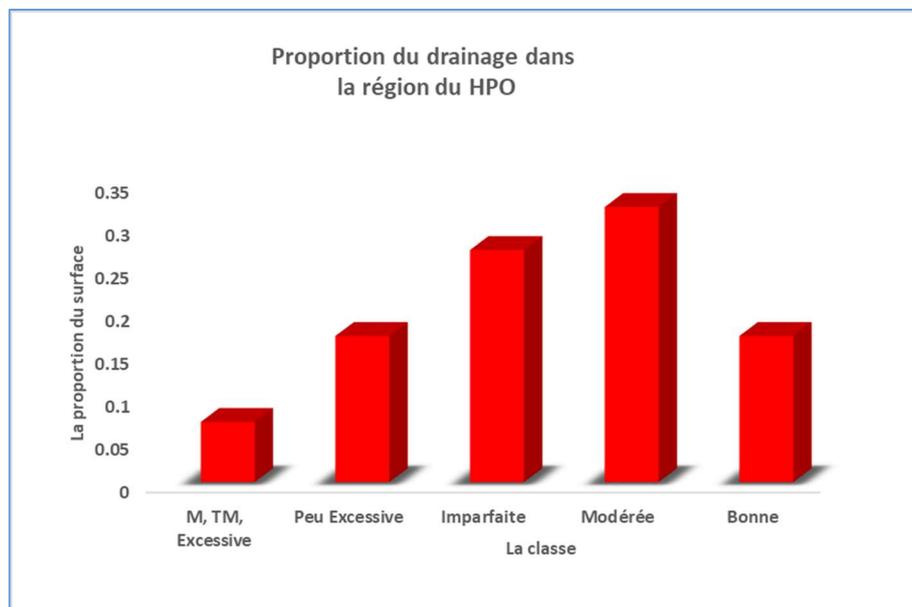


Figure 50 : Proportion du critère drainage dans la région du HPO

6.1.5. Le couvert végétal

La végétation est considérée comme étant l'un des indicateurs qui peut suivre et contrôler le niveau de dégradation d'une région. En effet, la végétation peut contribuer au maintien de l'équilibre écologique, en agissant comme stabilisateur du sol et en prévenant l'érosion de l'eau et du sol. Elle peut également constituer une source de fourrage pour le bétail et la faune. Dans la région du HPO et depuis longtemps, la dégradation du sol ne s'arrêtait pas à augmenter avec la diminution du potentiel végétal (Aidoud and Touffet 1996).

Selon Nedjaroui and Badrani (2008), en 1978, 2/3 des pâturages étaient occupés par plus de 25% du couvert végétal, alors qu'aujourd'hui seulement 1/10 présente cette proportion.

Nedjaroui and Badrani (2008) indiquent que la région est caractérisée par la présence de trois types de plantes steppiques telles que *Stipa tenacissima* (Alfa), *Artemisia herba alba* et *Lygeum spartum*. La région se distingue aussi par sa diversité en matières de richesse forestière ; de nombreux types de forêts existent dans les régions du nord et du nord-est, tels que les *Quercus*, les *Cèdres*, les *Pins*, les *Eucalyptus*, les *Saules*, et d'autres types de végétation, tels que les *herbacées*, les *arbustes*, les *arbres clairsemés* et les *arbrisseaux clairsemés*.

Pour bien quantifier la densité moyenne du couvert végétal, l'indice de végétation normalisé (NDVI) de satellite Landsat 8 est utilisé (USGS 2023) (eq.52).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (52)$$

Où

R : représente la bande rouge du satellite Landsat 8.

NIR : représente la bande infra-rouge du satellite Landsat 8

Pour avoir le NDVI moyen de la région, un calcul se fait par l'intégration des séries temporelles d'images landsat 8 depuis 2013 dans la plateforme GEE.

Le NDVI dans la région est divisé en huit classes (figure 51, figure 52, tableau 16), la première classe où la végétation est très faible, son NDVI ayant une valeur inférieure à 0,1 et la dernière classe où la végétation est considérée comme dense, son NDVI est de l'ordre de 0.38 est plus. La classe dominante dans la région du HPO est celle où le NDVI est compris entre 0,10 et 0,11 et occupe environ 48 % de la surface totale.

Note : Ce type de classification de l'NDVI se fait à la base de la classification donnée par (Ferrara et al. 2020).

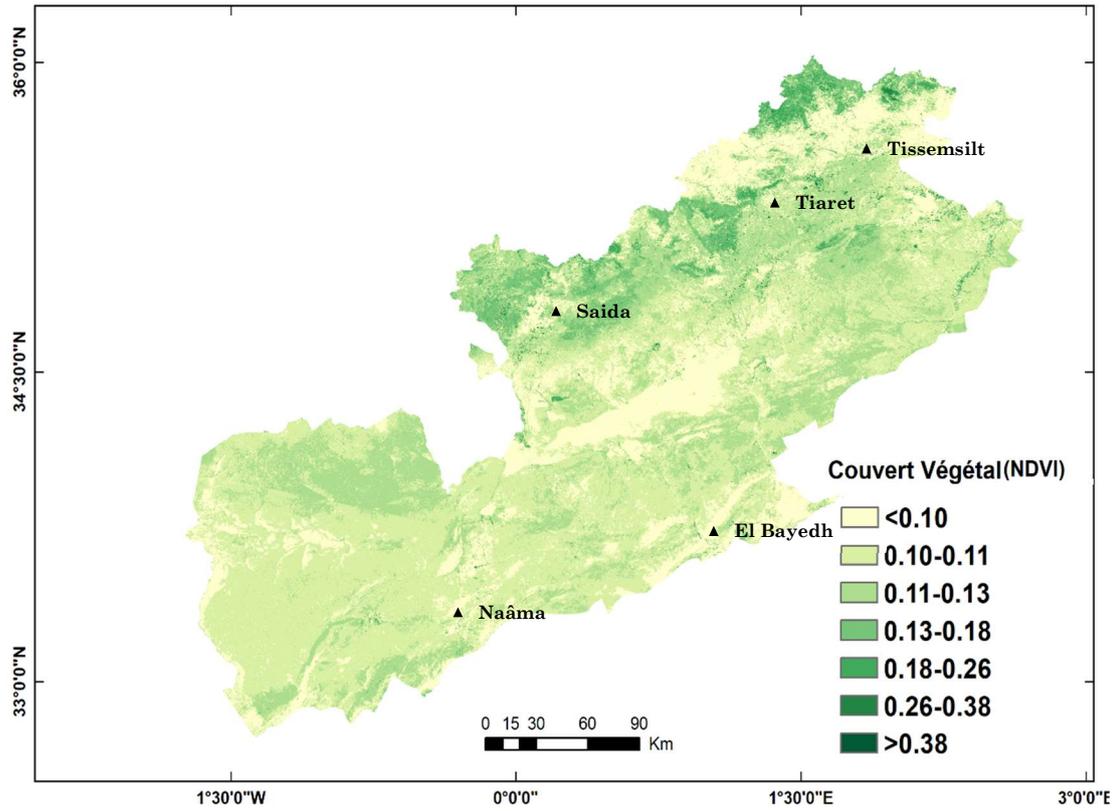


Figure 51: La carte du couvert végétal dans la région du HPO (Kadri and Nasrallah 2023)

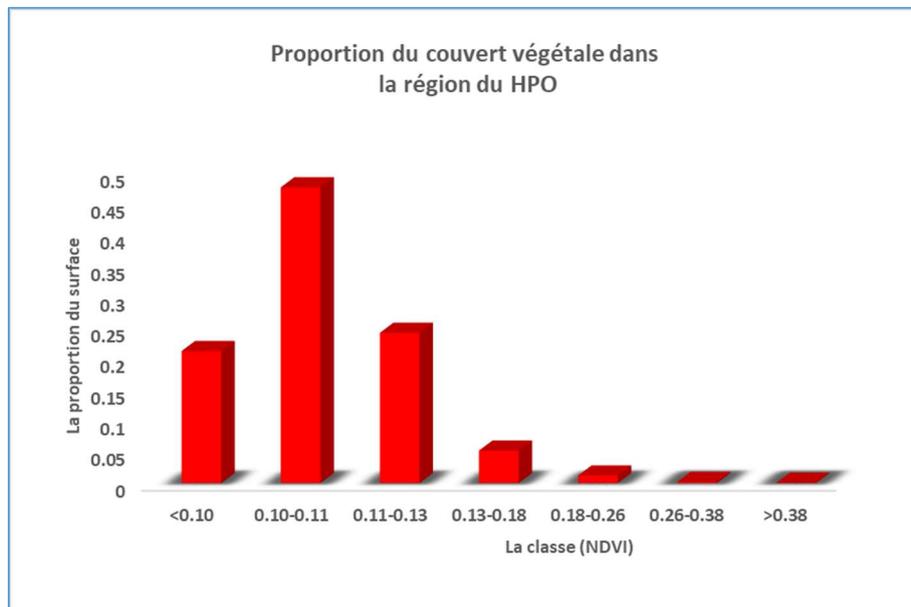


Figure 52 : Proportion du critère couvert végétal dans la région du HPO

6.1.6. La précipitation

Le HPO est considéré comme la zone la plus sèche du nord de l'Algérie, Il est affecté par des processus de désertification et qui sont principalement dues aux "changement climatique" qu'a connu cette région depuis plusieurs décennies (Ozer 2012).

La sécheresse récurrente et les précipitations diluviennes jouent un rôle très important dans le changement de la structure et la morphologie du sol.

Les cyclones se déplaçant vers l'est et traversant l'Europe en hiver transportent de fréquentes poussées d'air froid dans le nord-est, pénétrant dans les parties nord du pays et rencontrant de l'air plus chaud venant du sud. La conséquence de l'instabilité verticale conduit à la formation de dépressions actives, qui peuvent produire des précipitations relativement importantes (torrentielles) et des coups de vent fréquents (Hamlat et al. 2021).

L'érosion hydrique est l'un des nombreux types de désertification. Mishra et al. (2019) mentionnent que l'érosion hydrique dépend de manière non linéaire des précipitations ; la fonction de réponse est subdivisée en trois régimes. Premièrement, l'érosion augmente avec l'augmentation des précipitations jusqu'à 1000 mm/an. Le deuxième se stabilise à 1000 mm/an et diminue lentement avec une augmentation des précipitations entre 1000 et 2000 mm/an. Le dernier régime décrit comment l'érosion augmente à nouveau avec l'augmentation des précipitations. L'érosion éolienne est inversement proportionnelle aux précipitations. Lorsque les précipitations augmentent, l'érosion éolienne diminue (Wang et al. 2016).

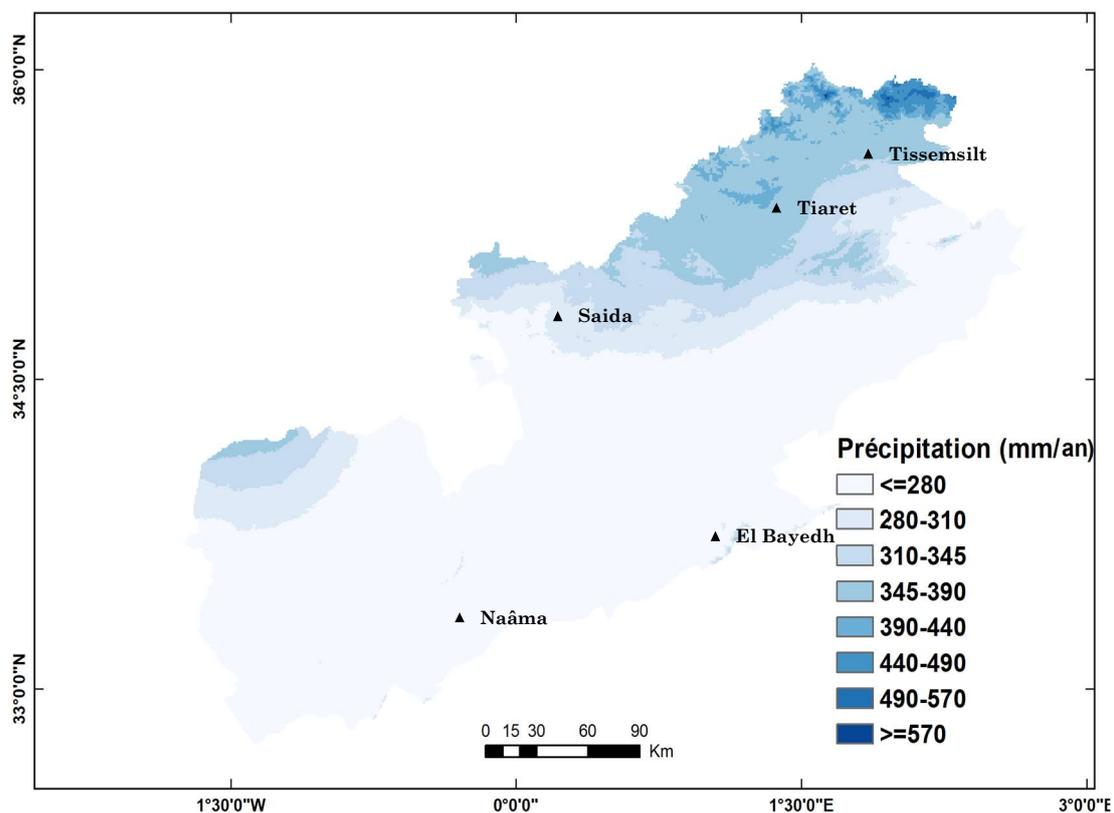


Figure 53: La carte de la précipitation dans la région du HPO (Kadri and Nasrallah 2023)

Dans la région du HPO, la carte des précipitations annuelles moyennes est divisée en huit classes (figure 53, figure 54 et tableau 16). La classe de valeur minimale est inférieure à 280 mm, ce qui représente environ 67 % de la zone totale. Les classes de valeurs intermédiaires sont comprises entre 280 et 390 mm, occupant environ 32% que l'on peut observer au nord-est et l'extrême nord-ouest de la région. Bien que les classes de valeurs maximales soient supérieures à 390 mm, leur superficie représente 3% de l'aire totale et elle se concentre dans l'extrême nord-est de la région.

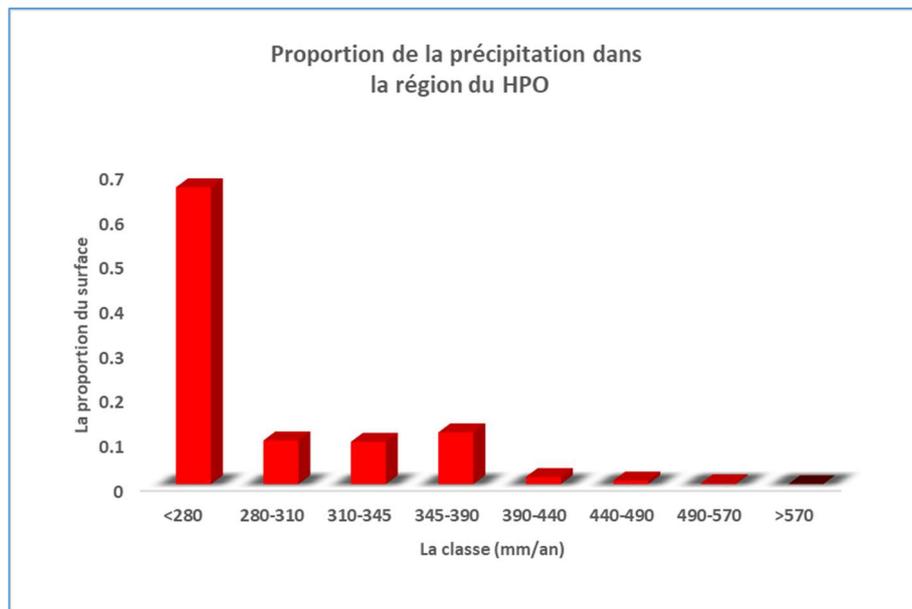


Figure 54 : Proportion du critère précipitation dans la région du HPO

6.1.7. L'aridité

Le HPO a un écosystème le plus vulnérables de l'Algérie, il appartient à la région de la steppe continentale, qui est considérée comme une région aride (Nedjaroui and Badrani 2008).

L'aridité a un impact significatif sur l'instabilité et le déséquilibre de l'écosystème d'une région. Selon l'American Meteorological Society AMS (2000), l'aridité est définie comme le degré auquel un climat manque d'humidité efficace et propice à la vie.

La température, les précipitations et l'évapotranspiration de référence sont les paramètres les plus couramment utilisés pour déterminer le degré d'aridité, tel que défini par l'équation (eq.53) (Trabucco and Zomer 2018).

$$Global_{Aridity_{Et0}(Al_{Et0})} = \frac{MA_{Pr}}{MA_{ET0}} \quad (53)$$

Où:

MA_{Pr} : Précipitation annuelle

MA_{ET} : Évapotranspiration annuelle moyenne ($ET0$)

Selon la méthode Penman-Monteith (FAO-PM) (Allen et al. 1998), $ET0$ peut être estimé par l'équation (eq.54) :

$$ET0 = \frac{0.408 * \Delta * (R_n - G) + Y \frac{900}{T_{avg} + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + Y * (1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (54)$$

Où :

$ET0$: l'évapotranspiration de la culture de référence (mm jour⁻¹)

Δ : la pente de la courbe qui correspond la vapeur d'eau (kPa °C⁻¹)

R_n : le rayonnement net à la surface de la culture (MJm⁻² jour⁻¹)

G : la densité du flux thermique du sol (MJm⁻² jour⁻¹)

Y : la constante psychrométrique (kPa °C⁻¹)

T_{avg} : la température moyenne quotidienne de l'air à 2 m de hauteur (°C)

u_2 : la vitesse du vent à 2 m de hauteur (m s⁻¹)

e_s, e_a : sont respectivement la saturation et la pression de vapeur réelle (kPa)

r_s, r_a : sont respectivement la surface globale et la résistance aérodynamique (m⁻¹)

Les classe du climat peuvent se distinguer par le paramètre de l'indice de l'aridité comme il indiqué le tableau 17.

Tableau 17: Classe de climat (UNEP 1997)

Valeur de l'indice d'aridité	La classe du climat
<0.030	Hyper Aride
0.03-0.2	Aride
0.2-0.5	Semi-Aride
0.5-0.65	Sub_Humide
>0.65	Humide

L'indice d'aridité (AI_{ET0}) subdivise la région en trois classes distinctes (figure 55, figure 56, tableau 16). La première est la classe "aride", qui représente environ 79 % de la superficie totale et elle est située au-dessous de latitude égale à 35°. La deuxième est la classe de type "semi-aride", qui est située au-dessus de 35°, en plus des régions qui se trouvent à cotées des montagnes de l'Atlas saharien dans le sud, elle occupe environ 21 % de la superficie totale. Bien que, la troisième classe est la "sub_humide", qui représente environ 4% de la totalité du HPO. Elle est définie comme étant une bande équivalente à 30 km de large, située au-dessus de 35° (latitude).

Cette bande comprend toutes les zones dont l'altitude est supérieure à 600 m dans les régions de Tiaret et Tissemsilt.

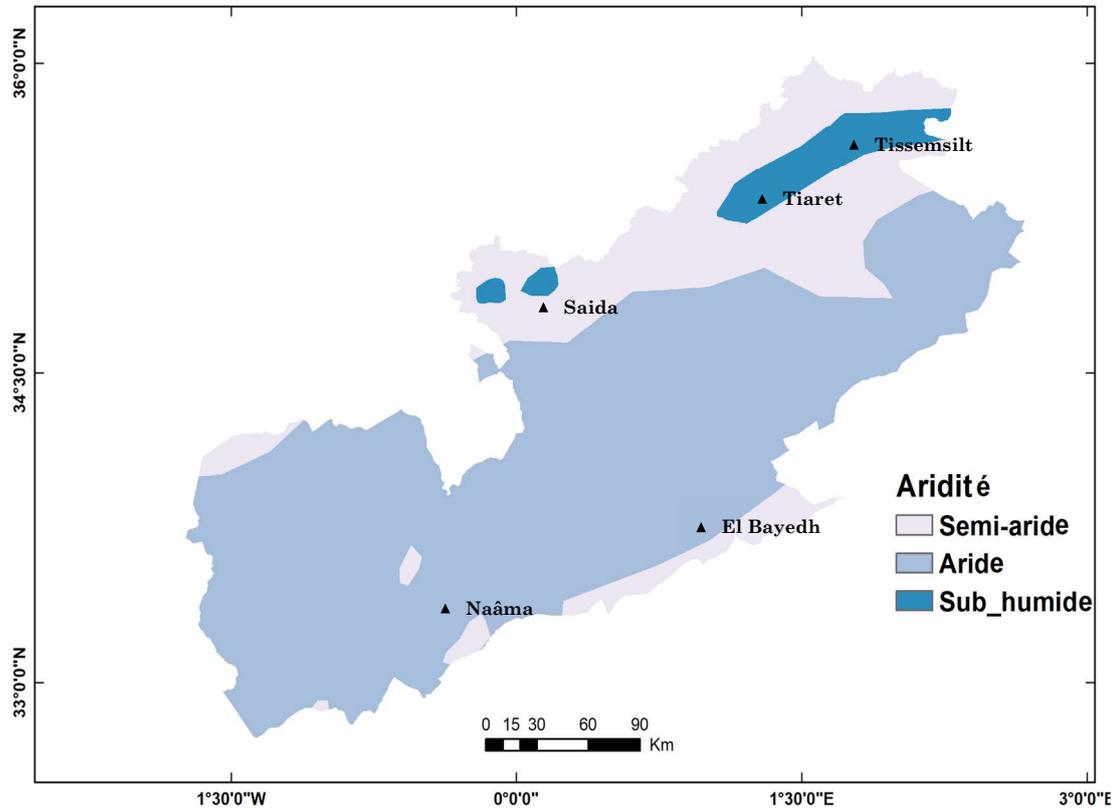


Figure 55: La carte de l'aridité dans la région du HPO (Kadri and Nasrallah 2023)

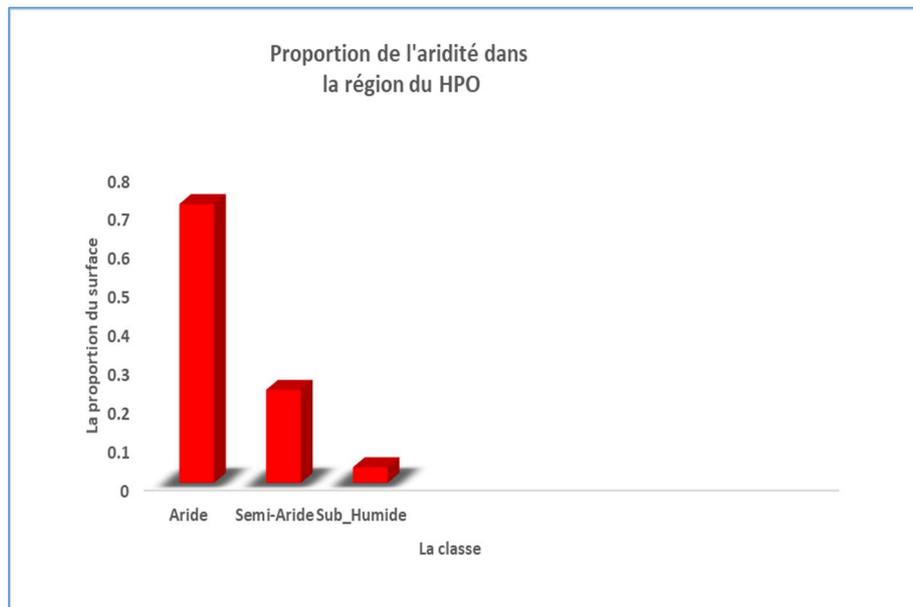


Figure 56 : Proportion du critère aridité dans la région du HPO

6.1.8. La densité de la population

Parmi les facteurs anthropiques qui mènent à la désertification est la croissance démographique. Elle influence d'une manière directe à la dégradation des ressources naturelles et faisant de la désertification une réalité coûteuse.

La population de la région a augmenté de manière significative avec un ratio de +0,13 entre 1998 et 2008 et +0,30 entre 2008 et 2018 (ONS 2021). La majorité de la population est concentrée dans les zones urbaines et les villes métropolitaines (Tiaret, Saïda, El bayedh, Naâma, Tissemsilt, Mechria) (figure 57, figure 58, tableau 16). Plus de 52% de la population du HPO a un âge compris entre 20 et 60 ans (ONS 2021) et selon ONS (2021); 12% de la population du HPO a une activité directe liée à l'agriculture (agriculture, pastoralisme, élevage, etc) et cela a entraîné une pression terrible sur les capacités naturelles de la région.

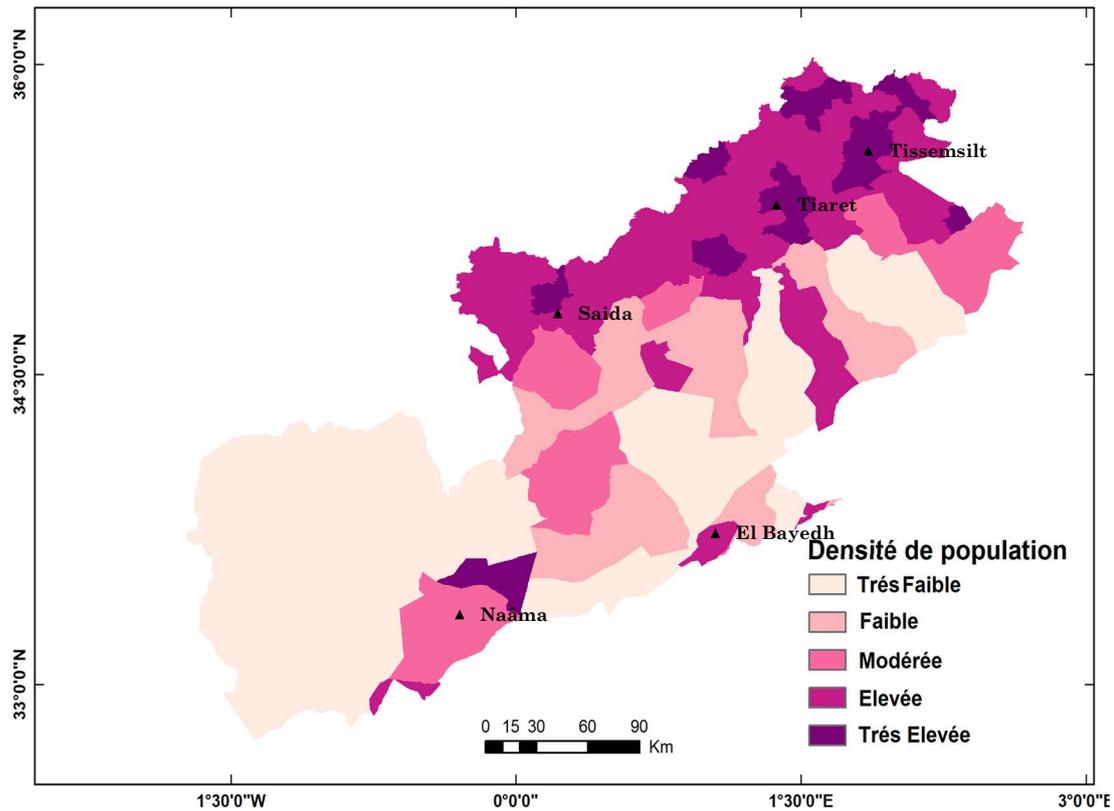


Figure 57: La carte de la densité de population dans la région du HPO (Kadri and Nasrallah 2023)

La densité de la population dans la région du HPO est classée en cinq catégories. La première classe représente une forte densité de population avec une concentration de 100 personnes/km², occupant environ 7% de la région tandis que la classe qui présente la densité la plus faible (4 personnes/km²) occupe environs 43% de la surface du HPO. Quant au reste, les classe de type faible, modérée et faible, partagent environs 50% de la surface de la région.

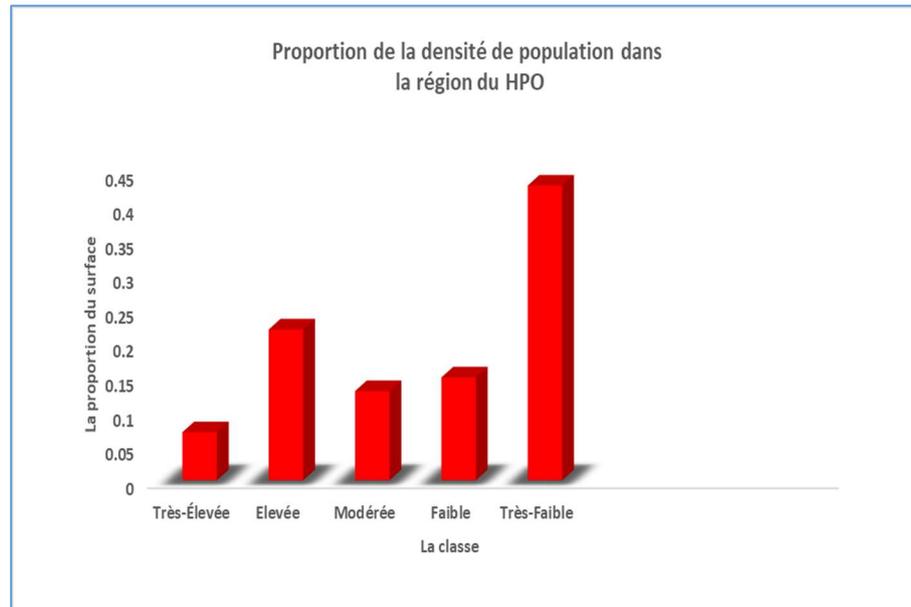


Figure 58 : Proportion du critère densité de la population dans la région du HPO

6.1.9. La densité du réseau routier

La densité du réseau routier est un élément crucial de la pression anthropique qui peut déstabiliser directement ou implicitement la désertification des terres. La construction des routes de toute nature a un impact significatif sur les ressources naturelles et la détérioration de l'écosystème (Cohen et al. 2021). Parmi leurs conséquences, on peut citer l'augmentation de l'accessibilité humaine, la dévastation des plantes naturelles, l'obstruction et l'altération des voies de migration des animaux, l'altération et la distorsion des cycles biogéochimiques naturels, la perte et la fragmentation du paysage entre leurs tracés, et à l'intérieur des milieux environnants (Belnap 2002). Elle implique aussi des changements dans les schémas hydrologiques en redirigeant l'eau de pluie le long des routes (Belnap 1995).

La densité des routes peut être calculée à l'aide de l'équation (eq.55) (Simões et al. 2022) :

$$Densité_Réseau_Routier = \frac{Réseau_Routier_{Longueur(km)}}{Surface_Géographique_{(km^2)}} \quad (55)$$

La densité du réseau routier dans la région du HPO a été divisée en cinq classes en fonction de l'importance de type de route (figure 59, figure 60, tableau 16). Une densité très élevée représente 1% de la zone totale et elle est concentrée au nord-est de la région. La classe dominante a une très faible densité et représente environ 44% de la zone du HPO, on peut la retrouver dans les alentours de la région tandis que la classe de type "élevée" se concentre dans les axes qui lient les régions les plus importantes du HPO (ville de Tiaret, ville de Saïda, ville de Naâma ... etc) et à mesure que l'on s'éloigne de ces zones, la densité deviendra faible.

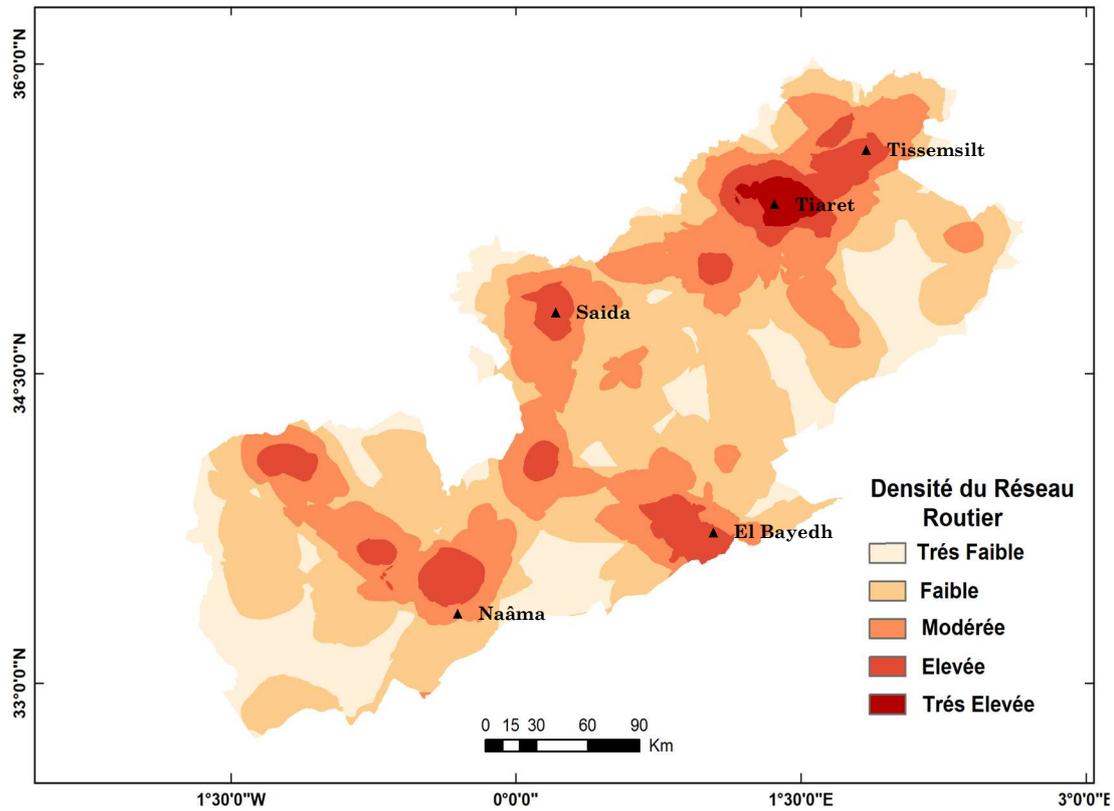


Figure 59 : La carte de la densité du réseau routier dans la région du HPO (Kadri and Nasrallah 2023)

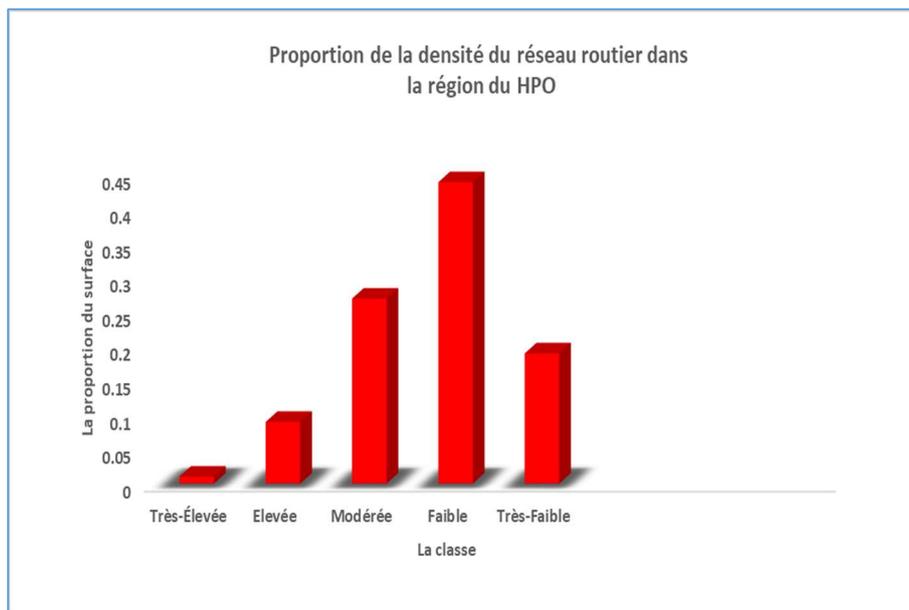


Figure 60 : Proportion du critère densité de réseau routier dans la région du HPO

6.1.10. La densité du bétail

Depuis l'indépendance, une grande partie de la population du HPO tire ses revenus de l'élevage. En effet le HPO est une région steppique caractérisée par une vaste prairie plate et une grande variété d'espèces de graminées. La croissance non surveillée et incontrôlable

du nombre de cheptel était un facteur important qui a accéléré la déstabilisation et la détérioration des écosystèmes arides.

Selon des statistiques fournies par des organismes locaux et gouvernementaux (tableau 18), la richesse en matière d'unité pastorale dans la région est estimée (en 2022) à 970 983 unités pastorales :

Tableau 18: Statistiques des cheptels dans la région du HPO (2022)

	La race				
	Ovin	Bovin	caprin	Camelin	Équin
Nombres	7900000	128590	605700	18214	14918

Outre, la croissance du nombre de cheptel, le changement climatique alarmant qu'a connu la région rend l'environnement steppique de la région plus vulnérable.

La quantification des taux de pâturage et leur suivi deviennent un point essentiel pour observer et suivre les changements relatifs au paysage naturel.

Afin de cartographier le critère de densité de bétail, la formule (eq.56) a été utilisée par UNE (2018):

$$Densité\ bétail = (0.1 * N_{Ovin} + 0.7 * N_{Bovin} + 0.1 * N_{Carpin} + N_{Camelin} + 0.8 * N_{Equin}) / surface(km^2) \quad (56)$$

Où

N : est le nombre de catégories des animaux de pâturage.

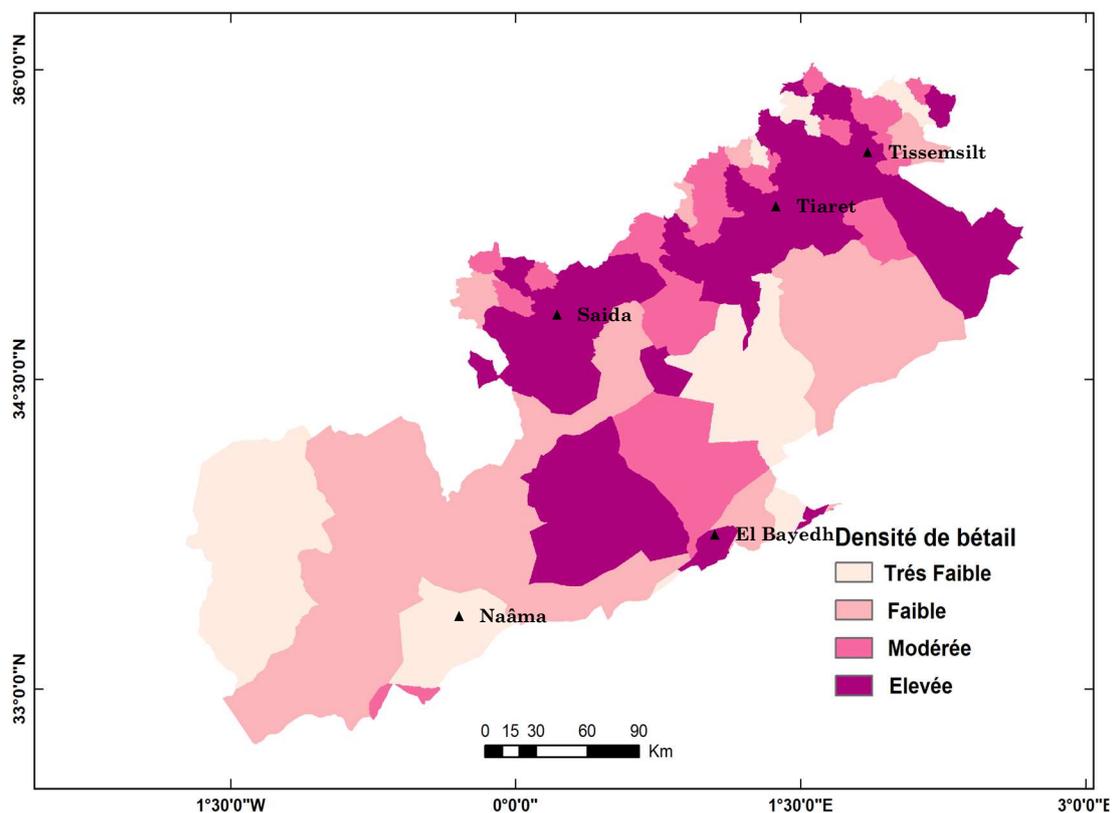


Figure 61: La carte de la densité de bétail dans la région du HPO (Kadri and Nasrallah 2023)

La densité de bétail du HPO est divisée en quatre classes (figure 61, figure 62 et le tableau 16) ; la classe dominante est la classe à caractère "Faible" occupe environ 37% de la superficie du HPO. La classe qui représente la surface la plus petite est celle de la classe de densité "Modérée" avec une superficie égale à 13% de la surface totale, tandis que la classe de type "élevée" occupe environs 30% de la surface totale de la région. Il est remarquable que cette haute densité soit concentrée auprès des villes métropolitaines et ça, était due au rapport du nombre élevé d'unité de bétail relativement aux petites surfaces occupées par ces villes. En ce qui concerne la densité à caractère "Très faible", elle présente environ 20% de la surface totale et elle se trouve dans le sud et l'extrême sud-ouest du HPO. Quand la densité du bétail augmente, la pression sur les ressources naturelles s'accroît, et par conséquent ça entraîner une dégradation de plus des terres.

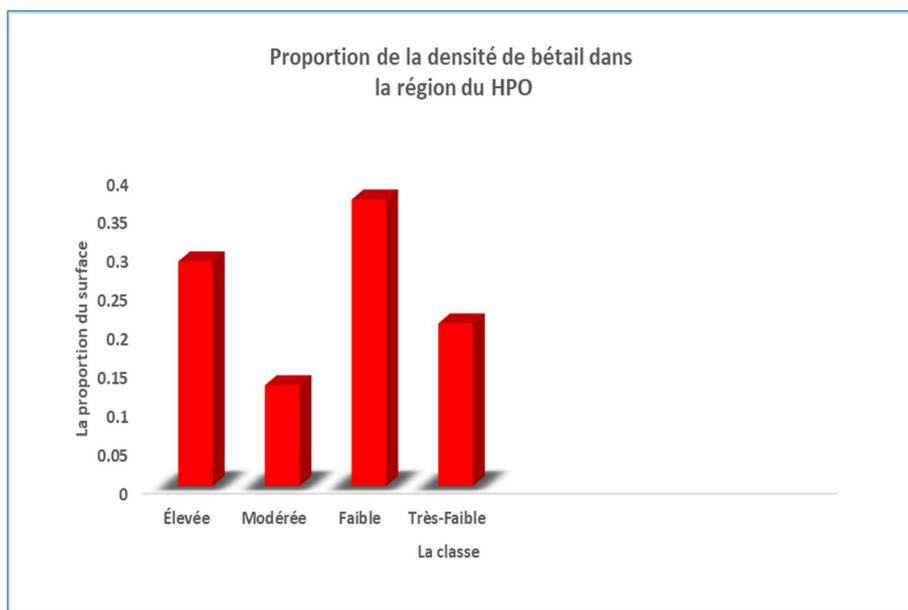


Figure 62 : Proportion du critère densité de bétail dans la région du HPO

6.2. Évaluation des zones de désertification

La combinaison des systèmes d'information géographique (SIG), la technique d'analyse multicritère présentée par la méthode AHP et les dix couches d'informations (critères) représentés par : la pente, la texture, la roche mère, la précipitation, le couvert végétal, l'aridité, la densité de population, la densité du réseau routier, la densité de bétail et le drainage permet de déterminer le degré de vulnérabilité à la désertification de chaque zone du HPO. Une matrice de comparaison par paire (PCM) a été établie pour identifier les poids de ces critères, puis une analyse excessive (WOA) basée sur les sorties de l'AHP a été intégrée pour générer la carte thématique de la désertification.

Enfin, une couche raster a été produite en moyennant et en arrangeant les résultats des scores dans quatre catégories (2, 4, 5, 7) suivant le critère de Saaty (1980). Ces derniers représentent les quatre zones distinctes du phénomène de la désertification et dégradation des terres (DDT) dans la région du HPO.

La classe où la région n'était pas affectée par la désertification est mentionnée "Non-affectée". La classe dont les zones sont légèrement affectées par ce phénomène est nommée "Potentielle", les zones, là où la désertification devient agressive relativement aux zones de la classe "Potentielle", est appelée classe "Fragile" et enfin, les zones complètement désertées sont dénommées "Critique" (figure 63).

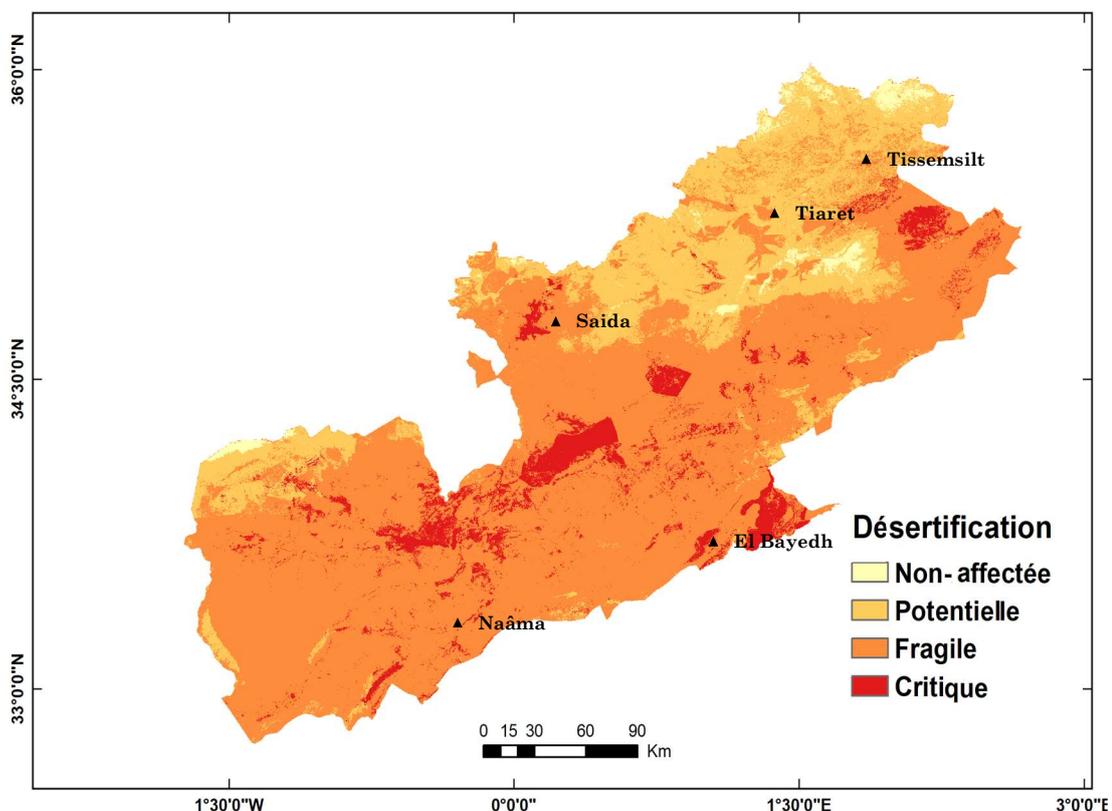


Figure 63 : La carte du désertification et dégradation des terres (DDT)

En ce qui concerne le taux d'occupation de chaque classe relativement à la surface totale du HPO :

- la classe "Non-affectée", occupe environ 2% de la superficie du HPO, ce qui représente une aire très petite par rapport aux autres classes, elle est concentrée dans le nord, le nord-est et certaines régions du nord-ouest. Les régions, dans ce type de classe, se caractérisent par un climat sub-humide ou semi-aride, des précipitations élevées, un sol bien drainé et un NDVI supérieur à 0,13. La texture du sol et la roche mère sont considérées comme bonnes. Cette zone est marquée par une pente plate et douce, les densités du réseau routier et de bétail sont pratiquement faibles et très faibles, respectivement, (tableau 19).
- la deuxième classe est celle de type "Potentielle", qui occupe environ 21% de la superficie totale, elle est concentrée dans la région du nord-est du HPO. Cette catégorie se distingue par des précipitations variantes entre élevées et modérées. Le sol est de type limoneux, la roche mère est considérée pauvre en raison de la présence de grès, de marne et de pyroclastiques, et pour ce qui est du climat, dans ce type de classe est défini comme semi-aride. En termes de drainage, les classes se basculent entre un drainage modéré et bien drainé. Cette classe est caractérisée aussi par une densité de couvert végétale moins dense relativement à la classe de type " Non-affectée", tandis que la densité du réseau routier et de bétail est estimée plus élevée par rapport à la première classe.

Finalement, le critère pente, les valeurs de ses pixels varient entre 3% et 12% (tableau 19).

En ce qui concerne l'impact de la population dans la carte finale du "DDT", il a été constaté que l'effet de ce paramètre sur le phénomène de désertification est considéré comme marginal et par conséquent son influence sera égale pour toutes les classes de la carte de "DDT". Cela s'explique par le faible poids généré par la technique AHP et la faible densité de la population signalée dans presque toute la région.

- la troisième classe est à caractère "Fragile", c'est la classe la plus dominante avec 69% de la superficie totale ; elle est marquée par : ses faibles précipitations, une texture de sol est modérée et le climat est considérée comme aride et semi-aride. L'indice NDVI varie entre 0,10 et 0,11. Pour les autres critères, une détérioration de leurs qualités est remarquable, cela comprend : la pente, la roche mère, le drainage, la densité du réseau routier et la densité du bétail (tableau 19).

Tableau 19: Propriétés des zones de désertification dans la région du HPO

Classe de Désertification	Surface (km ²)	Surface (%)	propriété de la zone
Non-affectée	1375	2	Précipitation élevée ; Texture de type loam ; Roche mère: Shale, basalte, conglomérat et roches non-consolidées ; Climat : Sub_humide et semi-aride ; Bon drainage ; Couvert végétal (Ndvi) : > 0.13 ; Densité du réseau routier faible ; Densité du bétail très faible ; Pente entre 3% et 6% ; Densité de population: toutes les classes;
Potentielle	16290	21	Précipitation entre élevé et modérée ; Texture de type loam ; Roche mère: Grés, marne and pyroclastiques ; Climat : Semi-aride ; Drainage entre moyennement bon et bon ; Couvert végétal (Ndvi): entre 0.11 et 0.18; Densité du réseau routier entre faible et modérée ; Densité du bétail faible ; Pente entre 3% et 12% ; Densité de population: toutes les classes;
Fragile	52327	69	Précipitation faible ; Texture : loam, argile ; Roche mère: Grés, marne et pyroclastiques ; Climat : Semi-aride, aride ; Drainage moyennement modérée jusqu'à drainage imparfait ; Couvert végétal (Ndvi): entre 0.10 et 0.11; Densité du réseau routier : élevée jusqu'à très élevée ; Densité du bétail ; entre faible et modérée ; Pente : : toutes les classes sauf :18% ; Densité de population: toutes les classes;
Critique	5794	8	Précipitation très faible ; Texture : Sable, limon ; Roche mère: Grés, marne et pyroclastiques; Climat : Aride; Drainage : entre Imparfait et un drainage très médiocre ; Couvert végétal (Ndvi) : > 0.13; Densité du réseau routier : élevée ; Densité du bétail ; élevée ; Pente : : toutes les classes ; Densité de population: toutes les classes;

- enfin, pour la dernière classe mentionnée "Critique", le niveau de la détérioration est devenu alarmant par rapport à la classe de type "Fragiles" (tableau 19). Elle se distingue par une pression anthropique élevée (densité du réseau routier, densité du bétail), une couverture végétale très faible et un sol de faible qualité (texture, lithologie et drainage). Elle est également caractérisée par un climat aride et des précipitations faibles. En ce qui concerne la pente, elle a un effet insignifiant pour cette classe. Sa superficie couvre environ 5794 km² (8%). Elle se concentre autour des eaux salines dans le centre (chott Ech-cheroui), à l'ouest (chott Elgharbi) et dans certaines régions du sud et de l'est.

En termes de probabilité d'apparition de chaque classe dans la carte finale, on a constaté que la classe "Non-affectée" a une chance de 0,0015 d'être présente dans la carte finale, la classe de type "Potentielle" a une probabilité de 0,2879, la troisième classe "Fragile" a une chance de 0,6618 et la dernière classe "Critique", a une chance de 0,0487 d'exister dans le produit final. Cet ordre de grandeur de probabilité dépend de :

- 1) choix de la matrice de comparaison par paire (PCM).
- 2) nombre des sous-classes des couches d'entrées.
- 3) nombre des classes dans le produit final (carte de DDT).

L'objectif de la réalisation de la carte de désertification et de dégradation des terres (DDT) est d'identifier et de délimiter les niveaux de terres dégradées auxquels les zones étudiées peuvent être vulnérables ou exposées à ce phénomène.

De nombreuses études et enquêtes ont été menées dans la région, mais elles étaient davantage axées uniquement sur l'aspect anthropique (Aïdoud et al. 2006; Bensaid et al. 2007; Nedjraoui and Bédrani 2008). Par conséquent, dans ce travail, une tentative est réalisée pour mettre en évidence ce phénomène et intégrer d'autres facteurs ayant un impact significatif tels que le sol, la végétation et le climat (Basso et al. 2012; Ferrara et al. 2020; Kadović et al. 2016; Lahlaoui et al. 2017; Momirović et al. 2019).

L'intégration de la technique AHP avec l'environnement SIG est devenue l'une des alternatives les plus utilisées dans la cartographie et la délimitation de la DDT (Budak et al. 2018; Ravesh et al. 2010; Saadi et al. 2008; Türkeş et al. 2020).

6.3. Précision et validation

Afin d'évaluer la carte de la désertification obtenue, un échantillon aléatoire de 553 points a été extrait. Des procédures d'exploration de données et des techniques statistiques multivariées ont été utilisées pour mieux parcourir les patterns spatiaux et les relations entre les critères. Pour superviser les données ; une technique d'analyse en composantes principales (ACP) a été intégrée pour contrôler et réduire la redondance et la multicollinéarité entre les variables.

L'ACP est appliquée à une matrice de dix variables (la pente, la texture, la roche mère, le drainage, le couvert végétal, les précipitations, l'aridité, la densité de population, la densité

du bétail et la densité du réseau routier), par conséquent, trois composantes expliquent plus de 71% de la variance totale ont été obtenues (figure 64, tableau 20).

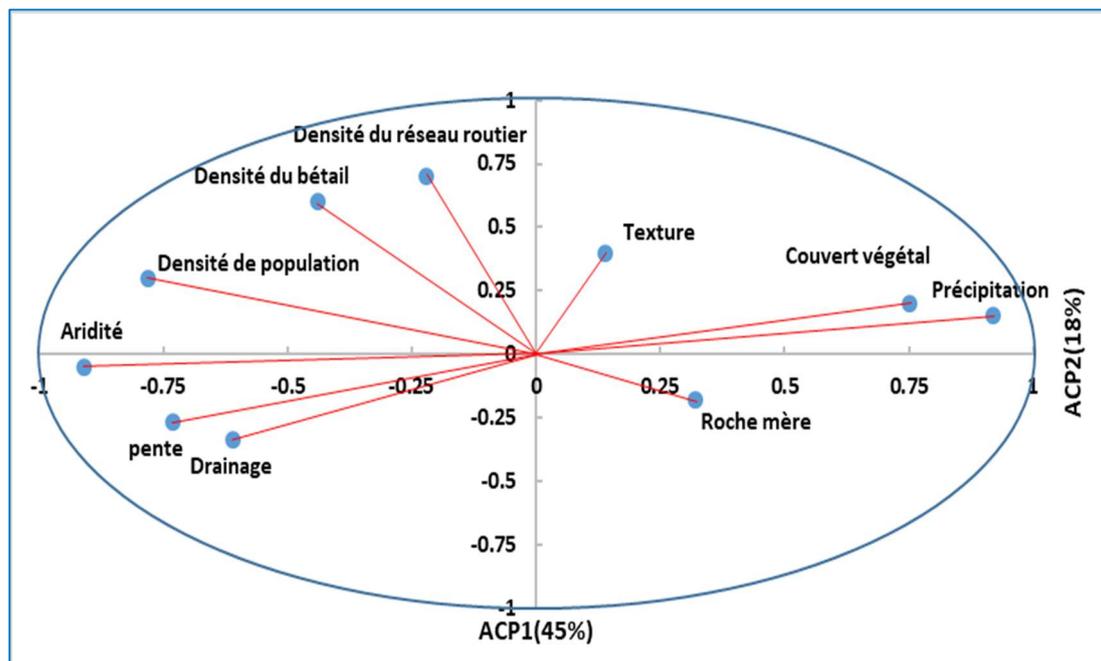


Figure 64 : Disposition des critères par L'ACP

L'ACP1 représente environ 45% de données récoltées par l'échantillonnage, ce qui est associé à des critères ont des poids plus importants (précipitation (0.92), couvert végétal (0.75), l'aridité (-0.91), la pente (-0.73), la densité de population (-0.78) et le drainage (-0.66)).

L'ACP2 et l'ACP3 représentent respectivement 18% et 8% des données des variables et qui sont équivalentes à ceux qui reste des critères. Elles sont définies principalement par ACP2 : la densité du réseau routier (0.70), densité de bétail (0.60) et l'ACP3 par la roche mère (0.87).

Tableau 20: Résultats de l'ACP appliquée aux critères de la désertification

Critère	ACP1	ACP2	ACP3
La pente	*-0.73	-0.27	0.38
La texture	0.14	0.40	0.13
La roche mère	0.32	-0.18	*0.87
Le drainage	*-0.66	-0.38	0.12
La précipitation	*0.92	0.15	-0.08
L'aridité	*-0.91	-0.05	0.04
Couvert végétal	*0.75	0.20	0.18
La densité de population	*-0.78	0.30	0.15
La densité de réseau routier	-0.22	*0.70	-0.01
La densité du bétail	-0.44	*0.60	0.19

Note : (*) désigne les paramètres pertinents > 0.5

À partir de la figure 64, on observe une variation inversement proportionnelle des paramètres du couvert végétal et des précipitations par rapport au paramètre d'aridité.

Lorsque la quantité de ces deux paramètres augmente, l'aridité diminue, et vice versa ; cela s'explique par l'existence d'un gradient nord-sud du climat.

Pour l'ensemble des paramètres représentant la pression anthropique (la densité de population, la densité du réseau routier et la densité du bétail), il est remarquable qu'ils se regroupent dans le deuxième quadrant du schéma de l'ACP (figure 64) et qu'ils présentent un comportement similaire.

Toujours, d'après la figure 64, les paramètres de drainage et de pente présentent une relation très corrélée, variant de manière proportionnelle l'un par rapport à l'autre. Lorsque les pentes sont fortes, le drainage est noté important. En revanche, dans les zones où les pentes sont faibles (zones plates), le taux de drainage est considéré faible.

En ce qui concerne les paramètres liés au sol comme la texture du sol et la roche mère, on constate que leur distribution ne reflète pas de manière exhaustive et fidèle la réalité naturelle. Ceci peut dépendre de la qualité des données utilisées lors de leur représentation.

Afin de réaliser la carte de DDT, une analyse discriminante a été établie pour identifier les combinaisons de variables qui permettent de, mieux distinguer les différents patterns de la désertification et de regrouper en classes présentant les mêmes caractéristiques de données projetées par ACP. À la base des données de l'ACP, une classification hiérarchique non supervisée a été réalisée par la combinaison de la méthode d'agrégation de Ward ("Ward agglomeration" en anglais) et la distance de type euclidienne comme règle de fusion, (Salvati and Zitti 2009). Cette analyse visait à déterminer les patterns spatiaux des critères élémentaires et par conséquent représentent les classes de la vulnérabilité à la désertification.

À la lumière de ces résultats, quatre classes discriminées (Classe 1, Classe 2, Classe 3 et Classe 4) ont été produites et représentées en deux et trois dimensions (figure 65.a et figure 65.b) respectivement.

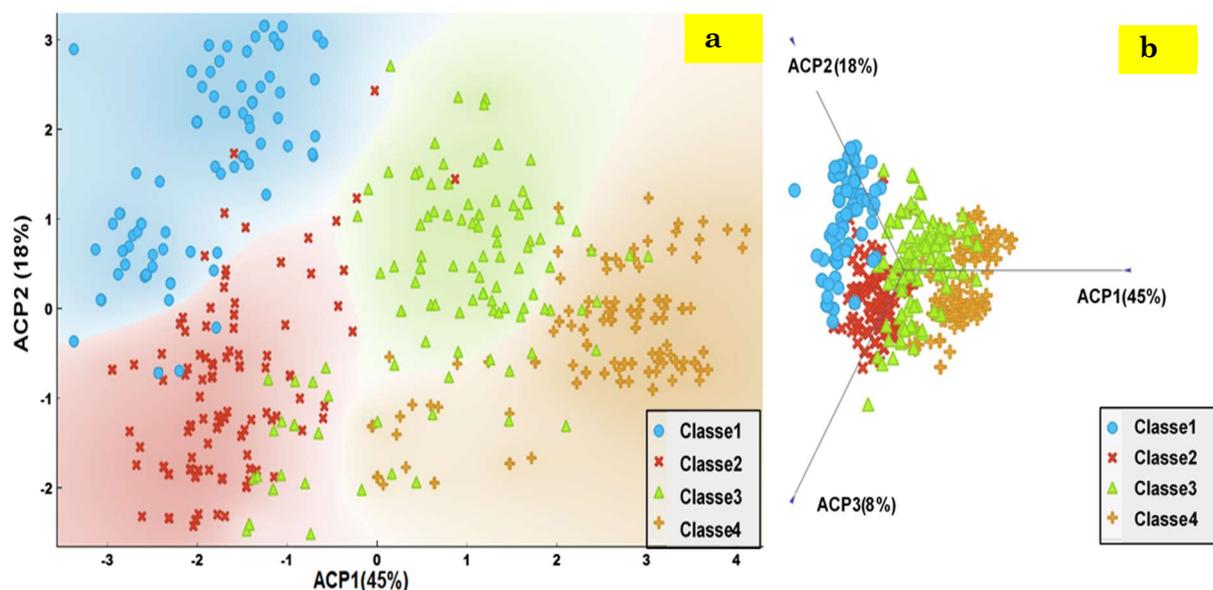


Figure 65 : La distribution en deux (a) et trois (b) dimensions des données ACP discriminées

Pour mettre en valeur la carte de la désertification et de dégradation des terres obtenues par l'approche AHP, les résultats produits par la technique discriminatoire représentés par ACP et classification hiérarchique non supervisée ont été superposés sur cette carte (DDT) (figure 66). En outre une matrice de confusion entre les deux techniques a été établie (tableau 21).

Tableau 21: Matrice d'erreurs

		Classe de référence					
		Classe1	Classe2	Classe3	Classe4	Total	Précision (%)
Classe AHP	Critique	115	4	2	1	122	94.26
	Fragile	17	102	14	8	141	72.34
	Potentielle	0	10	104	13	127	81.89
	Non-affectée	2	7	5	149	163	91.41
	Total	134	123	125	171	553	
	Précision (%)	85.82	82.92	83.2	87.13		84.98

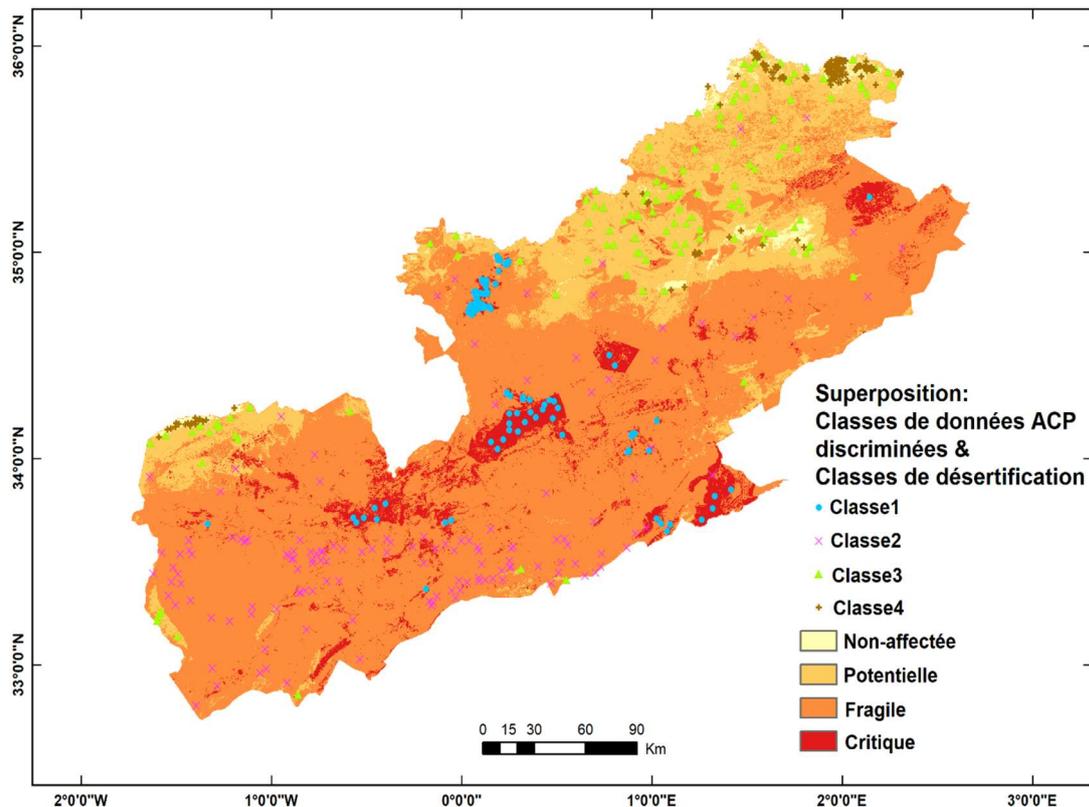


Figure 66 : Superposition des données ACP et la carte de la DDT

La matrice de confusion et la carte obtenue par la superposition des deux techniques montrent qu'il existe une grande corrélation entre les classes de la désertification et de dégradation des terres (DDT) ("Critique", "Fragile", "Potentielle" et "Non-Affectée") et

("Classe 1", "Classe 2", "Classe 3", "Classe 4") produites respectivement par la technique de combinaison ACP et classification non supervisée.

Les classes "Critique" et "Non-affectée" présentent une précision de l'ordre de 86% et 87% en matière d'application de la technique AHP et environ 94% et 91% correspondant à la technique de référence, respectivement.

Les classes "Fragile" et "Potentielle" montrent une précision plus faible relativement aux classes "Critique" et "Non-affectée" (tableau 21).

En ce qui concerne la précision moyenne entre les deux techniques (AHP et référence) pour la représentation de la carte du DDT, est de l'ordre de 85% et qu'est jugée de bonne qualité selon Congalton (1991).

Les classes intermédiaires ("Fragile" et "Potentielle") présentent une confusion légèrement plus élevée par rapport aux classes extrêmes ("Critique" et "Non-affectée"), ce qui peut s'expliquer par la complexité du phénomène, la qualité des données utilisées dans cette étude, la dépendance de la technique AHP aux avis des experts et la qualité des résultats engendrés par l'adoption de l'approche non supervisée.

Bien que cette étude présente des résultats prometteurs, la carte du DDT de la région HPO peut être améliorée par le rétablissement de la même technique tout en basant sur : un réarrangement adéquat des coefficients de la matrice (PCM). L'intégration d'autres critères qui peuvent être ignorés par cette étude et l'amélioration de la qualité des couches d'information en matière d'échelle, de résolution et de données statistiques.

Par conséquent, les résultats obtenus montrent une sorte de validation de cette approche pour la délimitation des classes de la désertification et la dégradation des terres et peuvent être appliqués à d'autres régions présentant des écosystèmes similaires.

7. Discussion

La région du HPO, a connu peu de recherches focalisant leurs objectifs à étudier la variation spatiale ou temporelle du phénomène de la désertification et la dégradation des terres avec l'implication des moyens de SIG et de télédétection. Les plus importantes sont celles de Benslimane et al. (2008); Oussedik et al. (2003) et Salamani et al. (2013). La comparaison entre notre étude et ces études menées dans cette région permet d'effectuer les remarques suivantes :

Au-delà de l'échelle des cartes, l'étendue de la zone d'étude, la période d'étude ; la méthodologie est complètement différente. Notre démarche est basée sur l'intégration des principales couches d'informations relatives à la désertification dans une synergie de SIG et d'analyse multicritère à savoir L'AHP, dont l'estimation et la validation s'est fait par le biais d'une classification non supervisée basée sur une technique d'intelligence artificielle.

Les autres démarches à l'exception de Salamani et al. (2013) sont issues principalement de l'exploitation des données satellitaires (classification et indices) dont leur objectif

primordial est de déterminer uniquement la carte d'ensablement, laquelle est sensible au choix de la qualité des images satellitaires, et qui ne fait pas nécessairement appel à un travail de terrain.

La carte de [Benslimane et al. \(2008\)](#) est réalisée sur la base d'indices issus des images satellitaires du capteur MODIS (Albédo, NDVI et Températures de surface), la période de cette étude est très courte (2000-2005) ce qui pose un problème de représentativité de ces données. Le NDVI ou indice de végétation normalisé donne des résultats peu fiables dans les zones ayant un faible couvert végétal ([Escadafal and Huete 1991](#); [Hirche et al. 2011](#)); tel que les milieux steppiques qui couvrent de grandes superficies. Par contre, dans notre cas, la carte de l'NDVI moyen de la région était établie par l'intégration des séries temporelles d'images landsat 8 (la résolution est de 30 mètres) depuis 2013 dans la plateforme GEE et peut de ce fait être considérée comme étant relativement fiable.

Toujours selon la carte de [Benslimane et al. \(2008\)](#), les milieux qui ont été désignés par végétation très dense et dense (le nord et nord-est du HPO) ne sont pas classés alors qu'ils peuvent être vulnérables à la désertification. C'est pourquoi, il en a été tenu compte dans le présent travail ([Salamani et al. 2013](#)).

Outre la qualité des données et la méthodologie adoptée par [Benslimane et al. \(2008\)](#), un autre facteur qui a restreint la qualité des résultats obtenus par cette étude est l'absence de moyen de validation.

L'ensemble de la carte de [Oussedik et al. \(2003\)](#) n'est pas publiée, et il aurait été intéressant de croiser ses résultats avec les nôtres. Leur démarche est basée sur l'analyse du croisement de trois couches d'informations qui sont :

- La carte d'occupation des sols : classification supervisée des bandes TM3, TM4 et TM1 du capteur Landsat ; il ressort dans cette classification les différents groupements steppiques, les sols nus, le sable, les céréalicultures, les forêts et le reboisement.
- La carte pédopaysagique : photo-interprétation des bandes TM7, TM4, TM2 et carte lithologique.
- La carte d'ensablement : utilisation de l'indice de brillance.

Si la démarche semble intéressante, certaines informations cruciales telles que les paramètres climatiques ne sont pas prises en considération.

Une autre étude menée par [Salamani et al. \(2013\)](#) adopte la stratégie MEDALUS par l'intégration de trois grandes familles d'indices (végétation, sol et climat) qui peuvent contrôler et évaluer le phénomène de la désertification et la dégradation des terres dans la région.

Cette recherche ressemble dans sa forme structurelle à notre étude sauf que la qualité et les ressources des données intégrées ne sont pas mentionnées.

Il est remarquable que l'étendue ciblée est le nord de l'Algérie et par conséquent la qualité des données en matière de végétation, sol et climats ne peuvent qu'être des informations de très faible résolution, contrairement à notre étude ; où on a adopté la résolution de 90*90 m comme résolution de référence. Dans cette même étude, on note que [Salamani et al. \(2013\)](#) ont négligé le facteur anthropique qui est un élément crucial dans la désertification et la dégradation des terres, alors que la notre a pris en considération ce paramètre par l'intégration des éléments qui représentent ce facteur à l'instar de la densité du bétail, la densité du réseau routier et la densité de population.

Cette négligence a engendré une nette différence entre notre carte de désertification et celle réalisée par [Salamani et al. \(2013\)](#), et cela est apparu clairement dans les alentours des grandes villes, autour des grands axes routiers et dans les zones pastorales caractérisées par un grand nombre de bétail.

[Salamani et al. \(2013\)](#) ont indiqué que leur carte de sensibilisation à la désertification est validée par un échantillon issu de terrain alors que l'étude n'a pas porté des éclaircissements en matière de statistiques et de précision relative à cette carte et par conséquent ça restreint la qualité de ce produit. En contrepartie la méthode de validation représentée dans notre étude est celle d'une analyse discriminante basée sur les résultats des nouvelles coordonnées obtenues lors de l'application de l'analyse en composante principale à un échantillon sélectionné aléatoirement. Ce type de validation a donné des résultats prometteurs dans des études focalisées sur la désertification et la dégradation des terres menées par [Salvati and Zitti \(2009\)](#) et [Ferrara et al. \(2020\)](#).

Un autre facteur qui peut empêcher de faire une comparaison fiable entre ces deux recherches est le nombre de classes produits dans la carte de synthèse, car l'étude réalisée par [Salamani et al. \(2013\)](#) le nombre de classe de la désertification est limité à cinq classes (très sensible, sensible, moyennement sensible, peut sensible et non classé) alors que dans notre étude, le nombre de classe est équivalent à quatre (critique, fragile, potentielle et non affectée) ce qui provoque une différence d'échelle de comparaison.

Bien qu'il existe des différences entre ces deux études en matière de type des données, qualité des données, période d'étude, l'échelle de dégradation et la méthodologie adoptée, on remarque que la forme générale des zones dégradées est la même dans les deux cartes sauf que l'appellation et l'échelle sont différentes (Exemple: dans l'étude menée par [Salamani et al. \(2013\)](#), la zone la plus dégradée est nommée "très sensible" alors que dans notre étude cette zone est considérée comme "fragile". La ressemblance est marquée aussi dans les régions de sebkha (Chot Ech-cheroui et Chot Elgharbi) où [Salamani et al. \(2013\)](#) les ont noté comme zones "non classifiées" alors que dans notre étude sont mentionnées comme "critique".

Toutefois, une comparaison crédible entre deux ou plusieurs recherches portant sur des phénomènes naturels complexes, tels que la désertification, nécessite qu'elles partagent plusieurs éléments, dont les plus importants sont : la méthodologie de recherche, la quantité

et la qualité des données, la période de collecte des données, le temps de traitement et la procédure de validation. Malheureusement, toutes ces conditions ne sont pas réunies dans notre cas.

Il est regrettable que la région n'ait pas reçu l'attention nécessaire de la part de la communauté scientifique, ce qui a rendu le nombre de ces études faible et insuffisant.

À la lumière des résultats obtenus, cette étude est considérée comme étant une contribution sur laquelle d'autres études pourraient s'appuyer à l'avenir.

8. Conclusion

Une approche AHP basée sur les système d'information géographique a été utilisée pour l'identification et la délimitation du phénomène de la désertification et dégradation des terres dans la région des hauts plateaux occidentaux de l'Algérie (HPO). Dix critères représentés par : la pente, la texture du sol, la roche mère, le drainage, l'aridité, la couverture végétale, les précipitations, la densité de réseau routier, la densité de la population et la densité du bétail ont été mis en œuvre dans un environnement SIG (ArcGIS, QGIS) pour représenter les différentes classes de la désertification. 8% de la zone totale du HPO a été classé comme région "Critique", 69% est à caractère "Fragile", 21% est considérée comme "potentielle" et 2% était classé comme région "Non affectée". Cette étude a montré que la technique AHP basée sur le SIG présente un alternatif optimale pour le suivi, contrôle et évaluation de l'impact de ce phénomène sur la région et par conséquent l'homme. Les résultats obtenus ont montré que les paramètres du climat, du sol et de la couverture végétale jouent un rôle clé dans l'amplification de la DDT relativement aux paramètres anthropiques qui étaient toujours considérés comme principal facteur de la détérioration.

La domination de la classe fragile dans la région du HPO a transmis un message fort à la population, aux décideurs nationaux et locaux que la situation est inquiétante si des mesures de prévention appropriées ne sont pas mises en œuvre. Les communautés nationales et locales sont invitées à assumer leurs responsabilités face aux pires futurs scénarios en élaborant un système législatif adéquat, qui peut servir les acteurs impliqués dans la protection de l'environnement et la conservation de l'écosystème et à interagir sans contraintes.

Conclusion Générale

Depuis le début du millénaire, la contribution des données SIG et de l'imagerie spatiale dans le suivi et l'évaluation des phénomènes naturels a pris une dimension énorme.

L'intégration des outils d'analyse spatiale, d'analyse multicritère et de techniques d'intelligence artificielle a constitué un véritable tournant dans la cartographie et la gestion des risques naturels à caractère régional, notamment la désertification.

La région du HPO a toujours été sujette à ce type de phénomène en raison de ses spécificités climatiques, de son sol, de son couvert végétal et des pressions socio-économiques exercées par sa population.

La nécessité d'examiner et d'évaluer la variation spatio-temporelle de l'ensablement dans la région constitué l'un des deux objectifs de cette thèse :

La carte d'ensablement, obtenue à partir des données biophysiques (Albédo, NDVI, TGSI et LST) intégrées à une technique d'intelligence artificielle optimale, à savoir la méthode "Random Forest", a permis de définir et de délimiter quatre zones concernées par la désertification :

- la première zone, occupant 15% de la surface totale, est considérée comme complètement désertée. Cette catégorie est concentrée dans le nord d'El Bayedh, l'extrême ouest de Naâma et le sud de Tiaret.
- la deuxième classe, équivalente à 20% de la superficie totale, représente les zones où l'ensablement est défini comme "Sévère". Elle peut être identifiée dans le nord de Naâma.
- la classe dominante est de type "Moyenne", couvrant 35% de la superficie totale du HPO, concentrée dans le centre et l'extrême nord-ouest du HPO.
- la classe de type "Non-affectée" détermine les zones où l'ensablement a une influence presque nulle ou marginale, représentant environ 30% de la surface totale. On peut la trouver dans le nord du HPO et quelques étendues dispersées dans le sud.

Le suivi spatio-temporel de l'ensablement entre 2000 et 2023 a révélé une détérioration persistante des terres dans la région. Il est notable que la classe "Moyenne" a gagné des surfaces importantes en comparaison avec son étendue dans les années 2000, tandis que la classe de type "Non-affectée" a perdu beaucoup de terrains au profit des autres catégories.

Cette comparaison a mis en évidence que la quantité de pixels (terrains) perdus de la classe "Non-affectée" vers la classe "Sévère" est plus importante que celle des terrains perdus de la classe "Sévère" vers la classe "Non-affectée". Par conséquent, cela indique une dégradation des terres.

Les résultats obtenus par l'application de différentes techniques d'intelligences artificielles dans la réalisation de la carte d'ensablement ont permis de sélectionner la méthode de "Random Forest", en tant que méthode la plus favorable et la plus optimale relativement aux autres méthodes, en l'occurrence la "KNN" et la "DT".

En ce qui concerne le deuxième objectif, qui visait à aborder de manière plus large et complète le type de désertification, l'attention s'est portée sur l'établissement de la carte de la désertification et de la dégradation des terres (DDT) dans la région du HPO. Cette démarche a pris en compte les paramètres du sol (pente, roche mère, texture, drainage), du climat (aridité, précipitation), de la végétation (NDVI) et de la pression anthropique (densité de population, densité de bétail, densité du réseau routier), avec l'intégration de l'analyse multicritère représentée par AHP et une technique d'intelligence artificielle non supervisée.

Les résultats obtenus par l'établissement de la carte de la désertification et de la dégradation des terres (DDT) ont révélé que :

- la classe de type "Critique" occupe une surface de 5794 km², concentrée autour du chott Ech-cheroui, à l'extrême ouest (chott Elgharbi) et dans quelques étendues dans le sud et l'est.
- la classe "Fragile" couvre environ 69% de la surface totale, représentant la classe la plus dominante en termes de niveau de dégradation. À l'exception de la partie nord du HPO, cette classe est identifiable dans le reste de la région.
- la troisième classe, de type "Potentielle", occupe une surface équivalente à 16000 km² et se trouve dans le nord-est du HPO (Tiaret et Tissemsilt).
- en ce qui concerne la dernière classe, les résultats montrent qu'elle représente les zones où la dégradation est considérée comme "Non-affectée", c'est-à-dire que la désertification est négligeable. Son taux ne représente que 2% de la surface totale, elle peut s'identifier dans le nord et le nord-est.

À la lumière de ces résultats, on peut conclure que la région des hauts plateaux connaît un déclin significatif des superficies qui étaient, dans le passé, considérées comme préservées de la désertification.

Plus de 1/3 de la superficie totale des HPO sont considérées comme une zone plus vulnérable à la désertification, ce qui représente un message d'alerte à l'égard de l'État et de la population locale de l'ampleur des risques et des défis à relever pour empêcher l'expansion de cette zone, et trouver par la suite des mécanismes appropriés pour lutter contre ce phénomène.

La lutte contre la désertification requiert une approche holistique qui intègre la gestion durable des sols, la conservation de l'écosystème et des mesures d'atténuation du changement climatique. La collaboration entre le gouvernement, les communautés locales, le monde associatif et le secteur privé est essentielle pour mettre en œuvre de manière efficace et durable les recommandations qui suivent :

- confortement du taux de boisement et extension de la bande forestière réalisée dans le cadre du barrage vert.
- adaptation des systèmes de cultures et d'élevages aux conditions climatiques nouvelles.
- adaptation du régime foncier et du mode d'exploitation des terres aux réalités du milieu local.
- éradication des défrichements anarchiques en milieux steppique et forestier.
- réhabilitation de la végétation pérenne (Reboisement, mise en défens des parcours, plantation d'espèces fourragères pérennes).
- protection et confortement de l'équipement hydraulique des surfaces pastorales.
- réhabilitation des parcours steppiques et des nappes alfatières par des actions de mise en défens, de régénération et plantation d'espèces fourragères adaptées aux conditions du milieu.
- adaptation de la charge animale aux capacités de production des parcours et développement de la pluriactivité pour compenser le manque à gagner par l'élevage.
- amendement et adaptation de la loi foncière et du code pastoral aux réalités de la steppe.
- actualisation des connaissances sur l'état de la steppe et suivi permanent du domaine steppique.
- réhabilitation du système oasien par des actions de rajeunissement des palmeraies.
- l'amélioration des conditions d'irrigation et la lutte contre l'ensablement.
- exploitation rationnelles des nappes des chotts en évitant un rabattement conséquent de leur niveau piézométrique.
- promouvoir la recherche et le développement de technologies vertes pour lutter contre le changement climatique et atténuer ses impacts sur les zones vulnérables.
- mettre en place des programmes de sensibilisation pour promouvoir la gestion durable des terres et encourager la participation communautaire dans la préservation des écosystèmes.

Références Bibliographiques

- Aïdoud, A., Le Floch, É., & Le Houérou, H. N. (2006). Les steppes arides du nord de l'Afrique. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 17(1), 19-30
- Aïdoud, A., & Touffet, J. (1996). La régression de l'alfa (*Stipa tenacissima* L.), graminée pérenne, un indicateur de désertification des steppes algériennes. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 7(3), 187-193
- Alastal, A. I., & Shaqfa, A. H. (2022). Geoi technologies and their application areas in urban planning and development: concepts, opportunities and challenges in smart city (Kuwait, study case). *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 10(2), 110-126
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome* Retrieved 9, 300
- AMS. (Ed.) (2000) Glossary of meteorology. Boston, MA: American Meteorological Society (AMS).
- APS. (2023). Forêts: plus de 830.000 ha reboisés depuis l'année 2000, from <https://www.aps.dz/economie/119345-forets-plus-de-830-000-ha-reboises-depuis-l-annee-2000>
- ASAL. (2010). Carte nationale de sensibilité à la désertification par l'outil spatial, from https://asal.dz/?page_id=1219
- Balzarini, R., Davoine, P.-A., & Ney, M. (2011). *GIS in Geosciences Training: an experience in pedagogical engineering*. Paper presented at the Proceedings of International Cartographic Conference, Paris.
- Basso, B., De Simone, L., Cammarano, D., Martin, E., Margiotta, S., Grace, P., . . . Chou, T. (2012). Evaluating responses to land degradation mitigation measures in Southern Italy. <https://doi.org/10.22059/IJER.2012.504>
- Bastable, H., Shuttleworth, W. J., Dallarosa, R., Fisch, G., & Nobre, C. A. (1993). Observations of climate, albedo, and surface radiation over cleared and undisturbed Amazonian forest. *International Journal of Climatology*, 13(7), 783-796
- Baydin, A. G., Pearlmutter, B. A., Radul, A. A., & Siskind, J. M. (2018). Automatic differentiation in machine learning: a survey. *Journal of Machine Learning Research*, 18, 1-43
- Becker, F., & Li, Z.-L. (1990). Towards a local split window method over land surfaces. *Remote Sensing*, 11(3), 369-393
- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 114, 24-31
- Belnap, J. (1995). Surface disturbances: their role in accelerating desertification. *Environmental monitoring and assessment*, 37(1), 39-57. <https://doi.org/10.1007/BF00546879>
- Belnap, J. (2002). Impacts of off-road vehicles on nitrogen cycles in biological soil crusts: resistance in different US deserts. *Journal of Arid Environments*, 52(2), 155-165. <https://doi.org/10.1006/jare.2002.0991>

- Benayoun, R., Roy, B., & Sussman, N. (1966). Manual de reference du programme electre. *Note de synthese et Formation*, 25(79)
- Benguerai, A. (2011). *Evolution du phenomene de desertification dans le sud oranais (algérie)*. Tlemcen
- Benmecheta, A. (2017). *Estimation de la temperature de surface a partir de l'imagerie satellitale; validation sur une zone coteiere d'Algérie*
- Bensaid, A., Barki, M., Talbi, O., Benhanifia, K., & Mendas, A. (2007). Multicriterion analysis as a tool for decision-making for the spatial localization of areas under heavy human pressure: a case study of the Naâma department in Algeria. *Revue teledetection*, 7, 359-371
- Bensaïd, S. (1995). Bilan critique du barrage vert en Algérie. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 6(3), 247-255
- 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] *La revue électronique en sciences de l'environnement*, 8(3), 0-0. <https://doi.org/10.4000/vertigo.6782>
- Bernard, G., & Besson, M. L. (1971). Douze méthodes d'analyse multicritère. *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle. Série verte*, 5(V3), 19-64.
- Bicheron, P., & Leroy, M. (2000). Bidirectional reflectance distribution function signatures of major biomes observed from space. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D21), 26669-26681
- Bishay, A., & McGinnies, W. G. (1979). Advances in desert and arid land technology and development. *Vol. I Harwood Academic Publishers. NY*
- Boucheffa, A. M., Mohamed. (2017). Mise en oeuvre d'une base de données vent ALADIN et réalisation d'une carte de régime des vents dominants en Algérie. *JAMA*, 1, 41-47
- Boudjemline, F., & Semar, A. (2018). Assessment and mapping of desertification sensitivity with MEDALUS model and GIS—Case study: basin of Hodna, Algeria. *Journal of water and land development*. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0002>
- Bouznad, I.-E., Guastaldi, E., Zirulia, A., Brancale, M., Barbagli, A., & Bengusmia, D. (2020). Trend analysis and spatiotemporal prediction of precipitation, temperature, and evapotranspiration values using the ARIMA models: case of the Algerian Highlands. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(24), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06330-6>
- Brans, J. (1982). L'ingénierie de la décision: l'elaboration d'instruments d'aide à la decision, Colloque sur l'aide à la decision. *Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, CAN*
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32
- Budak, M., Günal, H., Çelik, İ., Yıldız, H., Acir, N., & Acar, M. (2018). Environmental sensitivity to desertification in northern Mesopotamia; application of modified MEDALUS by using analytical hierarchy process. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(17), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3813-y>
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 62(3), 241-252

- Charnes, A., & Cooper, W. W. (1957). Management models and industrial applications of linear programming. *Management science*, 4(1), 38-91
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444
- Chen, C.-T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 1-9
- Churchman, C. W., & Ackoff, R. L. (1954). An approximate measure of value. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(2), 172-187
- Cohen, S., Groner, E., Peeters, A., & Segoli, M. (2021). The Impact of Roads on the Redistribution of Plants and Associated Arthropods in a Hyper-Arid Ecosystem. *Journal of Insect Science*, 21(4), 4. <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieab044>
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, 37(1), 35-46
- Cornet, A. (2001). La désertification à la croisée de l'environnement et du développement. *Comité Scientifique français de la désertification*
- DAAC, L. (2023). LAADS DAAC, 2023, from <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>
- Das, B., & Pal, S. C. (2020). Assessment of groundwater recharge and its potential zone identification in groundwater-stressed Goghat-I block of Hugli District, West Bengal, India. *Environment, Development and Sustainability*, 22(6), 5905-5923. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00457-7>
- Das, S. (2021). Hydro-geomorphic characteristics of the Indian (Peninsular) catchments: Based on morphometric correlation with hydro-sedimentary data. *Advances in Space Research*, 67(8), 2382-2397. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.043>
- Dastorani, M. (2022). Application of fuzzy-AHP method for desertification assessment in Sabzevar area of Iran. *Natural Hazards*, 112(1), 187-205. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05177-8>
- Dean, M. (2022). A practical guide to multi-criteria analysis. *Bartlett School of Planning, University College London*
- Denègre, J., & Salgé, F. (2004). Introduction aux systèmes d'information géographique. *Que sais-je*, 2(3122), 5-11
- Deren, L. (2016). Towards geo-spatial information science in big data era. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 45(4), 379
- DGF. (2004). Rapport national de l'Algérie sur la mise en œuvre de la Convention de Lutte Contre la Désertification Septembre.
- DIA, A., & NIANG, A. M. (2010). Le Projet Majeur Grande Muraille Verte de l'Afrique: contexte, historique, approche stratégique, impacts attendus et gouvernance. *de la Grande Muraille Verte*, 11
- Diner, D., Martonchik, J., Borel, C., Gerstl, S., Gordon, H., Knyazikhin, Y., . . . Pinty, B. (1999). Level 2 Surface Retrieval Algorithm Theoretical Basis.
- DIS4ME. (2023). Desertification Indicator System for Mediterranean Europe, 2023, from https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/shared_folder/projects/DIS4ME/indicators_list.htm#top
- Doke, A. B., Zolekar, R. B., Patel, H., & Das, S. (2021). Geospatial mapping of groundwater potential zones using multi-criteria decision-making AHP approach

- in a hardrock basaltic terrain in India. *Ecological Indicators*, 127, 107685.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107685>
- Dregne, H. E. (1977). Desertification of arid lands. *Economic Geography*, 53(4), 322-331
- Duan, H., Wang, T., Xue, X., & Yan, C. (2019). Dynamic monitoring of aeolian desertification based on multiple indicators in Horqin Sandy Land, China. *Science of The Total Environment*, 650, 2374-2388.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.374>
- Dupuy, A., Lee, C., Schaaf, T., & Wauchope, S.(2002). Séminaire international sur la lutte contre la désertification: Ressources en eau douce et réhabilitation des terres dégradées dans les zones arides, N'Djamena, Chad, 30 octobre au 4 novembre 2002; actes du séminaire.
- Edwards, W. (1971). The engineering economic summer symposium series. *Social Utilities*, 6, 119-129
- Eldridge, D. J., & Leys, J. F. (2003). Exploring some relationships between biological soil crusts, soil aggregation and wind erosion. *Journal of arid environments*, 53(4), 457-466
- ELISE. (2023). European Location Interoperability Solutions for E-Government Geospatial Artificial Intelligence.
- Escadafal, R., & Huete, A. (1991). Etude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 312(11), 1385-1391
- Esri. (2021a). Esri Road Map, from
<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=3b93337983e9436f8db950e38a8629af>
- Esri. (2021b). How Weighted Overlay works Retrieved 16 november 2022, 2022, from
<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-weighted-overlay-works.htm>
- Esri. (2023a). Taking a Geographic Approach to Machine Learning, from
<https://fr.slideshare.net/MapsMakeSense/taking-a-geographic-approach-to-machine-learning-esri-ireland-do-one-thing-well-webinar-6>
- Esri. (2023b). What is GIS? , from <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview>
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 34(1), 487-515
- Fan, X., & Liu, Y. (2016). A global study of NDVI difference among moderate-resolution satellite sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 121, 177-191. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.09.008>
- FAO, I. (1998). ISSS. *World reference base for soil resources*, 84
- Fao/Unep. (1984). Provisional methodology for assessment and mapping of desertification. *FAO, Rome*, 85
- Feng, K., Wang, T., Liu, S., Kang, W., Chen, X., Guo, Z., & Zhi, Y. (2022). Monitoring desertification using machine-learning techniques with multiple indicators derived from MODIS images in Mu Us Sandy Land, China. *Remote Sensing*, 14(11), 2663

- Fenniche, K. (2018). Application du Processus Hiérarchique Analytique (AHP) a l'évaluation de la performance des banques commerciales. *les cahiers du cread*, 34(4), 39-51
- Ferrara, A., Kosmas, C., Salvati, L., Padula, A., Mancino, G., & Nolè, A. (2020). Updating the MEDALUS-ESA framework for worldwide land degradation and desertification assessment. *Land Degradation & Development*, 31(12), 1593-1607. <https://doi.org/10.1002/ldr.3559>
- Forman, R. T. (1990). Ecologically sustainable landscapes: the role of spatial configuration *Changing landscapes: an ecological perspective* (pp. 261-278): Springer
- Foster, G. R. (1983). Soil Erosion: Developments in Soil Science 10 Vol. 135. *Soil Science* (pp. 131-132)
- Franchis, L. I., F et Benoit, G. (2003). Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens méditerranéens.
- Franzmeier, D., Hosteter, W., Roeske, R., Kladviko, E., & Jenkinson, B. (2001). Drainage and wet soil management. *University of Purdue, Indiana*
- Gabus, A., & Fontela, E. (1972). World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL. *Battelle Geneva Research Center, Geneva, Switzerland*, 1(8), 12-14
- Ghazi. (2006). Problematique de la desertification en Algerie: état et mesures de lutte pour la protection des ressources naturelles. *Desertification in the Mediterranean Region. A Security Issue*, 167-185
- Gillespie, A. R., Rokugawa, S., Hook, S. J., Matsunaga, T., & Kahle, A. B. (1999). Temperature/emissivity separation algorithm theoretical basis document, version 2.4. *ATBD contract NAS5-31372, NASA*
- Glantz, M. H., & Orlovsky, N. S. (1983). Desertification: A review of the concept. *Desertification Control Bulletin*, 9, 15-22
- Gridsoil. (2021). World Grid soil, from <https://soilgrids.org/>
- Habenicht, W., Scheubrein, B., & Scheubrein, R. (2002). Multiple-criteria decision making. *Theme*, 6(5)
- Hamlat, A., Kadri, C. B., Guidoum, A., & Bekkaye, H. (2021). Flood hazard areas assessment at a regional scale in M'zi wadi basin, Algeria. *Journal of African Earth Sciences*, 182, 104281. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104281>
- Hammouche, R. (1990). *Atlas vent de l'Algérie*: Office National de la Météorologie.
- Hirche, A., Salamani, M., Abdellaoui, A., Benhouhou, S., & Valderrama, J. M. (2011). Landscape changes of desertification in arid areas: the case of south-west Algeria. *Environmental monitoring and assessment*, 179, 403-420.
- Houérou, L. (1985). La régénération des steppes algériennes, rapport de mission de consultation et d'évaluation. *Ministère de l'agriculture, Alger*
- Hountondji, Y.-C., Ozer, P., & Nicolas, J. (2004). Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger. *Cybergeog: European Journal of Geography*
- Hu, Y., Li, W., Wright, D., Aydin, O., Wilson, D., Maher, O., & Raad, M. (2019). Artificial intelligence approaches. *arXiv preprint arXiv:1908.10345*

- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, 58-191
- IBM. (2023). Algorithme des k plus proches voisins, from https://www.ibm.com/fr-fr/topics/knn?mhsrc=ibmsearch_a&mhq=knn
- IDB. (2023). Show Indices for selected Sensor MODIS Retrieved 20/06/2023, 2023, from https://www.indexdatabase.de/db/is.php?sensor_id=14
- Jiang, Z., Ni, X., & Xing, M. (2023). A Study on Spatial and Temporal Dynamic Changes of Desertification in Northern China from 2000 to 2020. *Remote Sensing*, 15(5), 1368
- JMP. (2023). Corrélation, from https://www.jmp.com/fr_fr/statistics-knowledge-portal/what-is-correlation.html
- JO. (2010). *Journal officiel*. (61). Algeria: Retrieved from <https://www.joradp.dz/ftp/jo-francais/2010/f2010061.pdf>
- JO. (2023). *Journal officiel* Retrieved from <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2023/F2023027.pdf>
- Jouve, P., Corbier-Barthaux, C., & Cornet, A. (2002). Lutte contre la désertification dans les projets de développement: Un regard scientifique sur l'expérience de l'AFD en Afrique sub-saharienne et au Maghreb: AFD
- Ju-Long, D. (1982). Control problems of grey systems. *Systems & control letters*, 1(5), 288-294
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., . . . Strahler, A. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 36(4), 1228-1249
- Kacem, H. A., Fal, S., Karim, M., Alaoui, H. M., Rhinane, H., & Maanan, M. (2021). Application of fuzzy analytical hierarchy process for assessment of desertification sensitive areas in North West of Morocco. *Geocarto International*, 36(5), 563-580. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1611949>
- Kadović, R., Bohajar, Y. A. M., Perović, V., Simić, S. B., Todosijević, M., Tošić, S., . . . Dovezenski, U. (2016). Land sensitivity analysis of degradation using MEDALUS model: Case study of Deliblato Sands, Serbia. *Archives of Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1515/aep-2016-0045>
- Kadri, C. B., & Nasrallah, Y. (2023). GIS-Based AHP Technique for Assessment of Desertification in Western Highlands of Algeria. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 7(2), 18. <https://doi.org/10.1007/s41651-023-00147-z>
- Kamel Boulos, M. N., Peng, G., & VoPham, T. (2019). An overview of GeoAI applications in health and healthcare. *International journal of health geographics*, 18, 1-9
- Kassas, M. (1988). Ecology and management of desertification. Earth 88: Changing geographic perspectives. *National Geographic Society, New York*, 198-211
- Kaufman, Y. J., & Gao, B.-C. (1992). Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), 871-884
- Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1993). *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*: Cambridge university press

- Kharin, N., & Petrov, M. (1977). *Glossary of Terms on Natural Conditions and Desert Development*. Paper presented at the Materials for the UN Conference on Desertification, Moscow.
- Kirkby, M., & Cox, N. (1995). A climatic index for soil erosion potential (CSEP) including seasonal and vegetation factors. *Catena*, 25(1-4), 333-352. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00016-L](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00016-L)
- Kolodner, J. L. (1993). *Understanding creativity: A case-based approach*. Paper presented at the European Workshop on case-based reasoning.
- Kosmas, C., Danalatos, N., & Gerontidis, S. (2000). The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions. *Catena*, 40(1), 3-17. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00061-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00061-2)
- Kosmas, C., Ferrara, A., Briasouli, H., & Imeson, A. (1999). Methodology for mapping environmentally sensitive areas (ESAs) to desertification. *The medalus project Mediterranean desertification and land use. Manual on key indicators of desertification and mapping Environmentally Sensitive Areas to desertification*, 31-47
- Kosmas, C., Kairis, O., Karavitis, C., Ritsema, C., Salvati, L., Acikalin, S., . . . Ziogas, A. (2014). Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: methodological approach. [Research Support, Non-U.S. Gov't]. *Environ Manage*, 54(5), 951-970. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0109-6>
- Lahloui, H., Rhinane, H., Hilali, A., Lahssini, S., & Moukrim, S. (2017). Desertification assessment using MEDALUS model in watershed Oued El Maleh, Morocco. *Geosciences*, 7(3), 50. <https://doi.org/10.3390/geosciences7030050>
- Larose, D. T., & Larose, C. D. (2014). *Discovering knowledge in data: an introduction to data mining* (Vol. 4): John Wiley & Sons
- Lateef, Z. (2020). A Comprehensive Guide To Random Forest In R, 2023, from <https://www.edureka.co/blog/random-forest-classifier/>
- Li, S. G., Harazono, Y., Oikawa, T., Zhao, H. L., He, Z. Y., & Chang, X. L. (2000). Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia. *Agricultural and forest meteorology*, 102(2-3), 125-137
- Liang, S., Fang, H., Chen, M., Shuey, C. J., Walthall, C., Daughtry, C., . . . Strahler, A. (2002). Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: Methods and preliminary results. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 149-162
- Liu, P., & Biljecki, F. (2022). A review of spatially-explicit GeoAI applications in Urban Geography. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102936
- Liu, Q., Liu, G., & Huang, C. (2018). Monitoring desertification processes in Mongolian Plateau using MODIS tasseled cap transformation and TGSI time series. *Journal of Arid Land*, 10(1), 12-26. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0109-0>
- Liu, Y., & Xue, Y. (2020). Expansion of the Sahara Desert and shrinking of frozen land of the Arctic. *Scientific reports*, 10(1), 4109. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61085-0>
- Louassa, S. (2010). *Etude De La Contribution Du Vent A La Progression De L'ensablement Dans Les Hauts Plateaux Algeriens*. Magister, Universite Saad Dahleb De Blida.

- Lumivero. (2023). Analyse Hiérarchique Des Procédés (AHP), from <https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/analyse-hi%C3%A9rarchique-des-proc%C3%A9d%C3%A9s>
- Lyu, X., Li, X., Dang, D., Dou, H., Wang, K., & Lou, A. (2022). Unmanned aerial vehicle (uav) remote sensing in grassland ecosystem monitoring: A systematic review. *Remote Sensing*, 14(5), 1096
- Ma, L., Li, M., Ma, X., Cheng, L., Du, P., & Liu, Y. (2017). A review of supervised object-based land-cover image classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 277-293
- Mabbutt, J. A., & Floret, C. (1983). Études de cas sur la désertification. (No Title)
- MADR. (2023). Développement et préservation des parcours steppiques et modernisation de la filière des élevages ovin et caprin, from <http://fr.madr.gov.dz/agriculture/developpement-agricole-dans-les-zones-seches-et-semi-seches/steppes-et-parcours/>
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International journal of geographical information science*, 20(7), 703-726
- MAPM. (2023). Algérie - Agriculture : la superficie irriguée passe à 1,4 million d'hectares, from <https://www.businessfrance.fr/algerie-agriculture-la-superficie-irriguee-passe-a-1-4-million-d-hectares#:~:text=En%20Alg%C3%A9rie%2C%20la%20superficie%20des,sur%20les%2010%20derni%C3%A8res%20ann%C3%A9es>
- Marinică, I., & Marinică, A. F. (2014). *Considerations on Desertification Phenomenon in Oltenia*. Paper presented at the Forum geografic.
- MATET. (2007). Ligne directrice du Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT 2030). Document ministériel
- Menenti, M., Bastiaanssen, W., & Van Eick, D. (1989). Determination of surface hemispherical reflectance with Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, 28, 327-337
- Merzouk, N. K. (1999). Carte des Vents de l'Algérie-Résultats Préliminaires. *Revue Energ. Ren.: Valorisation*, 209-214
- Mikhailov, L., & Singh, M. G. (2003). Fuzzy analytic network process and its application to the development of decision support systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 33(1), 33-41
- Mishra, A. K., Placzek, C., & Jones, R. (2019). Coupled influence of precipitation and vegetation on millennial-scale erosion rates derived from 10Be. *PloS one*, 14(1), e0211325. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211325>
- Momirović, N., Kadović, R., Perović, V., Marjanović, M., & Baumgertel, A. (2019). Spatial assessment of the areas sensitive to degradation in the rural area of the municipality Čukarica. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(1), 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.12.004>
- Morsli, A., Hasnaoui, O., & Arfi, F. (2016). Evaluation of the Above-Ground Biomass of Steppe Ecosystems According to Their Stage of Degradation: Case of the Area of Ain Skhouna (Western Algeria). *Open Journal of Ecology*, 6(05), 235. <https://doi.org/10.4236/oje.2016.65024>

- Murano, H., Takata, Y., & Isoi, T. (2015). Origin of the soil texture classification system used in Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(4), 688-697. <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.998594>
- Murmu, P., Kumar, M., Lal, D., Sonker, I., & Singh, S. K. (2019). Delineation of groundwater potential zones using geospatial techniques and analytical hierarchy process in Dumka district, Jharkhand, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100239. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100239>
- Narkhed, S. (2018). Understanding AUC - ROC Curve
- Nedjraoui, D. (2003). Les mécanismes de suivi de la désertification en Algérie proposition d'un dispositif national de surveillance écologique à long terme. *Doc. OSS*
- Nedjraoui, D. (2011). Vulnérabilité des écosystèmes steppiques en Algérie. *Université de KasdiMerbah–Ouargla–Alger, du*, 21, 41-53
- Nedjraoui, D., & Bédrani, S. (2008). La désertification dans les steppes algériennes: causes, impacts et actions de lutte. *VertigO*, 8(1), 15
- Negaresh, H., Rakhshani, Z., Firoozi, F., & Alinia, H. (2016). Desertification assessment using the analytic hierarchy process and GIS in southeast Iran. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 98(1), 1-14. <https://doi.org/10.1111/geoa.12120>
- Niang, D. (2006). Fonctionnement hydrique de différents types de placages sableux dans le sahel Burkinabè: EPFL
- ONM. (2021). Office national météorologique, 2021, from <https://www.meteo.dz/>
- ONS. (2021). Office national des statistiques Retrieved 25/11/2022, 2022, from <https://www.ons.dz/spip.php?rubrique220>
- ONU-expert. (2015). United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management. Future Trends in Geospatial Information Management: the Five to Ten Year Vision. 2nd Edition, from https://ggim.un.org/documents/UN-GGIM-Future-trends_Second%20edition.pdf
- Opricovic, S. (1998). Multicriteria optimization of civil engineering systems. *Faculty of civil engineering, Belgrade*, 2(1), 5-21
- Oussedik, A., Iftene, T., & Zegrar, A. (2003). Réalisation par télédétection de la carte d'Algérie de sensibilité à la désertification. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 14(2), 121-127
- Ozer, P. (2012). Impact of global climate change and desertification on the environment and society in Southern centre of Vietnam (a case study in Binh Thuan province). *Climate today and tomorrow: state of play and perception*.
- Paden, M. E. (1988). *World Resources 1988-89: An Assessment of the Resource Base that Supports the Global Economy*: Basic Books, Incorporated.
- Pi, W., Du, J., Liu, H., & Zhu, X. (2020). Desertification grassland classification and three-dimensional convolution neural network model for identifying desert grassland landforms with unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing images. *Journal of Applied Spectroscopy*, 87, 309-318
- Pinker, R. (1985). Determination of surface albedo from satellites. *Advances in Space Research*, 5(6), 333-343

- Platts, P., Omeny, P., & Marchant, R. (2015). AFRICLIM 3.0: high-resolution ensemble climate projections for Africa. *Afr J Ecol*.
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1284624>
- Rakotomalala, R. (2017). Analyse de corrélation : Étude des dépendances - Variables quantitatives Vol. 1
- Ravesh, M. S., Ahmadi, H., Zehtabian, G., & Tahmores, M. (2010). Application of Analytical Hierarchy Process (AHP) in assessment of de-desertification alternatives case study: Khezrabad region, Yazd province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 17(1), 35-50
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57
- Rozanov, B. Z., IS. (1982). The definition, diagnosis and assessment of desertification in relation to experience in the USSR. *Desertification Control (UNEP)*
- Rubio, J. L., & Recatalá, L. (2006). The relevance and consequences of Mediterranean desertification including security aspects *Desertification in the Mediterranean region. A security issue* (pp. 133-165): Springer
- Saadi, H., Kalantari, K., & Irvani, H. (2008). Determination of preferable extension system for preventing desertification: An application of Analytical and Hierarchical Process (AHP). <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1345-7>
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation*. McGraw-Hill, New York
- Saaty, T. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1996). Decision making with dependence and feedback. *The analytic network process*
- SAC, I. (2016). Desertification and land degradation atlas of India (Based on IRS AWiFS data of 2011-13 and 2003-05). *Ahmedabad: Space Applications Centre, ISRO, Ahmedabad, India, 219*
- Salamani, M., Hanifi, H. K., Hirche, A., & Nedjraoui, D. (2013). Évaluation de la sensibilité à la désertification en Algérie. *Revue d'Ecologie, Terre et Vie*, 68(1), 71-84
- Salomonson, V. V., Barnes, W., Maymon, P. W., Montgomery, H. E., & Ostrow, H. (1989). MODIS: Advanced facility instrument for studies of the Earth as a system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(2), 145-153
- Salvati, L., & Zitti, M. (2009). Substitutability and weighting of ecological and economic indicators: Exploring the importance of various components of a synthetic index. *Ecological Economics*, 68(4), 1093-1099.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.07.017>
- Sandeep, P., Reddy, G., Jegankumar, R., & Arun Kumar, K. (2021). Modeling and assessment of land degradation vulnerability in semi-arid ecosystem of Southern India using temporal satellite data, AHP and GIS. *Environmental Modeling & Assessment*, 26(2), 143-154. <https://doi.org/10.1007/s10666-020-09739-1>
- scikit-learn-developers. (2023). User Guide, from <https://scikit-learn.org/>
- sebastianraschka. (2018). STAT 479: Machine Learning, from https://sebastianraschka.com/pdf/lecture-notes/stat479fs18/02_knn_notes.pdf

- Simões, D., Cavalcante, F. S., Lima, R. C. A., Rocha, Q. S., Pereira, G., & Miyajima, R. H. (2022). Optimal Forest Road Density as Decision-Making Factor in Wood Extraction. *Forests*, 13(10), 1703. <https://doi.org/10.3390/f13101703>
- Smallholder. (2023). Soil Texture, from <https://smallholder-sha.org/bienvenue/soil-texture/>
- Sobrino, J., El Kharraz, J., & Li, Z.-L. (2003). Surface temperature and water vapour retrieval from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(24), 5161-5182
- Sobrino, J. A., & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International journal of remote sensing*, 21(2), 353-366
- Strahle, W. M., Spiro, R. L., & Acito, F. (1996). Marketing and sales: strategic alignment and functional implementation. *Journal of Personal Selling & Sales Management*, 16(1), 1-20
- Sui, D. Z., & Zeng, H. (2001). Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: a case study in Shenzhen. *Landscape and urban planning*, 53(1-4), 37-52
- Suresh, A. (2020). What is the AUC — ROC Curve, from <https://medium.com/computer-architecture-club/what-is-the-auc-roc-curve-47fbdcfb7a4a>
- Survey, U. S. D. o. S. (1993). *Soil survey manual*: US Department of Agriculture.
- Tahar, L., & Fares, M. K. (2015). La pratique de l'analyse multicritères dans la prise de décision administrative: l'intégration la méthode d'aide à la décision AHP pour une meilleure sélection d'un soumissionnaire dans un achat public.
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. *Encyclopedia*, 3(1), 77-87
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152-170
- Teehankee, B. (2009). *The Analytic Hierarchy Process: Capturing Quantitative and Qualitative Criteria for Balanced Decision-Making*. Paper presented at the National Conference of the OR Society of the Philliphines (ORSP). Philliphines. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/256009323_The_Analytic_Hierarchy_Process_Capturing_Quantitative_and_Qualitative_Criteria_for_Balanced_Decision-Making.
- Theia. (2023). VARIABLES DE RAYONNEMENT, from <https://www.theia-land.fr/product/variables-de-rayonnement/>
- Thomas, D. S. G. (1995). Desertification: Causes and processes, In: *Encyclopaedia of Environmental Biology*, Vol. 1
- Trabucco, A., & Zomer, R. J. (2018). Global aridity index and potential evapotranspiration (ET0) climate database v2. *CGIAR Consort Spat Inf*, 10, m9
- Trendowicz, A., & Kopczyńska, S. (2014). Adapting multi-criteria decision analysis for assessing the quality of software products. Current approaches and future perspectives. *Advances in COMPUTERS*, 93, 153-226
- Türkeş, M., Öztaş, T., Tercan, E., Erpul, G., Karagöz, A., Dengiz, O., . . . Avcıoğlu, B. (2020). Desertification vulnerability and risk assessment for Turkey via an

- analytical hierarchy process model. *Land Degradation & Development*, 31(2), 205-214. <https://doi.org/10.1002/ldr.3441>
- UNCCD. (2015). *United Nations Convention to combat desertification – climate change and land degradation: bridging knowledge and stakeholders*. Paper presented at the 3rd Scientific Conference on Outcomes From the UNCCD, Cancún, Mexico. https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewjGxoe4qJb4AhXyhP0HHQKsBlSsQFnoECAQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.unccd.int%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fdocuments%2F2015_Climat_LD_Outcomes_CST_Conf_ENG_0.pdf&usg=AOvVaw0P4JQPihzUod4LFpkzU36M
- UNCOD. (1977). *United Nations Conference on Desertification*: Pergamon Press Oxford, UK.
- UNE, U. o. N. E. (2018). *Directives sur les méthodes d'estimation de la production et de la productivité de l'élevage*. Australia: Retrieved from <https://www.fao.org/3/ca6400fr/ca6400fr.pdf>
- UNEP. (1997). World atlas of desertification *World atlas of desertification*.
- UN, N. (1992). *Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement*. Paper presented at the Assemblée Générale A/CONF
- USGS. (2021), from <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- USGS. (2023). Landsat Normalized Difference Vegetation Index 2023, from <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>
- UVED. (2023). SUIVI DE L'ENVIRONNEMENT PAR TÉLÉDÉTECTION Retrieved 20/06/2023, 2023, from <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/vegetation/role-teledection/basse-resolution.html>
- Van Laarhoven, P. J., & Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy sets and Systems*, 11(1-3), 229-241
- VoPham, T., Hart, J. E., Laden, F., & Chiang, Y.-Y. (2018). Emerging trends in geospatial artificial intelligence (geoAI): potential applications for environmental epidemiology. *Environmental Health*, 17(1), 1-6
- Wan, Z. (2014). New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 140, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027>
- Wang, X., Hua, T., & Ma, W. (2016). Responses of aeolian desertification to a range of climate scenarios in China. *Solid Earth*, 7(3), 959-964. <https://doi.org/10.5194/se-7-959-2016>
- Wei, H., Wang, J., Cheng, K., Li, G., Ochir, A., Davaasuren, D., & Chonokhuu, S. (2018). Desertification information extraction based on feature space combinations on the Mongolian plateau. *Remote Sensing*, 10(10), 1614
- WGIC. (2021). Policy Report :Geospatial AI/ML Applications and Policies: A Global Perspective, from <https://wgicouncil.org/wp-content/uploads/2021/04/WGIC-Report-2021-01-Geospatial-AI-ML-April-2021.pdf>
- WK-NZT.Agency, W. K. N. T. (2023). Multi-criteria analysis, from <https://www.nzta.govt.nz/resources/multi-criteria-analysis/>

- Wu, X., Wen, J., Xiao, Q., You, D., Dou, B., Lin, X., & Hueni, A. (2018). Accuracy Assessment on MODIS (V006), GLASS and MuSyQ Land-Surface Albedo Products: A Case Study in the Heihe River Basin, China. *Remote Sensing*, *10*(12), 2045
- Xiao, J., Shen, Y., Tateishi, R., & Bayaer, W. (2006). Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, *27*(12), 2411-2422
- Yamani, K. (2005). *Contribution au développement d'une méthodologie pour l'étude du bilan hydrologique à l'échelle d'un bassin versant(Cas de la région de Brézina)(wilaya d'El Bayadh)*. Magister
- Yong-Zhong, S., Yu-Lin, L., Jian-Yuan, C., & Wen-Zhi, Z. (2005). Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, northern China. *Catena*, *59*(3), 267-278
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, *8*(3), 338-353
- Zdruli, P. (2011). *Desertification in the Mediterranean region*: na.
- Zhao, H.-L., Yi, X.-Y., Zhou, R.-L., Zhao, X.-Y., Zhang, T.-H., & Drake, S. (2006). Wind erosion and sand accumulation effects on soil properties in Horqin Sandy Farmland, Inner Mongolia. *Catena*, *65*(1), 71-79
- Zolekar, R. B., & Bhagat, V. S. (2015). Multi-criteria land suitability analysis for agriculture in hilly zone: Remote sensing and GIS approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, *118*, 300-321.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.016>