

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Agronomiques

Thèse

de Doctorat en Sciences
Filière : Sciences Agronomiques
Spécialité : Sciences des Sols et Foresterie

Présentée par :
FEKIR Youcef

Sous le thème :

**Etude et Evaluation de la Dégradation des Ressources
Naturelles en Algérie Occidentale par SIG et Télédétection**

Soutenue le 19 Janvier 2021 devant le jury composé de :

Président	:	HADDAD Ahmed	Professeur	Université de Mostaganem
Promoteur	:	MEDERBAL Khalladi	Professeur	Université de Tiaret
Co-promoteur	:	LARID Mohamed	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur	:	BELKHODJA Moulay	Professeur	Université d'Oran 1
Examineur	:	BENKHLIFA Mohamed	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur	:	REGAGBA Zineb	Professeur	Université de Tiaret

Année universitaire 2020/2021

Dédicaces

A :

Mes très chers parents au cœur plein de respect et de générosité pour leurs sacrifices et leurs soutiens, que Dieu les protèges ;

Mes frères et sœurs ;

Tous mes neveux

Tous mes ami(e)s ;

Je dédie ce travail ;

Remerciements

J'exprime mes remerciements les plus sincères à mes directeurs de thèse, messieurs les professeurs MEDERBAL Khalladi et LARID Mohamed, pour leurs suivi, soutien et conseils judicieux tout au long de cette thèse.

J'exprime également ma gratitude à Mr HADDAD Ahmed, Professeur à l'université de Mostaganem, pour avoir accepté la présidence de mon jury.

Mes plus vifs remerciements vont à Mr BELKHODJA Moulay, Professeur à l'université d'Oran 1, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

J'adresse éventuellement ma gratitude et remerciements à Mr BENKHLIFA Mohamed, Professeur à l'université de Mostaganem, de bien avoir accepté de rapporter cette thèse.

Je remercie également Mme REGAGBA Zineb, Professeur à l'université de Tiaret, d'avoir accepté de lire de juger ce travail.

J'adresse mes remerciements aussi à mes chers collègues Mr ANTEUR Djamel et Mr HAMADOUCHE Mohammed Amine pour leur soutien moral que physique durant notre parcours.

Ma profonde gratitude et mon amitié vont à tous mes collègues à l'université de Mascara en particulier : Djamel, Samir, Rachid, les Mohameds (Rebah et Salem) et tous les enseignants de département d'Informatique ainsi que mes amis d'enfances.

Je remercie enfin tous ceux qui m'ont permis d'en arriver là, mes parents pour leur patience et leur soutien indéfectible, ma famille, mes amis pour leurs plus qu'occasionnels coups de main techniques ou moraux.

Merci et merci pour tous...

Résumé

L'Algérie, comme plusieurs pays du bassin méditerranéen, connaît depuis la période coloniale une dégradation intensive des ressources naturelles (Eau, Sol, forêts...) par des facteurs naturels (Désertification, Érosion, Incendies...) et anthropiques liés aux activités humaines (Expansion démographique, Extension urbaine, Surpâturage...). Une majorité de ces phénomènes de dégradation peuvent être évalués et caractérisés quantitativement et qualitativement, quant à l'échelle spatiale que temporelle. Dans cette optique, le travail proposé consiste à l'étude et la caractérisation (quantitative et qualitative) de la dégradation de ressources naturelles par l'utilisation de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) dans la région occidentale de l'Algérie. L'objectif principal est de montrer l'apport des SIG et de la télédétection à l'évaluation spatio-temporelle des phénomènes engendrant une dégradation des ressources naturelles notamment l'érosion des sols, les incendies de forêts et la dynamique des zones humides. L'approche consiste à exploiter toutes les données spatiales (Cartes, Plans, Images satellitaires...) et socio-économiques (Statistiques, Enquêtes, Inventaires...) dans un SIG en vue d'élaborer des cartes synthétiques utilisées comme des outils d'aide à la décision pour la gestion et la lutte contre ces phénomènes.

Mots clés : Ressources naturelles, Dégradation, SIG, Télédétection, Ouest Algérie

Abstract:

Algeria, like several countries in the Mediterranean basin, was subject since the colonial period to an intensive degradation of natural resources (Water, Soil, forests ...) by natural (Desertification, Erosion, Fires ...) and anthropogenic factors due to human activities (Demographic expansion, Urban extension, Overgrazing...) where the majority of these degradation phenomena can be assessed and characterized quantitatively and qualitatively and both in spatial and temporal scales. In this perspective, the proposed work consists in the study and the quantitative and qualitative characterization of the degradation of natural resources using Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) in the western region of Algeria. The main objective is to show the contribution of GIS and RS to the spatial and temporal assessment of phenomena causing degradation of natural resources especially soil erosion, forest fires and wetlands dynamic. The approach consists in exploiting all spatial (Maps, Plans, Satellite images...) and socio-economic (Statistics, Surveys, Inventories...) data in a GIS in order to develop synthetic maps used as useful tools to help decision makers for the management and the fight against these phenomena.

Key words: Natural resources, Degradation, GIS, Remote sensing, West Algeria

ملخص:

تتعرض الجزائر، مثل العديد من بلدان حوض البحر الأبيض المتوسط ، منذ الفترة الاستعمارية لتدهور شديد للموارد الطبيعية (الماء والتربة والغابات ...) بسبب عوامل طبيعة (التصحّر، التعرية، الحرائق ...) وعوامل بشرية مرتبطة بالأنشطة البشرية (النمو الديمغرافي، التوسع العمراني، الرعي المكثف...). أغلبية هذه الظواهر يمكن تقييمها ووصفها كمياً ونوعياً، على الصعيد المكاني والزمني. في هذا الصدد، يتمحور العمل المقترح في دراسة وتوصيف كمي ونوعي لتدهور الموارد الطبيعية باستخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في المنطقة الغربية من الجزائر. الهدف الرئيسي هو إظهار مدى فعالية نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في التقييم الزمني والمكاني للظواهر التي تسبب تدهور الموارد الطبيعية وخاصة انجراف التربة وحرائق الغابات وديناميكية المواقع الرطبة. تتمثل منهجية البحث المتبعة في استغلال جميع البيانات المكانية (الخرائط، مخططات، صور الأقمار الصناعية ...) والبيانات الاجتماعية والاقتصادية (الإحصائيات، الاستطلاعات، الجرد ...) في نظم المعلومات الجغرافية من أجل تطوير خرائط تحليلية تستخدم كأدوات مفيدة لمساعدة صانعي القرار في إدارة ومحاربة هذه الظواهر.

كلمات مفتاحية: الموارد الطبيعية، التدهور، نظم المعلومات الجغرافية، الاستشعار عن بعد، غرب الجزائر

Table des matières

Liste de Figures

Liste de Tableaux

INTRODUCTION GENERALE..... 2

PARTIE I: CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE, ETAT DES RESSOURCES NATURELLES ET RISQUES MAJEURS DE DEGRADATION A L'OUEST ALGERIEN

CHAPITRE 1 : CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES ET SOCIOECONOMIQUES DE L'ALGERIE OCCIDENTALE..... 7

1.	INTRODUCTION.....	8
2.	CARACTERES GEOGRAPHIQUES ET PHYSIQUES DE LA ZONE D'ETUDE	8
2.1.	<i>Situation géographique</i>	8
2.2.	<i>Cadre administrative</i>	9
2.3.	<i>Cadre climatique</i>	11
2.3.1.	Précipitations	12
2.3.2.	Température	16
2.4.	<i>Morphologie et relief</i>	18
2.5.	<i>Géologie et Sol</i>	20
3.	CARACTERE SOCIO-ECONOMIQUE	23
3.1.	<i>Population et démographie</i>	23
3.2.	<i>Infrastructures de base</i>	26
4.	CONCLUSION.....	27

CHAPITRE 2 : ETAT DES LIEUX DES RESSOURCES NATURELLES EN ALGERIE OCCIDENTALE.. 28

1.	INTRODUCTION.....	29
2.	RESSOURCES FORESTIERES	29
3.	RESSOURCES EN EAUX.....	33
3.1.	<i>Ressources en eaux superficielles</i>	35
3.1.1.	Les barrages	35
3.1.2.	Les zones humides.....	38
3.1.3.	Réseau hydrographique	39
3.2.	<i>Les eaux souterraines</i>	40
3.3.	<i>Les ressources en eaux non-conventionnelles</i>	41
3.3.1.	Dessalement de l'eau de mer.....	42
3.3.2.	Epuration des eaux usées.....	43
4.	RESSOURCES EN SOLS.....	46
4.1.	<i>Les plaines et terres agricoles</i>	46
4.2.	<i>Les périmètres irrigués</i>	47
4.2.1.	Les grands périmètres d'irrigation (GPI).....	48
4.2.2.	Petite et Moyenne Hydraulique (PMH).....	49
4.3.	<i>Les parcours</i>	51
5.	CONCLUSION.....	54

CHAPITRE 3 : FACTEURS MAJEURS DE DEGRADATION DES RESSOURCES NATURELLES EN ALGERIE OCCIDENTALE..... 55

1.	INTRODUCTION.....	56
2.	FACTEURS DE DEGRADATION	56
2.1	<i>Facteurs naturels</i>	56
2.1.1.	Erosion hydrique	56

2.1.2.	Salinité.....	60
2.1.3.	Les incendies de forêts.....	61
2.1.4.	La sécheresse	63
2.2.	<i>Facteurs anthropiques</i>	66
2.2.1.	Urbanisation.....	66
2.2.2.	Surpâturage.....	67
3.	CONCLUSION.....	71

PARTIE II : APPORT DES SIG ET DE LA TELEDETECTION A L'ETUDE ET L'EVALUATION DE LA DEGRADATION DES RESSOURCES NATURELLES

CHAPITRE 4 : NOTIONS DE BASE EN GEOMATIQUE 72

1.	INTRODUCTION.....	73
2.	GEOMATIQUE.....	73
2.1.	<i>Définition de la géomatique</i>	73
2.2.	<i>Techniques de la géomatique</i>	74
2.3.	<i>Champs d'applications de la géomatique</i>	75
3.	SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES (SIG)	76
3.1.	<i>Définition</i>	76
3.2.	<i>Les composants d'un SIG</i>	76
3.2.1.	Le matériel	76
3.2.2.	Les logiciels.....	77
3.2.3.	Les données.....	77
3.2.4.	Les utilisateurs.....	77
3.2.5.	Processus et méthodes.....	78
3.3.	<i>Les principales fonctionnalités d'un SIG</i>	78
3.3.1.	Abstraction	78
3.3.2.	Acquisition.....	78
3.3.3.	Archivage.....	78
3.3.4.	Analyse	79
3.3.5.	Affichage	79
3.4.	<i>Source de données géographiques</i>	79
3.5.	<i>Information géographique</i>	80
3.5.1.	Les données géométriques	81
3.5.2.	Les données attributaires.....	82
3.6.	<i>Typologie des SIG</i>	83
3.6.1.	Les visionneuses (Viewers).....	83
3.6.2.	SIG Web.....	83
3.6.3.	SIG Mobile:.....	83
3.6.4.	SIG Métier:	83
3.6.5.	SIG de Bureau:.....	83
4.	TELEDETECTION	83
4.1.	<i>Définition</i>	83
4.2.	<i>Principe de la télédétection</i>	84
4.3.	<i>Télédétection passive et active</i>	86
4.4.	<i>Interaction rayonnement électromagnétique-objet</i>	86
4.5.	<i>Caractéristiques des images de télédétection</i>	89
4.5.1.	Résolution spectrale.....	89
4.5.2.	Résolution spatiale	89
4.5.3.	Résolution temporelle.....	89
4.6.	<i>Produits de de télédétection</i>	89
4.6.1.	Images en niveaux de gris	90
4.6.2.	Images couleurs	91
4.6.3.	Les indices spectraux.....	92
4.6.4.	Mosaïque d'images	94

4.7.	<i>Quelques fournisseurs des images satellitaires</i>	95
4.7.1.	Earth Explorer.....	95
4.7.2.	GloVis.....	96
4.7.3.	Google Earth Engine (GEE).....	96
4.7.4.	Google Earth.....	96
5.	CONCLUSION.....	97

CHAPITRE 5 : EVALUATION DE LA DEGRADATION DES SOLS ET DU RISQUE D'EROSION HYDRIQUE PAR SIG, TELEDETECTION ET LE MODELE RUSLE, CAS DU BASSIN DE BOUHANIFIA 98

1.	INTRODUCTION.....	99
2.	MATERIELS ET METHODES.....	101
2.1.	<i>Localisation de la zone d'étude</i>	101
2.2.	<i>Caractéristiques du bassin</i>	102
2.3.	<i>Source de données</i>	103
2.4.	<i>Description du modèle RUSLE</i>	104
2.4.1.	L'Erosivité de Pluie (facteur R).....	105
2.4.2.	L'Erodibilité des sols (K).....	107
2.4.3.	Le facteur topographique LS.....	109
2.4.4.	Le facteur d'occupation du sol.....	110
2.4.5.	Le facteur de pratiques anti-érosive (P).....	112
2.5.	<i>Estimation des pertes des sols</i>	112
3.	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	113
3.1.	<i>Carte de l'érosivité de pluie R</i>	114
3.2.	<i>Carte de l'érodibilité des sols K</i>	116
3.3.	<i>Carte du facteur LS</i>	118
3.4.	<i>Carte du facteur d'occupation du sol C</i>	120
3.5.	<i>Carte du facteur P</i>	122
3.6.	<i>Spatialisation des pertes en sols</i>	122
4.	INFLUENCE DES FACTEURS RUSLE SUR LA PERTE DE SOL.....	125
4.1.	<i>Influence du facteur topographique</i>	126
4.2.	<i>Influence de la couverture végétale</i>	127
4.3.	<i>Contribution à la perte de sol des sous-bassins versants et priorité d'intervention</i>	128
4.4.	<i>Impact des pratiques antiérosives sur l'érosion des sols</i>	130
5.	CONCLUSION.....	132

CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DU RISQUE D'INCENDIE DE FORET ET DE LA DEGRADATION DES ESPECES FORESTIERES A L'AIDE DU SIG ET DE LA TELEDETECTION DANS LA FORET DE GHARROUS 135

1.	INTRODUCTION.....	136
2.	PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	137
3.	DONNEES UTILISEES.....	139
4.	MODELISATION DU RISQUE D'INCENDIE.....	140
4.1.	<i>Végétation et type de combustible</i>	141
4.2.	<i>Facteurs topographiques</i>	142
4.3.	<i>Facteur des activités humaines</i>	145
4.5.	<i>Classification et pondération des facteurs de risque d'incendie</i>	145
5.	RESULTATS ET DISCUSSION.....	146
5.1.	<i>Carte de combustibilité</i>	147
5.2.	<i>Carte de risque liée aux facteurs topographiques</i>	148
5.3.	<i>Cartes de proximité des routes et des agglomérations</i>	151
5.4.	<i>Carte du risque d'incendie de forêt</i>	153

5.5. Validation de la modélisation du RFF	155
6. CONCLUSION.....	157
CHAPITRE 7 : CARTOGRAPHIE ET SUIVI DE LA DYNAMIQUE DES ZONES HUMIDES PAR TELEDETECTION SPATIALE, CAS DE LA MERDJA DE SIDI ABED	158
1. INTRODUCTION.....	159
2. TELEDETECTION POUR LA CARTOGRAPHIE ET LA SURVEILLANCE DES ZONES HUMIDES	160
2.1. Les indices de végétation.....	161
2.2. Les indices du sol	162
2.3. Les indices de l'eau.....	162
3. PRESENTATION DU BARRAGE DE MERDJA SIDI ABED	163
3.1. Localisation géographique du retenu du barrage	163
3.2. Etat du barrage de Merdja Sidi Abed	164
4. DONNEES ET METHODES.....	167
4.1. Sélection des données dans GEE.....	168
4.2. Les données Landsat 7 Tier 1 Réflectance au sol.....	171
4.3. Les données Sentinel 2 L1C.....	171
4.4. Traitements de données.....	172
4.4.1. Choix des images dans GEE	172
4.4.2. Calcul des indices spectraux dans GEE	173
4.4.3. Extraction de la surface d'eau et évaluation de la précision	176
5. RESULTATS ET DISCUSSION	178
5.1. Analyse des compositions fausse couleur.....	178
5.2. Cartes de NDVI	180
5.3. Cartes du MNDWI.....	182
5.4. Cartes du BSI.....	184
5.5. Extraction et suivi spatiotemporel de la surface d'eau	186
5.6. Evaluation des résultats	189
6. CONCLUSION.....	190
CONCLUSION GENERALE	192
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	196
ANNEXES.....	208

Liste de figures

Figure 1-1: Localisation géographique de l'Algérie occidentale	9
Figure 1-2: Limites administratives des communes de la région ouest de l'Algérie	10
Figure 1-3: Répartition des superficies des wilayas de l'ouest algérien	11
Figure 1-4: Etages bioclimatiques de l'Algérie occidentale (Source: ANAT (2004))	12
Figure 1-5: Carte de pluviométrie moyenne annuelle de l'ouest algérien (1970-2000) (Source : WorldClim.org)	13
Figure 1-6: Pluviométrie moyenne saisonnière	14
Figure 1-7: Diagrammes Ombrothermiques des 10 stations de l'Algérie occidentale	15
Figure 1-8: Températures mensuelles maximales, minimales et moyennes des dix stations occidentale	17
Figure 1-9: Relief et Altitude de la région ouest de l'Algérie	18
Figure 1-10: La morphologie de la zone ouest : (a) Carte des pentes, (b) Carte d'exposition et (c) les classes d'altitudes	19
Figure 1-11: La carte géologique de l'ouest algérien (Source: SATEC 1/500000)	21
Figure 1-12: La carte des unités du sol de l'ouest de l'Algérie (Source: HSWD, 2012)	22
Figure 1-13: La carte de population 2008 des wilayas de l'ouest algérien	24
Figure 1-14: La carte de densité de population par communes : (a) RGPH 1987, (b) RGPH 1998 et (c) par wilaya RGPH 2008	25
Figure 1-15: Carte du réseau de transport de l'ouest algérien	27
Figure 2-1: Répartition des surfaces forestières par (a) type et par (b) région.	30
Figure 2-2: La carte de la couverture forestière de l'ouest algérien	31
Figure 2-3: Surface et taux de la couverture forestière par wilaya	32
Figure 2-4: Les espèces forestières de l'ouest algérien (DGF, 2018)	33
Figure 2-5: Les bassins versant englobant l'ouest algérien	34
Figure 2-6: Carte des ressources en eaux superficielles de la région occidentale	35
Figure 2-7: Système de transfert Mostaganem-Arzew-Oran	37
Figure 2-8: Localisation des stations de dessalement de la région ouest algérien	43
Figure 2-9: Zonage de l'ONA et les STEP des wilayas de l'ouest algérien	44
Figure 2-10: Les STEP et lagunes des sites pilotes pour l'irrigation avec les eaux usées épurées	45
Figure 2-11: Les périmètres irrigués de l'ouest algérien (Source: AGID modifié)	49
Figure 2-12: Les communes agro-pastorales des wilayas de l'ouest algérien	52
Figure 2-13: Répartition des terres pastorales dans les wilayas de l'ouest algérien	53
Figure 2-14 : Exemples de terrains de parcours steppiques	54
Figure 3-1 : Différentes formes de l'érosion dans quelques bassin de l'ouest	59
Figure 3-2 : Localisation des sols salins à l'ouest de l'Algérie (Source: INSID, 2008))	60
Figure 3-3 : Nombre des incendies par wilaya de 1956-2006 (Source: (Arfa, 2008) in (Chiali Charif, 2018))	62
Figure 3-4: Carte de déficit pluviométrique avant 1976 de l'ouest algérien (Source: ANRH, 2017)	64
Figure 3-5: Carte de l'indice de sécheresse de l'Algérie occidentale (Source: Gassert et al, 2014)	65
Figure 3-6: Evolution des habitats rurales construites à Mascara (a) 2010 (b) 2020 (Source: Google earth) et l'extension urbaine da la ville de SidiBel Abbes de (c) 1991 à (d) 2019 (images Landsat)	67
Figure 3-7: L'état des parcours sud de Saida en (a) 1984 et (b) 2019 (Source: Google Earth)	69
Figure 3-8 : L'état des parcours sud de Tlemcen en (a) 1984 et (b) 2019 (Source: Google Earth)	70
Figure 4-1 : Les composants d'un SIG	77
Figure 4-2: les principales fonctionnalités d'un SIG	79
Figure 4-3: Quelques sources d'acquisition des informations géographiques	80
Figure 4-4: exemples de données en format raster : Image satellitaire (gauche), Carte scannée (droite)	81
Figure 4-5: Un exemple d'une représentation en mode vecteur	82
Figure 4-6: Liaison entre l'entité graphique et les attributs associés	82

Figure 4-7: Principe de la télédétection spatiale (Source: e-cours.univ-paris1.fr)	85
Figure 4-8: Les deux formes de la télédétection active et passive (Source : Jaquet, 1989)	86
Figure 4-9: les domaines du spectre électromagnétique (Source : site GeoBretagne)	87
Figure 4-10: La réflexion, l'émission et la rétrodiffusion des objets terrestres (Source: site de l'ENSG)	88
Figure 4-11: La signature spectrale de quelques objets terrestres (Source : e-cours.univ-paris1.fr)	88
Figure 4-12: Exemples d'images en niveaux de gris : (haut) bandes Rouge et PIR de Sentinel 2, (bas) Image radar Sentinel 1	91
Figure 4-13: (a) image Sentinel 2 vrai-couleurs, (b) fausse-couleurs IR, (c) fausse-couleurs urbain et (d) fausse-couleurs sol/eau	92
Figure 4-14: (a) Indice de végétation NDVI, (b) indice du sol BI, (c) indice de l'eau NDWI et (d) l'indice urbain NDBI de la plaine de Ghriss	94
Figure 4-15: Exemple de mosaïque de trois images Landsat	95
Figure 4-16: Les interfaces de (a) Earth Explorer, (b) GloVis, (c) GEE et (d) Google Earth.	97
Figure 5-1 : Localisation géographique du bassin de Bouhanifia	101
Figure 5-2 : Classes d'altitudes de la zone d'étude	103
Figure 5-3: L'interface de l'outil HWSD Viewer	108
Figure 5-4: (a) Diagramme expérimental de Gitas et al. (b) Droite de regression entre NDVI et le facteur C	111
Figure 5-5: Les étapes de la méthodologie adoptée	113
Figure 5-6 : L'automatisation du modèle RUSLE par l'outil Model Builder d'ArcGis	114
Figure 5-7: (a) La pluviométrie et (b) le facteur d'érosivité de pluie correspondant	115
Figure 5-8: Carte des types de sols	117
Figure 5-9: Carte de l'érodibilité du sol K	118
Figure 5-10: Les classes de pente du bassin de Bouhanifia	119
Figure 5-11: Carte du facteur LS	120
Figure 5-12 : Carte du NDVI	121
Figure 5-13: Carte du facteur C	122
Figure 5-14: La carte des pertes en sols du bassin de Bouhanifia	123
Figure 5-15: Apport des classes de perte des sols	125
Figure 5-16: L'effet de la pente sur les pertes en sol	127
Figure 5-17: L'effet du facteur C sur les pertes en sol	128
Figure 5-18: Carte du niveau de priorité d'intervention des sous-bassins versants	130
Figure 5-19: La carte du facteur P estimé à partir des pentes	132
Figure 5-20: La carte de pertes des sols (a) sans pratiques (b) avec pratiques antiérosives	133
Figure 6-1 :Localisation géographique de la forêt de Gharrous	137
Figure 6-2: (a) Les classes d'altitudes et sa répartition spatiale et (b) la carte des pentes	138
Figure 6-3: Digramme ombrothermique et les variations des températures à la station de Aouf	139
Figure 6-4: La carte de l'indice de végétation SAVI	143
Figure 6-5 : La carte des (a) pentes et de (b) l'exposition	144
Figure 6-6: Les étapes d'automatisation du modèle utilisé par le Model Builder d'ArcGis	145
Figure 6-7: Carte de risque de feux lié à la végétation	147
Figure 6-8 : Carte de risque de feux lié à la pente	149
Figure 6-9 : Carte de risque de feux lié à l'exposition	150
Figure 6-10: Carte de risque de feux liée aux routes	151
Figure 6-11: Carte de risque de feux liée aux agglomérations	152
Figure 6-12: Gradient de risque de feux de forêts de Gharrouss	154
Figure 6-13: Les classes du risque de feux de la forêt de Gharrouss	155
Figure 6-14: Délimitation des feux de forêts de Gharrouss à partir des images Google Earth	156
Figure 7-1: La signature spectrale d'une végétation verte (Source :)	162
Figure 7-2: La signature spectrale de l'eau vis à vis les sols et la végétation	163

<i>Figure 7-3: Localisation géographique du barrage de Merdja Sidi Abed</i>	165
<i>Figure 7-4: Diagramme des étapes de la méthodologie adoptée</i>	168
<i>Figure 7-5: L'interface de la plateforme de GEE</i>	169
<i>Figure 7-6: L'histogramme bimodal des indices NDVI, MNDWI et BSI</i>	177
<i>Figure 7-7: Compositions fausse couleur : (a) 2014/03/10, (b) 2015/03/13, (c) 20/03/2016, (d) 2017/04/03, (e) 18/04/2018, (f) 2019/02/22 et (g) 2020/03/08</i>	179
<i>Figure 7-8: Variations statistiques du NDVI</i>	180
<i>Figure 7-9: La carte de l'indice de végétation NDVI de : (a) 2014/03/10, (b) 2015/03/13, (c) 20/03/2016, (d) 2017/04/03, (e) 18/04/2018, (f) 2019/02/22 et (g) 2020/03/08</i>	181
<i>Figure 7-10: Variation des valeurs du MNDWI</i>	182
<i>Figure 7-11: La carte de l'indice de l'eau MNDWI de : (a) 2014/03/10, (b) 2015/03/13, (c) 20/03/2016, (d) 2017/04/03, (e) 18/04/2018, (f) 2019/02/22 et (g) 2020/03/08</i>	183
<i>Figure 7-12: L'évolution des valeurs du BSI</i>	184
<i>Figure 7-13: Variation de l'indice BSI : (a) 2014/03/10, (b) 2015/03/13, (c) 20/03/2016, (d) 2017/04/03,</i>	185
<i>Figure 7-14: L'évolution de la superficie et les bordures du barrage de Mrdja Sidi Abed de 2014 à 2020</i>	186
<i>Figure 7-15: l'extraction des surfaces d'eau par seuillage des indices NDVI, MNDWI et BSI</i>	188

Liste de tableaux

Tableau 1-1: Superficie des wilayas de l'ouest algérien	10
Tableau 1-2: Précipitation moyenne mensuelle/annuelle de quelques stations de l'ouest algérien	14
Tableau 1-3: Températures mensuelles et annuelles des dix stations de la région ouest	16
Tableau 1-4: Répartition spatiale des classes d'altitudes par wilaya	20
Tableau 1-5: Population des wilayas de l'ouest algérien en 1987, 1998 et 2008 (Source: ONS).....	24
Tableau 1-6: Les infrastructures de base des wilayas de l'ouest (Source : ANDI , 2013)	26
Tableau 2-1: Surface et taux de la couverture forestière par wilaya.....	31
Tableau 2-2: Les caractéristiques des bassins versant et les principaux cours d'eaux de l'ouest algérien.....	34
Tableau 2-3: Liste des barrages de l'ouest algérien par wilaya (ANBT, 2010).....	36
Tableau 2-4: Taux d'envasement des barrages de l'ouest algérien (ANBT, 2005)	37
Tableau 2-5: Les zones humides à importance international Ramsar	38
Tableau 2-6: les caractéristiques de quelques nappes aquifères de l'ouest algérien	41
Tableau 2-7: Les principales stations de dessalement de l'eau de mer da la région ouest (ONS, 2015)	42
Tableau 2-8: Terres agricoles des wilayas de l'ouest campagne agricole 2015/16 (ONS, 2016)	47
Tableau 2-9: Les grands périmètres irrigués de l'ouest algérien	49
Tableau 2-10: Superficies irriguées en PMH par nature de la ressource en eau (2003)	50
Tableau 2-11: Les superficies irriguées en PMH par types de systèmes d'irrigation (2003).....	50
Tableau 2-12: Les communes de la zone steppique de l'ouest algérien	53
Tableau 3-1: Erosion spécifique dans certains bassin de l'ouest algérien (Source: Tadrast et al., 2016)	58
Tableau 3-2: Le taux d'envasement des barrages de l'ouest algérien (Source: Medjber, 2011)	58
Tableau 3-3: Superficie de sols affectés par la salinité à l'ouest (Source: ONHYD, 2003)	61
Tableau 3-4: Quelques auteurs qui on travaillé sur les incendies de forêts de l'ouest algérien	63
Tableau 4-1: Les différentes résolutions de quelques capteurs satellitaires (Source : Satellite Imaging Corporation).....	90
Tableau 5-1: Caractéristiques des sous-bassins du bassin de Bouhanifia	102
Tableau 5-2: Description des données utilisées.....	104
Tableau 5-3: Quelques travaux utilisant le modèle RUSLE	105
Tableau 5-4: les valeurs de paramètres m relatives aux classes de pentes (Wischmeier et Smith, 1978)	109
Tableau 5-5: La pluviométrie moyenne annuelle et l'érosivité de pluie des 24 stations pluviométriques	115
Tableau 5-6: Les classes du facteur R	116
Tableau 5-7: répartition de type de sols et le facteur K correspondant	117
Tableau 5-8: Répartition des classes du facteur C.....	121
Tableau 5-9 : Repartition de la superficie des classes de perte de sol.....	124
Tableau 5-10: Pertes de capacité du barrage de Bouhanifia (Source: Boualem et al., 2009)	125
Tableau 5-11: La répartition des pertes des classes de pentes.....	126
Tableau 5-12: Répartition des pertes des classes du facteur C.....	128
Tableau 5-13: Superficie, perte totale et perte moyenne de sol des 9 sous-bassins versants	129
Tableau 5-14 : Les valeurs du facteur P estimées à partir du gradient de la pente (source: Panagos et al., 2015) ..	131
Tableau 5-15: Dynamique des pertes en sol avant et après les pratiques antiérosives	131
Tableau 6-1: La répartition de surface des classes d'altitudes de la forêt de Gharroux	137
Tableau 6-2: L'historique des incendies de la forêt de Gharroux (source: Conservation des Forêts de Mascara)	139
Tableau 6-3: Caractéristiques et sources des données utilisées	140
Tableau 6-4: Classification et pondération des différents paramètres.....	146
Tableau 6-5: La répartition de surface du risque lié à la combustibilité	148
Tableau 6-6: La répartition de surface de risque de feux selon la pente	148
Tableau 6-7: Les surfaces des risques liés à l'exposition.....	150
Tableau 6-8: Répartition spatiale des risques liés à la distance aux routes	152

<i>Tableau 6-9: La superficie du risque de feux lié à la proximité aux agglomérations</i>	153
<i>Tableau 6-10: Les classes de risque et la superficie correspondante</i>	154
<i>Tableau 6-11: Superficie des niveaux de FFR dans les zones brûlées dans la forêt de Gharrous</i>	157
<i>Tableau 7-1: Quelques indices spectraux de végétation</i>	161
<i>Tableau 7-2: Liste de quelques indices spectraux du sol</i>	162
<i>Tableau 7-3: Les indices spectraux caractérisant l'eau</i>	163
<i>Tableau 7-4: Caractéristiques du barrage Merdja Sidi Abed et de son bassin versant</i>	164
<i>Tableau 7-5: Evolution de la perte de capacité de la retenue du barrage de Merdja Sidi Abed (Source : ANBT, 2004)</i>	166
<i>Tableau 7-6: Liste de quelques données satellitaires disponibles dans GEE (Source : Kumar et Mutanga, 2018)</i>	170
<i>Tableau 7-7: Les caractéristiques des images de Landsat 7 (Source : Catalogue de données GEE)</i>	171
<i>Tableau 7-8: Les propriétés des images Sentinel 2 MSI (Source : Catalogue de données GEE)</i>	172
<i>Tableau 7-9: Evolution de la surface d'eau estimée et de référence 2014-2020</i>	187
<i>Tableau 7-10 : Evaluation de la précision de l'extraction de la surface d'eau des trois indices NDVI, MNDWI et BSI</i>	190

Liste des abréviations

AGID :	Appui à la gestion Intégrée des Déchets
ANAT :	Agence Nationale d'Aménagement du Territoire
ANBT :	Agence Nationale des Barrages et Transfert
ANRH :	Agence Nationale des Ressources Hydriques
ANDI :	Agence nationale de Développement de l'Investissement
BSI :	Bare Soil Index
DGF :	Direction Générale des Forêts
EPIC:	Etablissement Public à Caractère Industriel
FAO :	Food and Agriculture Organization
HWSD :	Harmonized World Soil Database
INSID :	Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage
MAO :	Mostaganem-Arzew-Oran
MIR :	Moyen Infrarouge
MJ :	Méga Joule
MNDWI :	Modified Normalized Difference Water Index
MRE:	Ministère des Ressources en Eaux
MUSLE :	Modified Universal Soil Loss Equation
NDVI :	Normalized Difference Vegetation Index
ONA :	Office National d'Assainissement
ONID:	Office National de l'Irrigation et du Drainage
ONS :	Office National de Statistiques
PIR :	Proche Infrarouge
RGPH :	Recensement Général de la Population et de l'Habitation
RUSLE :	Revised Universal Soil Loss Equation
SAR :	Synthetic Aperture Radar
SIG :	Système d'Information Géographique
STEP:	Station d'Épuration
USLE :	Universal Soil Loss Equation

Introduction Générale

Depuis des décennies, les ressources naturelles à travers le monde ne cessent de dégrader suite à une multiplicité de facteurs de nature différente. En effet, les questions environnementales constituent les préoccupations majeures du monde d'aujourd'hui. Les activités humaines font peser sur l'environnement de nombreuses menaces qui se traduisent par la disparition des espèces, de leurs habitats et par la réduction et l'épuisement des ressources et la dégradation du patrimoine.

Ces menaces qui pèsent sur les paysages, les écosystèmes, les espèces, et le patrimoine en général, et qui sont identifiées, sont largement attribuées à la pression que l'homme exerce sur son environnement à travers ses activités (Hamadouche, 2015). Le développement socio-économique qu'a connu l'humanité doit être remis en cause si les responsables ne parviennent pas à assurer une gestion rationnelle des ressources qui constituent le support de vie et la source de bien-être de l'homme.

L'Algérie, l'instar de plusieurs pays du bassin Méditerranéen, dispose d'un patrimoine caractérisé par des ressources naturelles limitées, irrégulières et très inégalement réparties (Fecih et al., 2018). De sérieuses menaces affectent ce patrimoine soumis à des risques importants d'appauvrissement. Une tendance à la diminution de la biodiversité affecte tous les écosystèmes naturels de l'Algérie globalement où aucun écosystème ne se caractérise par une stabilisation de la biodiversité (MATET, 2009).

Près de 20 millions d'hectares sont menacés par l'érosion éolienne ce qui a fait de plusieurs régions de l'Algérie et surtout la steppe un milieu fragile. Cela est accentué par l'ensemble des conditions climatiques et édaphiques qui caractérisent ces régions (Bensaid, 2006). Ainsi, l'érosion hydrique avec une dégradation spécifique moyenne annuelle de 2000 à 4000 t/Km², a endommagé plus de 45% des terres fertiles (Demmak, 1982). En plus, environ 36000 ha sont détruits à cause des incendies chaque année (Arfa et al., 2009) où plus de 13414 ha ont été enregistrés seulement en 2017 par la Direction Générale des Forêts (DGF) (Benguerai et al., 2019).

Selon les chiffres de l'INSID (2008), 3.2 millions d'hectares subissent à des degrés de sévérité variables de la salinité des sols, dont une bonne partie se trouve localiser dans les régions steppiques où le processus de salinisation est plus marqué du fait des températures élevées durant presque toute l'année, du manque d'exutoire et de l'absence de drainage efficient.

L'Algérie occidentale quant à elle est sujette de cette dégradation et elle est considérée la région la plus affectée par rapport aux autres régions de l'Algérie septentrionale. Environ 47% des terres sont affectées par l'érosion à l'ouest de l'Algérie

devant 26% l'Est et 27% au centre (Hallouz et al., 2018) ce qui a classé la région occidentale comme la plus érodée. Ce taux d'érosion considéré comme très élevé a significativement affecté les ouvrages hydrauliques de cette région en particulier les barrages. Cette situation a mené à une réduction terrifiante de la capacité de stockage suite à un fort potentiel d'envasement. L'exemple le plus évident le cas du barrage de Fergoug qui est complètement envasé met en relief la gravité de la situation.

En outre, les plaines agricoles irriguées de cette partie de l'Algérie sont gravement touchées par le phénomène de la salinisation au cas où certains sols deviennent totalement stérilisés et ont atteint des niveaux de dégradation irréversible (FAO, 2005). En plus, on doit signaler l'expansion démographique qui a conduit à une forte pression sur la bande littorale et sub-littorale au détriment des terres agricoles suite à une artificialisation massive qui a transformé l'usage agricole du sol au profit d'une urbanisation en expansion rapide.

A cet état alarmant s'ajoute la pénurie en ressources en eaux où la disponibilité en eau par habitant a diminuée de 1500 m³ en 1962 à 430 m³ par an en 2020 qui est beaucoup moins inférieure au seuil de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par an (DGF, 2019). La sécheresse intense qui caractérise la région occidentale depuis plus de 3 décennies a jeté ses conséquences sur la région avec un déficit pluviométrique évalué à 20% selon Medjreb et Henia (2011). Par ailleurs, le patrimoine forestier lui aussi a subi une grave menace due à forte tension des incendies. Selon les statistiques de la Direction Générale des Forêts (DGF), plus de 13% de la couverture forestière occidentale a été ciblée par ce phénomène.

Ce dynamisme important fait qu'il faut intervenir en urgence, en priorisant les actions les plus néfastes et orienter les efforts vers des objectifs à moyen et long terme. Des solutions devraient être recherchées à tous les niveaux de décision pour répondre à ces préoccupations.

La réalisation de produits cartographiques devrait faire partie de toute opération d'aménagement. Ces outils permettent en effet de visualiser les informations utiles à l'aménagiste comme l'inventaire, la caractérisation du milieu et sa dynamique, son état de dégradation ainsi que ses conditions écologiques. Une fois cartographiés, ces éléments peuvent mettre en évidence certaines relations et permettent ainsi de mieux comprendre la situation.

Les moyens de la cartographie classique, en grande partie manuelle, ne répondent plus aux exigences actuelles qui sont, entre autres, la nécessité d'une actualisation

permanente de phénomènes en rapide évolution et l'étendue importante des zones d'étude. Le recours à des alternatives plus rapides, plus efficaces et plus précises restera le moyen performant pour palier devant ces phénomènes.

Les techniques de la géomatique ont marqué des progrès significatifs au cours des deux dernières décennies et leur développement ne cesse de s'accroître où des nouveaux outils développés concernent plus particulièrement l'acquisition, le traitement et la restitution des données géographiques. L'apparition de nouvelles techniques de gestion de données par le numérique, les traitements d'une masse de données importante ne se posent jamais.

Parmi les outils de la géomatique, les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) et la Télédétection ont prouvé ces dernières années leurs efficacités en termes de traitement, analyse et gestion des données à caractère spatial. En plus, l'apparition de nouvelles sources de données géospatiales en continuité a considérablement amélioré la gestion spatiotemporelle des ressources naturelles.

Dans cette optique, cette thèse vise à étudier l'opportunité d'utiliser les outils de la géomatique pour l'étude et l'évaluation de la dégradation des différentes ressources naturelles telles que les écosystèmes forestiers, les ressources en eaux et des sols pour une éventuelle mise en œuvre de protocoles de prévention et de lutte contre les phénomènes causant la dégradation de ces ressources.

Notre choix s'est porté sur la zone occidentale de l'Algérie vu l'état critique de ses ressources qui continuent de subir une grave menace par des facteurs tant naturels qu'anthropiques.

Trois cas d'études sont choisis pour une éventuelle évaluation de son niveau de dégradation entre autres :

- Le bassin versant qui draine le barrage de Bouhanifia par l'application du modèle RUSLE intégré aux outils des SIG et la télédétection en vue d'estimer le taux de perte en sol annuel et le degré de vulnérabilité à l'érosion hydrique.
- La forêt de Gharrous située dans le sous-bassin versant d'Oued Taria pour caractériser son niveau de risque lié aux incendies.
- Le barrage de Merdja Sidi Abed à l'extrême Est de la wilaya de Relizane pour un suivi spatio-temporel de sa retenue en utilisant l'imagerie spatiale haute résolution.

L'objectif principal est de réaliser une cartographie numérique caractérisant en premier lieu, le niveau de vulnérabilité via des cartes synthétiques des risques liés à l'érosion et aux incendies de forêts, et en second lieu mettre l'accent sur l'état des plans d'eaux superficielles devant un envasement accéléré et assèchement accentué.

Le présent manuscrit sera structuré en deux grandes parties :

Partie I :

Une synthèse des caractères physiographiques et socio-économiques de l'Algérie occidentale ainsi que ses différentes ressources et les facteurs majeurs de dégradation. Elle s'articule sur 03 chapitres :

Chapitre 1 : Caractères physiographiques et socioéconomiques de l'Algérie Occidentale

Chapitre 2 : Etat des lieux des Ressources Naturelles en Algérie Occidentale

Chapitre 3 : Facteurs Majeurs de Dégradation des Ressources Naturelles en Algérie Occidentale

Partie II :

Elle présente l'apport des outils de la géomatique (SIG et Télédétection) pour l'évaluation de la dégradation des ressources naturelles de l'ouest algérien. Elle est divisée en 04 chapitres :

Chapitre 4 : Notions de base en géomatique.

Chapitre 5 : Evaluation de la dégradation des sols et du risque d'érosion hydrique par SIG, Télédétection et le modèle RUSLE, cas du bassin de Bouhanifia.

Chapitre 6 : Evaluation du risque d'incendie de forêt et de la dégradation des espèces forestières à l'aide de SIG et de la télédétection dans la forêt de Gharrous.

Chapitre 7 : Cartographie et Suivi de la dynamique des zones humides par télédétection spatiale, Cas de la Merdja de Sidi Abed.

Conclusion générale et perspectives.

Partie I :

Caractères Physiographiques et Socio-économiques, Etat des Ressources Naturelles et Risques Majeurs de Dégradation à l'Ouest Algérien

**Chapitre 1 : Caractères
physiographiques et
socioéconomiques de l'Algérie
Occidentale**

1. Introduction

Située au nord-ouest du continent africain, l'Algérie constitue avec le Maroc et la Tunisie la bordure sud de la méditerranée. Avec une superficie de 2381741 km², elle est découpée selon des critères physiques et historiques en trilogie comportant les tells, la steppe et le Sahara (Mutin, 1985). Cette dernière occupe plus du quatre cinquièmes de la superficie totale. La majorité de la population se concentre dans la partie septentrionale du territoire où les conditions sont favorables aux différentes activités. Cette partie qui s'étale de l'Est à l'Ouest avec une large de près de 1200 Km, est caractérisée par des contrastes physique et climatique bien marqués.

La partie occidentale de l'Algérie septentrionale occupant une superficie de plus de 66769 Km² est distinguée par des écosystèmes floristique et faunistique diversifiés et riches en ressources naturelles. Ces ressources par leurs intérêt écologique et biologique sont avères à préserver et à gérer dans le temps et l'espace.

Un diagnostic physiographique et socio-économique de cette partie demeure très crucial pour une meilleure connaissance de ses caractéristiques et de discerner les principaux facteurs pouvant affecter ces ressources.

2. Caractères géographiques et physiques de la zone d'étude

2.1. Situation géographique

L'Algérie occidentale, d'une superficie de 66769.39 km² s'étend géographiquement entre les méridiens 2° 13' Ouest et 2° 45' Est, et entre les latitudes 33° 44' et 36° 38' Nord. Elle couvre administrativement dix wilayas à savoir :

- 05 wilayas côtières : Chlef, Mostaganem, Oran, Ain Témouchent et Tlemcen.
- 05 autres wilayas internes : Mascara, Relizane, Tiaret, Sidi Bel Abbas et Saida.

Elle est limitée au Nord par la Mer Méditerranée, à l'Ouest par la frontière Algéro-marocaine, au Sud par les hautes plaines du territoire des wilayas de Naama, Bayadh et Laghouat et à l'Est par les wilayas de Djelfa, Tissemsilet, Médéa, Ain defla et Tipaza (Fig. 1-1).

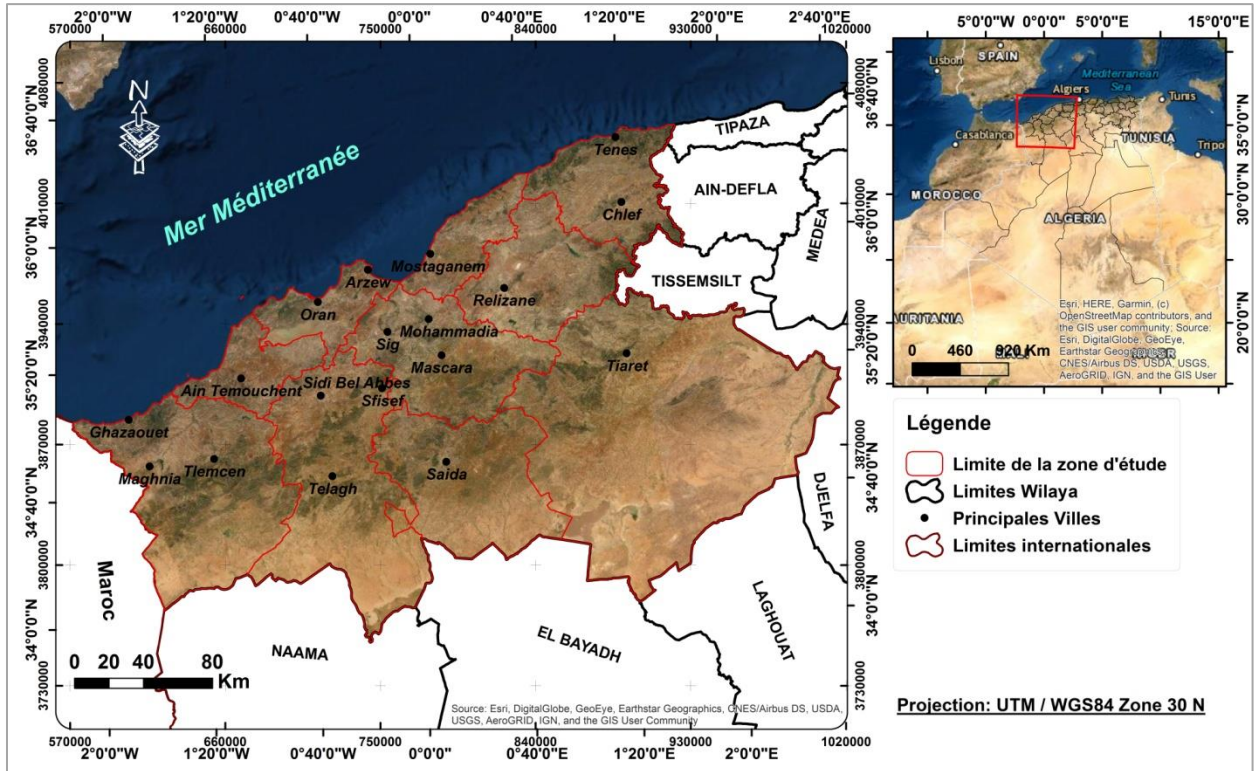


Figure 1-1: Localisation géographique de l'Algérie occidentale

Selon Ghodbani et Berrahi-Midoun (2015), cette zone bordant le bassin méditerranéen au sud est divisée en quatre zones naturelles distinctes :

- Zone littorale
- Plaines littorales et sub-littorales
- Chaînes de montagnes de domaine tellien
- Une zone nord-steppe

Le relief est caractérisé par une chaîne de montagnes et de plateaux parallèles à la côte méditerranéenne d'une altitude inégale formant une limite entre la zone littorale et les régions sub-littorales. Au sud de cette dernière s'étale la chaîne tellienne formée des Monts de Tlemcen, Saida et Ouarsenis d'une altitude plus au moins élevée.

2.2. Cadre administrative

Le territoire de l'ouest algérien comprend dix wilayas dont cinq littorales (Fig. 1-2). Les superficies varient d'une wilaya à une autre. En effet la wilaya de Tiaret occupe plus de 30% de la superficie de la région, puis dans le deuxième rang les wilayas de Sidi Bel Abbes, Tlemcen et Saida avec plus de 10% chacune. En troisième position, avec environ de 7%, se trouvent les wilayas de Mascara, Relizane et Chlef. Les wilayas d'Oran, Mostaganem et Ain Témouchent avec une superficie de moins de 4% de la surface totale (Tab. 1-1, Fig. 1-3).

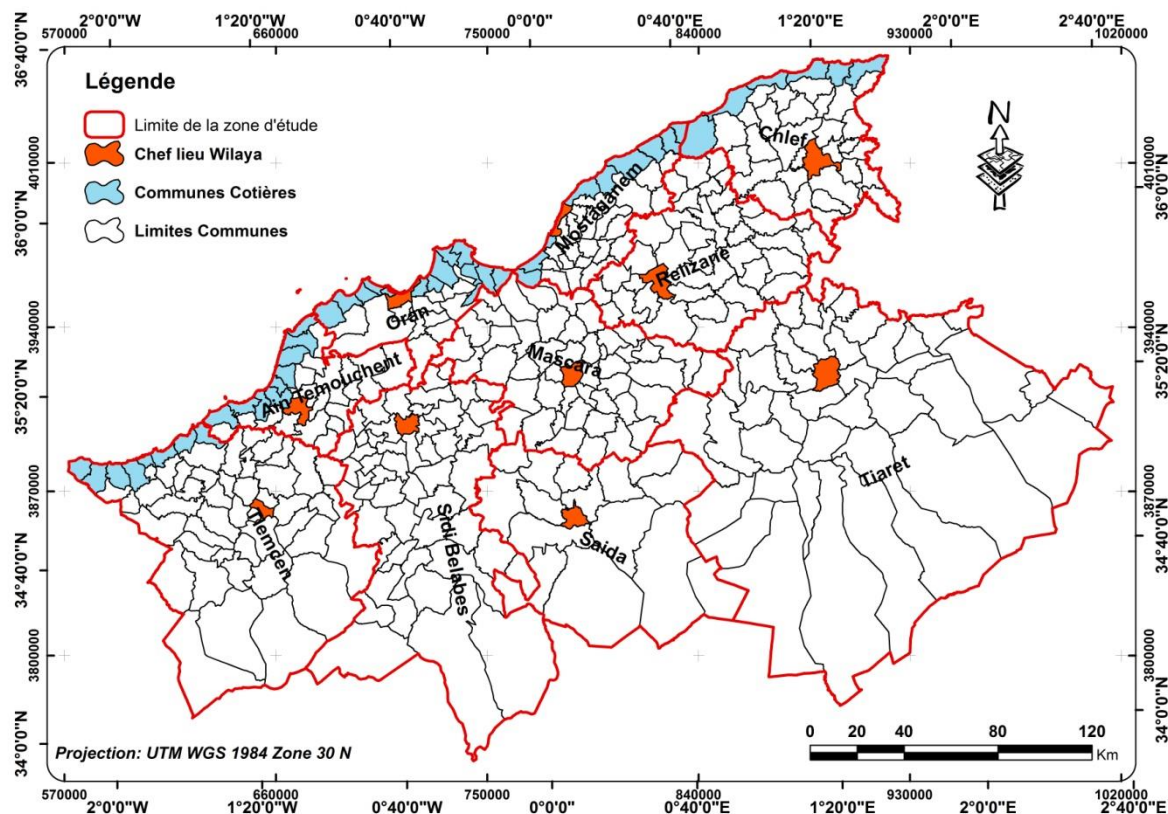


Figure 1-2: Limites administratives des communes de la région ouest de l'Algérie

Le littoral est composé de 47 communes appartenant au territoire des cinq wilayas côtières :

- Tlemcen: 08 communes
- Ain Témouchent: 09 communes
- Oran: 14 communes
- Mostaganem: 10 communes
- Chlef: 06 communes

Tableau 1-1: Superficie des wilayas de l'ouest algérien

Nom Wilaya	Nombre daïra	Nombre communes	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
Sidi Bel Abbès	15	52	9383.99	14.05
Mascara	16	47	5680.87	8.51
Mostaganem	10	32	2212.39	3.31
Saïda	06	06	6769.99	10.14
Relizane	38	13	4882.51	7.31
Ain Témouchent	08	28	2382.90	3.57
Chlef	13	35	4089.11	6.12
Tlemcen	20	53	9059.20	13.57
Tiaret	06	42	20182.30	30.23
Oran	09	26	2126.13	3.18

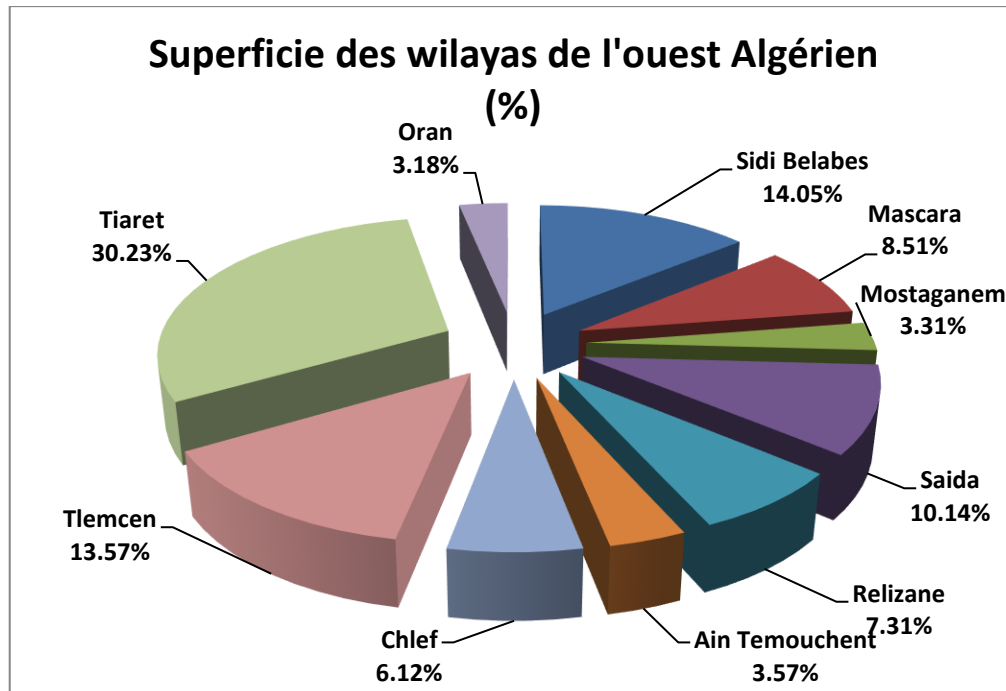


Figure 1-3: Répartition des superficies des wilayas de l'ouest algérien

2.3. Cadre climatique

Le climat de la région ouest est caractérisé par une continentalité remarquable tenant en compte la latitude et l'orientation des reliefs qui est dans la majorité d'orientation Est-Ouest. Ces reliefs limitent le passage des perturbations d'origine océaniques et Méditerranéennes porteuses de pluie vers l'intérieur (Medjrab, 2005). L'appartenance au bassin du méditerranée induit un climat de type méditerranéen : doux et relativement humide en hiver et chaud et sec en été.

Selon Benabadji et Bouaza (2000), le climat méditerranéen est un climat de transition entre la zone tempérée et la zone tropicale avec un été très chaud et très sec, tempéré seulement en bordure de la mer, l'hiver est très frais et plus humide. De même, Nedjraoui (2011) constatait deux composantes essentielles au climat méditerranéen, l'été est la saison la moins arrosée et c'est la saison biologiquement sèche, avec un hiver très frais.

La carte des étages bioclimatiques (Fig. 1-4) montre la dominance du domaine semi-aride et aride avec des portions du domaine sub-humide. Les régions sud à proximité de la zone steppique sont caractérisées par une aridité due au faible taux de pluviométrie. Les zones arides situées à l'intérieur correspondent aux endroits à sols salins où s'étale la vallée de Chélif, la plaine de la Macta et la grande sebkha d'Oran.

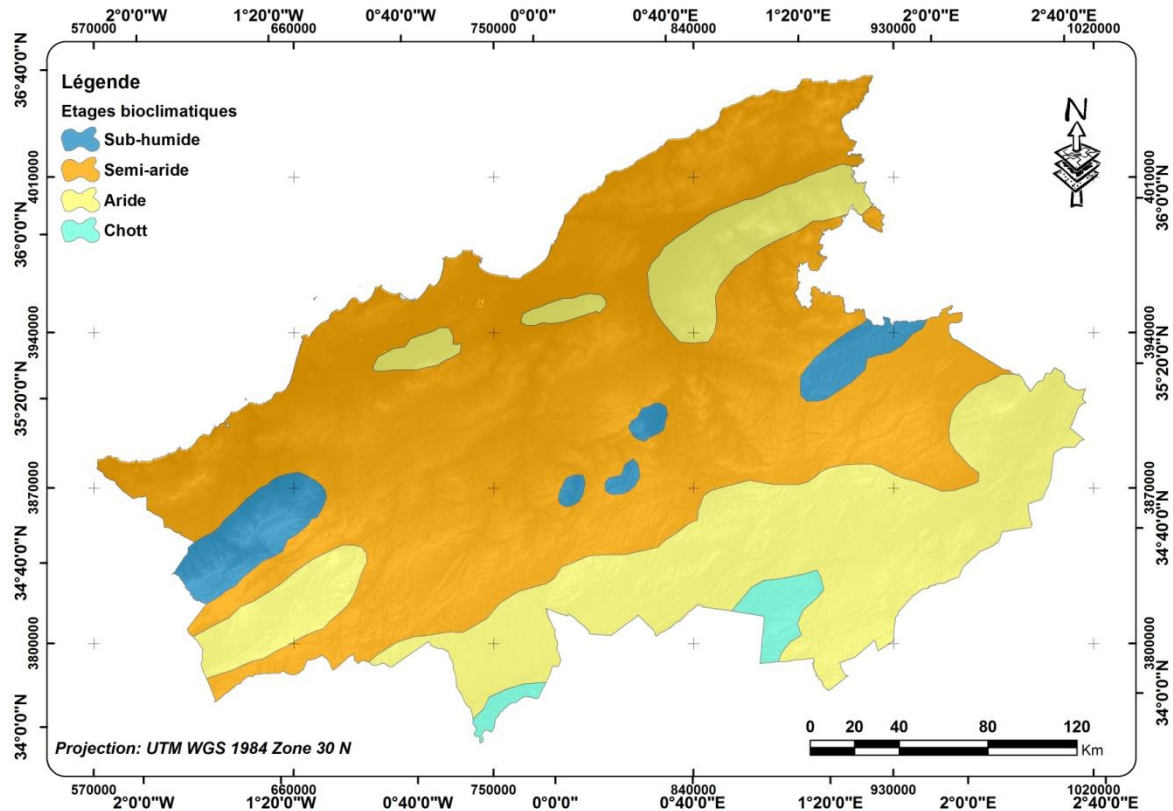
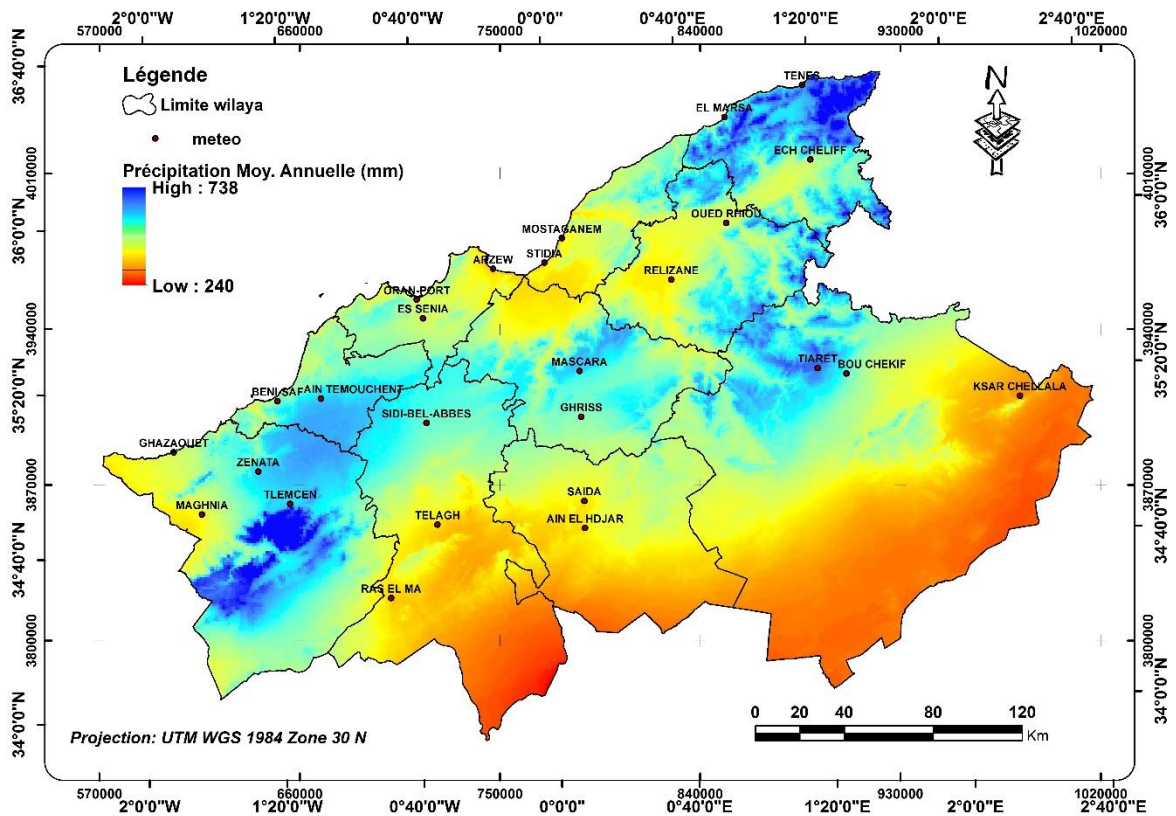


Figure 1-4: Etages bioclimatiques de l'Algérie occidentale (Source: ANAT (2004))

2.3.1. Précipitations

Les précipitations sont considérées comme un facteur clé pour caractériser le régime pluviométrique qui présente un intérêt majeur pour la définition du climat (Medjerab et Henia, 2005). Son analyse s'avère très utile pour une meilleure connaissance du milieu étudié.

La région occidentale de l'Algérie, vue son caractère physiographique diversifié, est caractérisée par une variabilité spatio-temporelle en pluviométrie dans ses différentes zones. D'après la carte de la pluviométrie moyenne annuelle (Fig. 1-5), il convient de remarquer que la région présente des zones pluviométriques relativement hétérogènes, autrement dit la variation spatiale devient plus ou moins importante, entre 240 mm et 738 mm pour la période 1976 au 2004. Ces variations dépendent de l'effet du relief et de l'altitude. En effet, les zones à hautes altitudes des monts de Dhahra au nord-est et les monts de Dhaya au sud-ouest sont les plus pluvieuses avec une moyenne annuelle de plus de 700 mm. En outre, une dissymétrie très nette existe entre les versants, ceux qui sont exposés au nord sont les mieux arrosés et ceux qui le sont au sud sont les plus secs.



Plus on s'éloigne vers le sud, une diminution progressive des pluies est constatée. Les zones agropastorales situées au sud de la région sont les moins arrosées avec une moyenne annuelle moins de 250 mm.

L'analyse saisonnière de la pluviométrie (Fig. 1-6) montre que la saison hivernale est la plus pluvieuse et la saison estivale est la moindre. Les wilayas de Tiaret, Mascara et Aïn Témouchent subissent plus de 200 mm dans la période hivernale tandis que les wilayas de Saida, Relizane et Mostaganem reçoivent moins de 150 mm. Les périodes automnale et printanière sont équitablement distribuées avec une moyenne de 130 mm.

L'établissement des diagrammes ombrothermiques des stations chefs-lieux des dix wilayas nous a permis de bien visualiser graphiquement les variations mensuelles des précipitations et des températures.

Le diagramme ombrothermique est une méthode proposée par Gaussen (1952) qui consiste à reporter en ordonnées les précipitations (mm) et les températures (c°) avec une gradation de l'échelle des précipitations correspondant à deux gradations de l'échelle des températures : $P=2T$. En abscisse, nous reportons les mois de l'année (Dahmani, 2010).

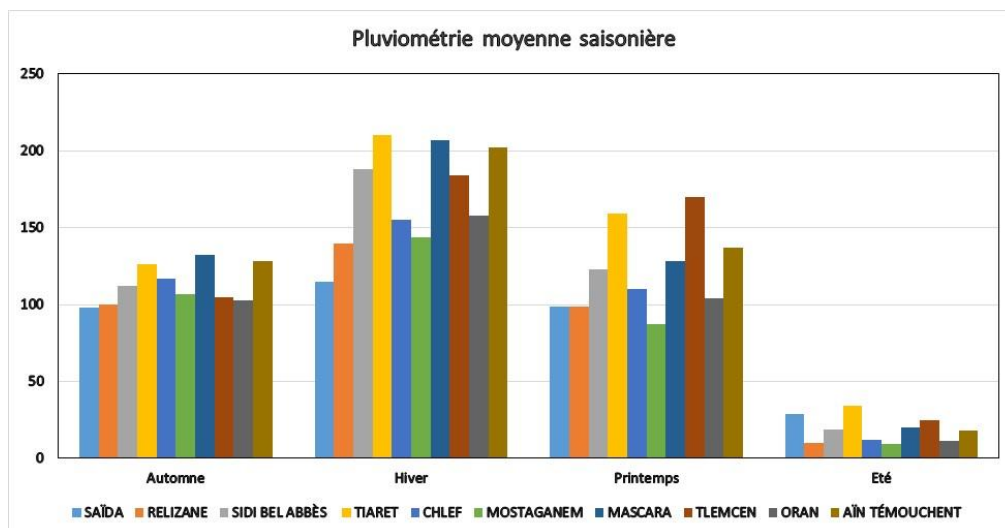


Figure 1-6: Pluviométrie moyenne saisonnière

D'après les diagrammes illustrés dans la figure 1-7, les courbes des températures et des précipitations s'intersectent définissant deux périodes : la période sèche représentée par la partie comprise entre les deux courbes et qui traduit à la fois sa durée et son intensité. En dehors de cette partie est représentée la période pluvieuse.

Comme le montre la figure 1-7, toutes les stations sont caractérisées par une saison sèche qui s'étend sur 4 mois au moins, voir 06 mois dans certains cas. La saison sèche est la plus longue dans les zones de Relizane, Mostaganem et Chlef qui s'étale du mois d'Avril à celui d'Octobre. La période pluvieuse débute avec le mois d'octobre dans la plupart des régions.

Tableau 1-2: Précipitation moyenne mensuelle/annuelle de quelques stations de l'ouest algérien

Station	Mois												Total
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	
SAÏDA	41	36	36	33	30	16	4	9	21	32	45	38	341
RELIZANE	50	37	38	30	31	7	1	2	14	32	54	53	349
SIDI BEL ABBÈS	66	52	43	46	34	14	2	3	17	39	56	70	442
TIARET	73	64	66	48	45	23	4	7	21	38	67	73	529
CHLEF	54	44	38	37	35	9	1	2	18	41	58	57	394
MOSTAGANEM	50	34	33	26	28	5	1	3	13	34	60	60	347
MASCARA	76	54	50	44	34	14	2	4	17	41	74	77	487
TLEMCEM	53	56	63	57	50	17	4	4	18	35	52	75	484
ORAN	51	45	41	36	27	8	1	2	14	34	55	62	376
AÏN TËMOUCHENT	62	66	51	49	37	14	1	3	15	42	71	74	485

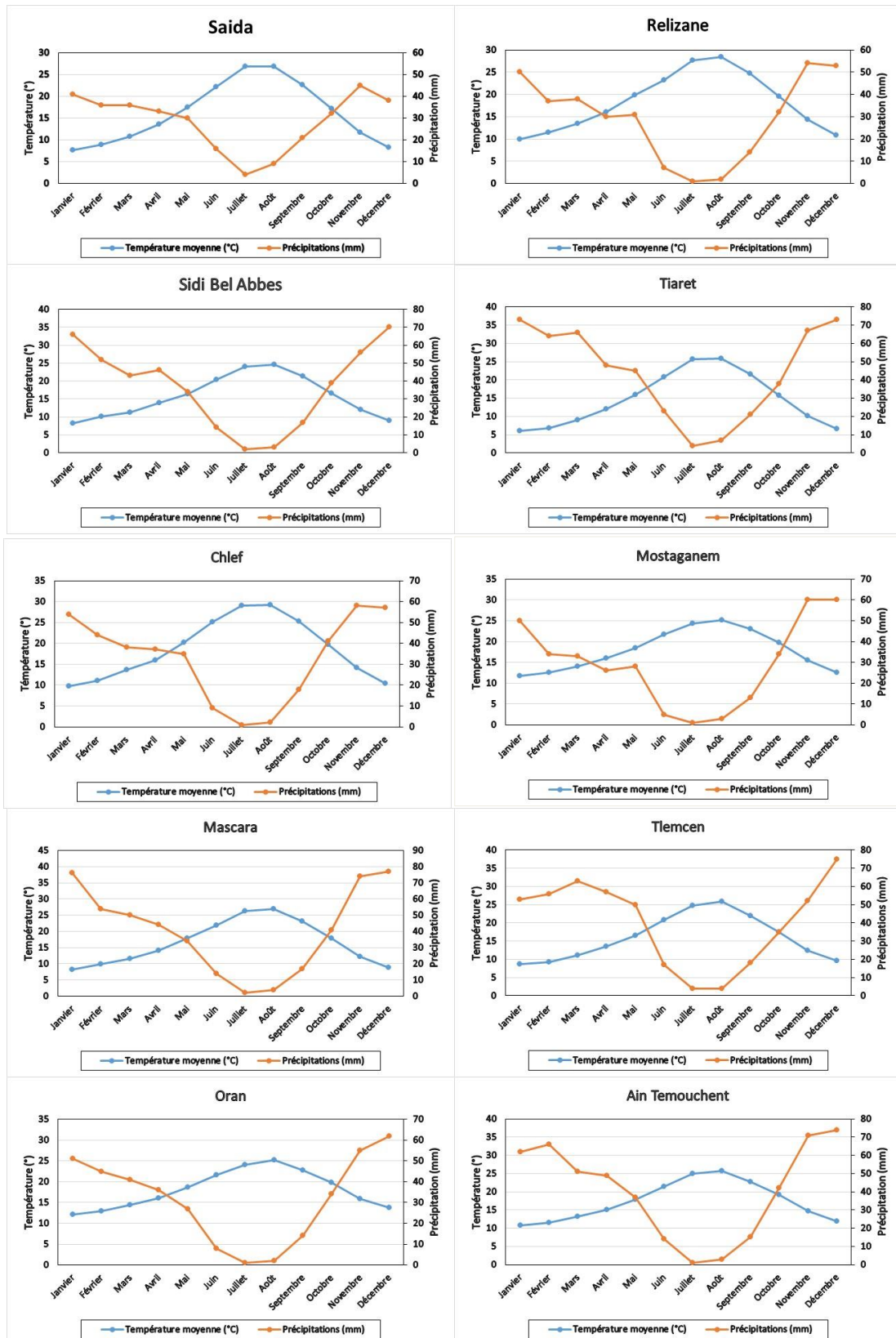


Figure 1-7: Diagrammes Ombrothermiques des 10 stations de l'Algérie occidentale

2.3.2. Température

La température moyenne mensuelle et annuelle agit directement sur le climat en interaction avec les autres facteurs météorologiques (Dahmani, 2010).

La moyenne des températures varie entre 6°C et 14°C en hiver et, en moyenne, 24°C en juillet et 29° en août (Tab. 1-3). En été, des endroits enregistrent ces dernières années une température journalière qui dépasse 40°.

Les températures maximales sont enregistrées en période estivale, durant les mois de Juillet et Août, tandis que les températures les plus basses correspondent à la période hivernale, aux mois de Janvier et février.

D'après l'analyse des variations des températures mensuelles (Fig. 1-8), cinq stations enregistrent une température maximale de plus 30° C en Juillet et Aout (Saida, Tiaret, Mascara, Relizane et Chlef). La température mensuelle minimale peut diminuer au moins de 4° C en hiver (Janvier et Février) pour le cas de Tiaret et Tlemcen. Des périodes de gelé s'enregistrent chaque année dans plusieurs régions des plaines sublittorales et les zones agropastorales et qui peuvent durer plusieurs jours en saison hivernale.

Tableau 1-3: Températures mensuelles et annuelles des dix stations de la région ouest

Station	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy.
Saida	7.6	8.9	10.8	13.6	17.4	22.1	26.9	26.9	22.6	17.1	11.7	8.2	16.15
Relizane	10	11.4	13.4	16.1	19.8	23.3	27.7	28.4	24.8	19.6	14.4	10.8	18.31
Sidi Bel Abbes	8.3	10.1	11.2	13.9	16.5	20.5	24	24.6	21.3	16.6	12.1	9	15.68
Tiaret	6	6.8	9	12	16	20.9	25.7	25.9	21.6	15.8	10.2	6.6	14.71
Chlef	9.8	11.1	13.6	16	20.2	25.2	29	29.2	25.3	19.7	14.1	10.4	18.63
Mostaganem	11.8	12.5	14	16	18.5	21.8	24.3	25.1	23.1	19.7	15.5	12.6	17.91
Mascara	8.3	9.8	11.5	14.2	17.9	21.9	26.3	27	23.1	17.9	12.3	8.9	16.59
Tlemcen	8.6	9.3	11.1	13.6	16.6	20.9	24.7	25.9	21.9	17.4	12.5	9.6	16.01
Oran	12.2	12.9	14.4	16.1	18.6	21.6	24.1	25.2	22.8	19.8	15.9	13.7	18.11
Ain Témouchent	10.8	11.5	13.2	15.1	17.9	21.5	24.9	25.7	22.8	19.2	14.7	11.8	17.43

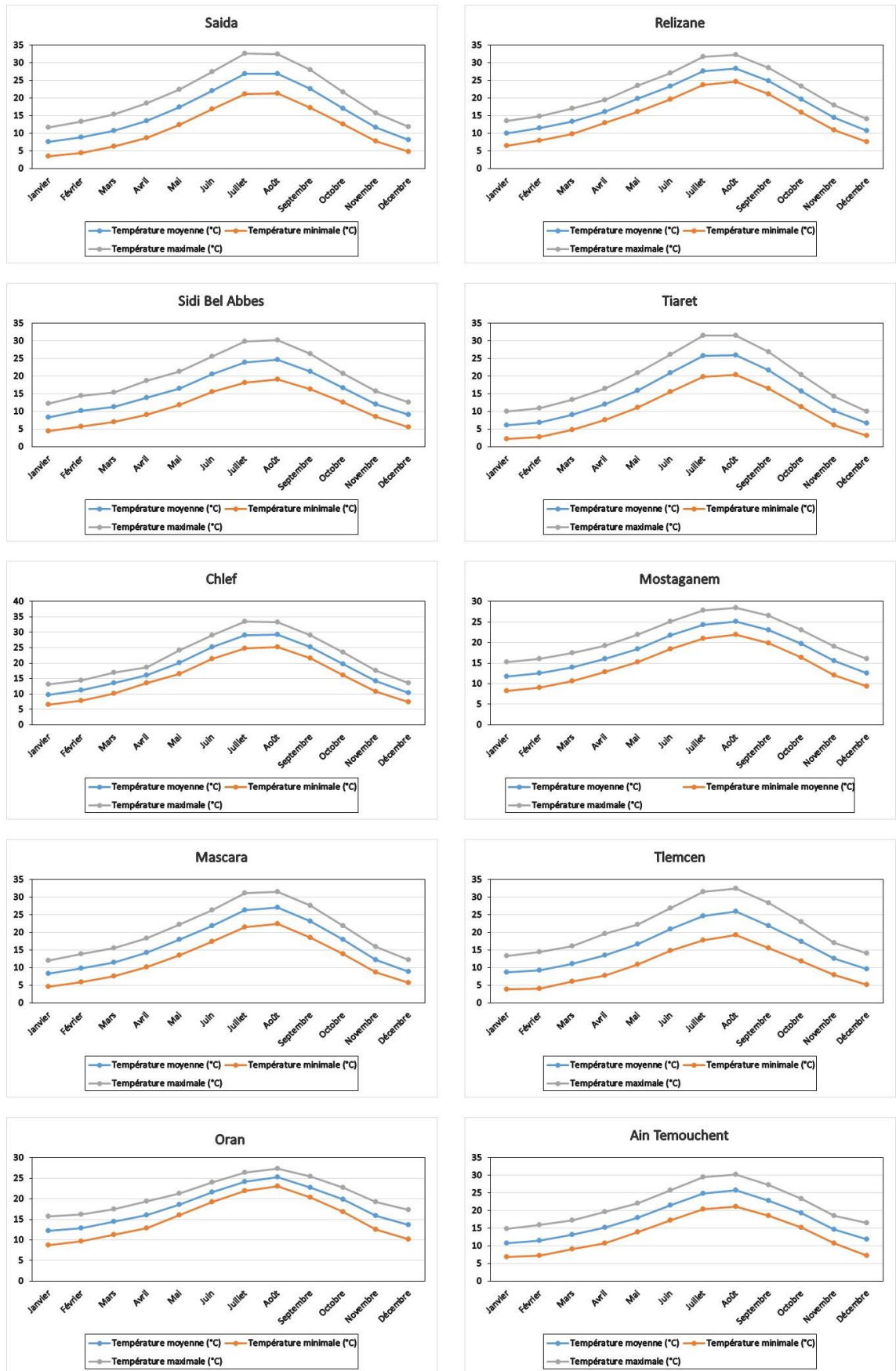


Figure 1-8: Températures mensuelles maximales, minimales et moyennes des dix stations occidentale

2.4. Morphologie et relief

Le relief de la région ouest algérien est caractérisé par des altitudes variant de 0 à plus de 1800 m. Les basses altitudes se trouvent particulièrement dans les côtes et les plaines littorales et s'augmente progressivement vers le sud avec une altitude moyenne allant jusqu'à 1800m où se localisent la bordure des hauts plateaux et la zone steppique (Fig. 1-9).

Les altitudes de plus de 1000 m sont plus dominantes que les autres avec de plus de 36% de la superficie totale caractérisant généralement la partie sud. Les altitudes de 600 à 1000 m constituent environ 26% de la zone et se concentrent dans la partie centrale avec des massifs d'une élévation inégale (Tab. 1-4). Les altitudes moins de 600 m correspondent à la partie littorale ou s'oriente une chaîne de plateaux de plaines sublittorales (Fig. 1-10).

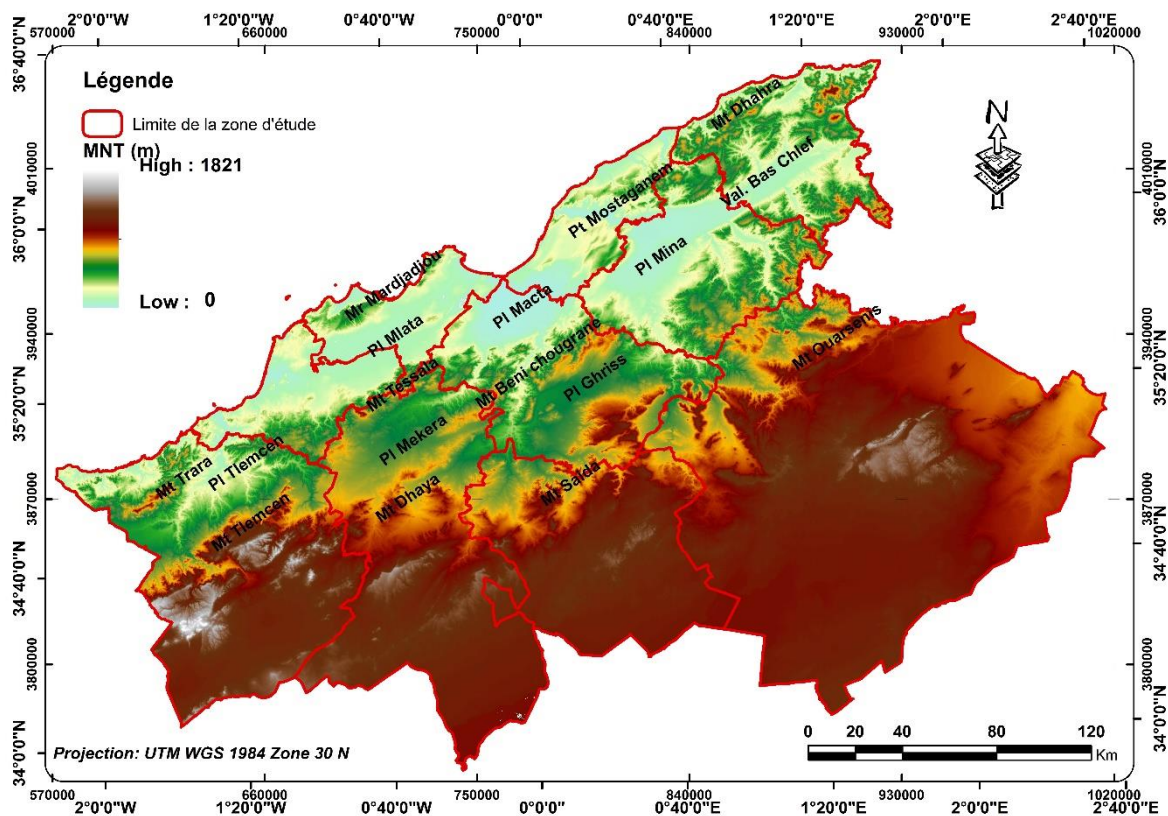


Figure 1-9: Relief et Altitude de la région ouest de l'Algérie

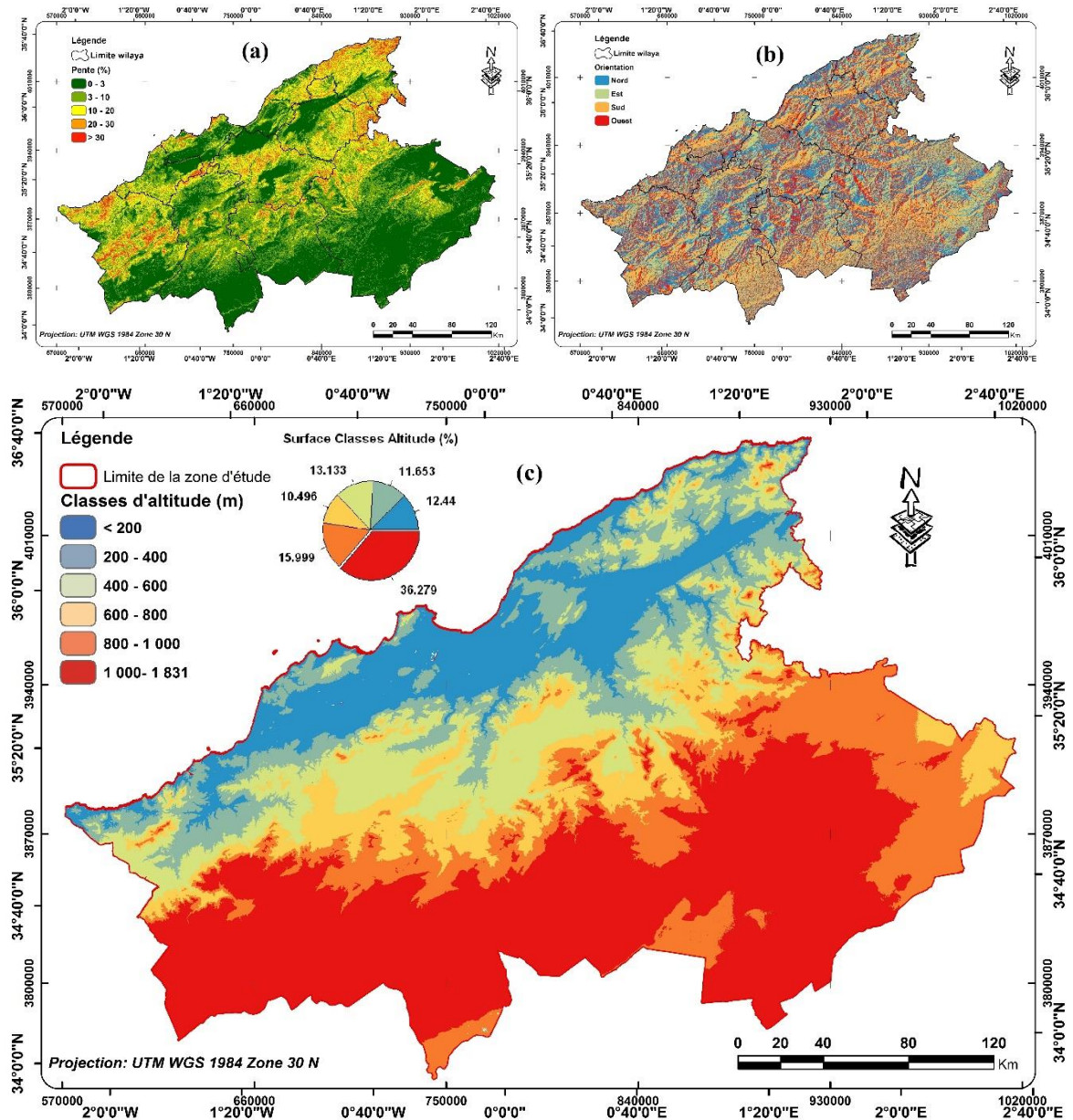


Figure 1-10: La morphologie de la zone ouest : (a) Carte des pentes, (b) Carte d'exposition et (c) les classes d'altitudes

Point de vue morphologique, la région se caractérise par :

- ✓ La partie littorale et sub-littorale caractérisées par une chaîne de montagnes qui longent la Méditerranée est formée par le massif des Traras, les monts de Mardjadjou, le plateau de Mostaganem et la chaîne du Dahra entre le Chélif et la mer.
- ✓ Une région transversale qui relie la partie littorale à la ligne montagneuse du Tell. Elle est caractérisée par les plaines de Tlemcen, la Tafna, Habra, Mina et le Chélif.
- ✓ La chaîne du littoral est reliée à la région limitrophe aux hauts plateaux au sud par les monts de Tlemcen, le massif du Tessala, les monts de Beni Chougrane, les prolongements septentrionaux des monts de Saida et de l'Ouarsénis.

Tableau 1-4: Répartition spatiale des classes d'altitudes par wilaya

Wilaya	Superficie Classes Altitude (%)					
	<200m	200-400m	400-600m	600-800m	800-1000m	>1000m
Ain Témouchent	52.54	29.46	14.99	2.27	0.07	0.00
Chlef	23.15	40.24	27.29	6.68	1.38	0.14
Mascara	19.33	19.24	36.94	16.82	6.67	1.00
Mostaganem	57.52	37.54	3.42	0.00	0.00	0.00
Oran	71.73	19.13	5.92	0.93	0.10	0.00
Relizane	36.10	32.27	23.75	6.93	0.87	0.08
Saida	0.00	0.09	4.55	13.21	17.09	65.05
Sidi Bel Abbes	0.00	1.67	17.18	15.75	15.58	49.77
Tiaret	0.00	0.23	2.77	11.25	34.65	51.08
Tlemcen	4.77	14.39	14.86	7.97	6.24	51.32

2.5. Géologie et Sol

L'histoire géologique de l'Algérie occidentale s'inscrit dans le processus de la géodynamique globale de la tectonique des plaques donnant naissance au domaine de l'Algérie alpine.

L'Algérie alpine concerne le nord du territoire étudié où les chaînes alpines algériennes sont nées de la collision des plaques Afrique-Europe, la zone d'étude est constituée de reliefs jeunes formés au cours du Tertiaire par les mouvements alpins. Du Nord au Sud on rencontre les dépôts tertiaires et quaternaires reposant sur un socle métamorphique (Fig. 1.8).

Le domaine septentrional est constitué de reliefs jeunes, modelés au cours du Tertiaire par les mouvements alpins. L'Algérie alpine est composée des ensembles structuro-sédimentaires suivants, du nord au sud :

- Les plateaux continentaux réduits, à dépôts tertiaires et quaternaires reposent sur un socle métamorphique.
- L'Atlas tellien est le domaine des nappes, avec des bassins de type intramontagneux (bassin du Chéelif), dont la série sédimentaire s'étend du Jurassique au Miocène.
- Les hauts plateaux, avant-pays alpin, à couverture sédimentaire réduite, où les processus locaux de distension ont permis la formation de bassins intramontagneux comme ceux de Telagh et de Tiaret.

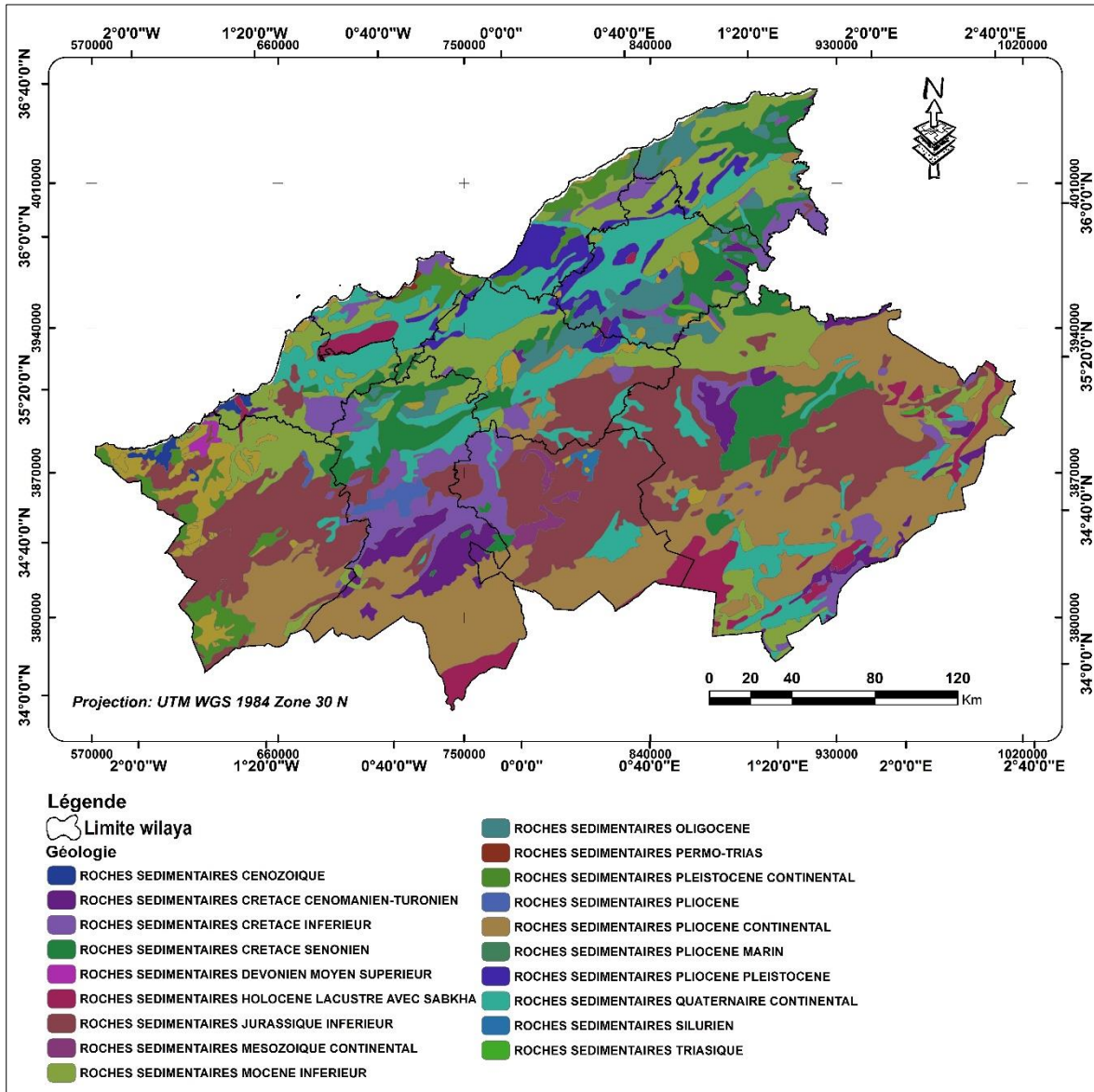


Figure 1-11: La carte géologique de l'ouest algérien (Source: SATEC 1/500000)

Selon la carte des unités des sols extraite de la Base Harmonisée Mondiale de Données sur les Sols (Fig. 1-12), la zone ouest est caractérisée par dix unités majeures du sol :

Cambisols chromiques : ce type de sol a un horizon A ochrique et un taux de saturation en bases (déterminé par NH_4OAc) égal ou supérieur à 50% au moins entre 20 et 50 cm de profondeur, mais qui ne sont pas calcaires à la même profondeur. Ayant un horizon B cambique brun vif à rouge ; n'ayant pas de caractères vertiques ; n'ayant pas de caractères d'hydromorphie à moins de 100 cm de profondeur ; n'ayant pas de permafrost à moins de 200 cm de profondeur.

Cambisols calciques: cambisols ayant un horizon A ochrique présentent une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : un horizon calcique, un horizon gypsique ou des amas de calcaire pulvérulent tendre à moins de 125 cm de profondeur ; sont calcaires au moins entre 20 et 50 cm de profondeur; n'ayant pas de caractères vertiques; n'ayant pas de caractères d'hydromorphie moins de 100 cm de profondeur; n'ayant pas de permafrost à moins de 200 cm de profondeur.

Luvisols chromiques (Lc) : luvisols ayant un horizon B argilique brun vif rouge ; n'ayant pas de caractères vertiques et ferriques; n'ayant pas d'horizon E albique; n'ayant ni horizon calcique, ni amas de calcaire pulvérulent tendre, ni plinthite à moins de 125 cm de profondeur ; n'ayant pas de caractères d'hydromorphie à moins de 50 cm de profondeur

Xérosols (X) : sols soumis a un régime hydrique aride; ayant un horizon A ochrique faiblement développé et une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : un horizon B cambique, un horizon B argilique, un horizon calcique, un horizon gypsique; n'ayant pas d'autres horizons diagnostiques; ne présentant pas les caractéristiques diagnostiques des vertisols ; n'ayant pas une forte salinité; n'ayant pas de permafrost moins de 200 cm de profondeur.

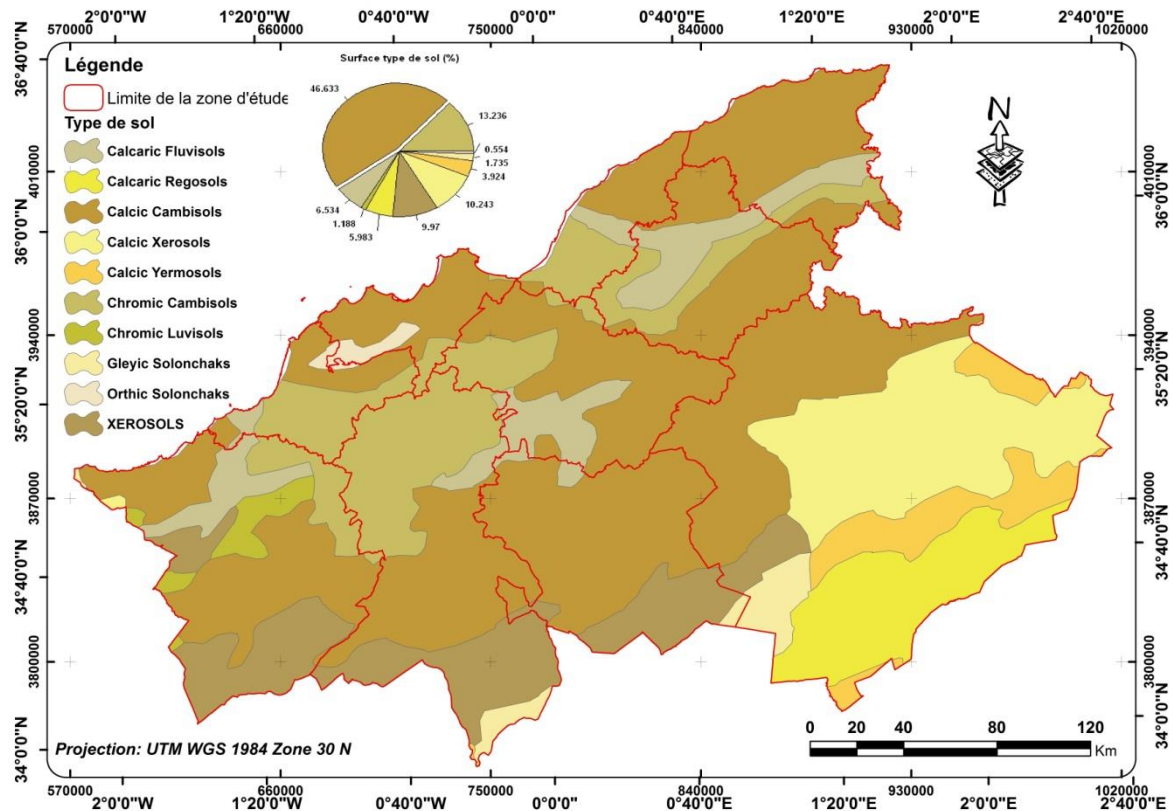


Figure 1-12: La carte des unités du sol de l'ouest de l'Algérie (Source: HSWD, 2012)

Xérosols calciques (Xk) : xérosols ayant un horizon calcique à moins de 125 cm de profondeur ; n'ayant pas d'horizon argilique surmontant l'horizon calcique

Solonchaks gleyiques (Zg) : solonchaks ayant des caractères d'hydromorphie moins de 50 cm de profondeur

Solonchaks orthiques (Zo) : solonchaks ayant un horizon A ochrique; n'ayant pas de caractères takyriques ; n'ayant pas de caractères d'hydromorphie à moins de 50 cm de profondeur.

Yermosols calciques (Yk) : yermosols ayant un horizon calcique à moins de 125 cm de profondeur ; n'ayant pas d'horizon B argilique surmontant l'horizon calcique ; n'ayant pas de caractères takyriques.

Régosols calcaire (Rc) : régosols qui sont calcaires au moins entre 20 et 50 cm de profondeur.

Fluvisols calcaires (Jc) : fluvisols calcaires au moins entre 20 et 50 cm de profondeur ; n'ayant pas d'horizon sulfurique ni de matériau sulfuré à moins de 125 cm de profondeur.

3. Caractère socio-économique

3.1. Population et démographie

D'après les statistiques de l'Office National des Statistiques (ONS), la population de la région ouest de l'Algérie qui était plus de 5480000 habitants en 1987 est caractérisée par un déséquilibre en répartition. Cette population s'augmente avec plus de 1200000 habitants en 1998 et qui dépasse 7800000 habitants en 2008. En effet, la wilaya d'Oran qui a la faible superficie abrite le plus grand nombre d'habitants en priori des wilayas de Tlemcen et de Chlef en deuxième position. Les wilayas de Saida et Ain Temouchent ont la faible population en suivant les wilayas de Tiaret, Mascara, Rélizane, Mostaganem et Sidi Bel Abbes (Tab. 1-5).

Quant à la densité de population en 2008, la wilaya d'Oran est considérée comme la plus dense avec plus de 680 habitants/Km² selon le recensement de 2008 (ONS, 2008). Les wilayas de Mostaganem et de Chlef quant à elles sont caractérisées par une population plus au moins dense de plus de 333 et 245 habitants/Km² respectivement. Les wilayas de Mascara, Rélizane, Ain Temouchent et Tlemcen ont moins de densité en succédant Sidi Bel Abbes et Tiaret en dernier rang avec moins de 65 habitants/Km² (Fig. 1-6).

Tableau 1-5: Population des wilayas de l'ouest algérien en 1987, 1998 et 2008 (Source : ONS)

Nom Wilaya	RGPH ¹ 1987	RGPH 1998	RGPH 2008	Taux_Accr1988_2008
Oran	932 473	1 213 839	1454078	1,9
Chlef	684 192	858 695	1002088	1,6
Tlemcen	714 862	842 053	949135	1,2
Tiaret	575 794	725 853	846823	1,6
Mascara	566 901	676 192	784073	1,5
Mostaganem	505 932	631 057	737118	1,6
Relizane	544 877	642 205	726180	1,3
Sidi Bel Abbès	446 277	525 632	604744	1,4
Ain Témouchent	274 990	327 331	371239	1,3
Saïda	235 494	279 526	330641	1,7
Total	5481792	6722383	7806119	

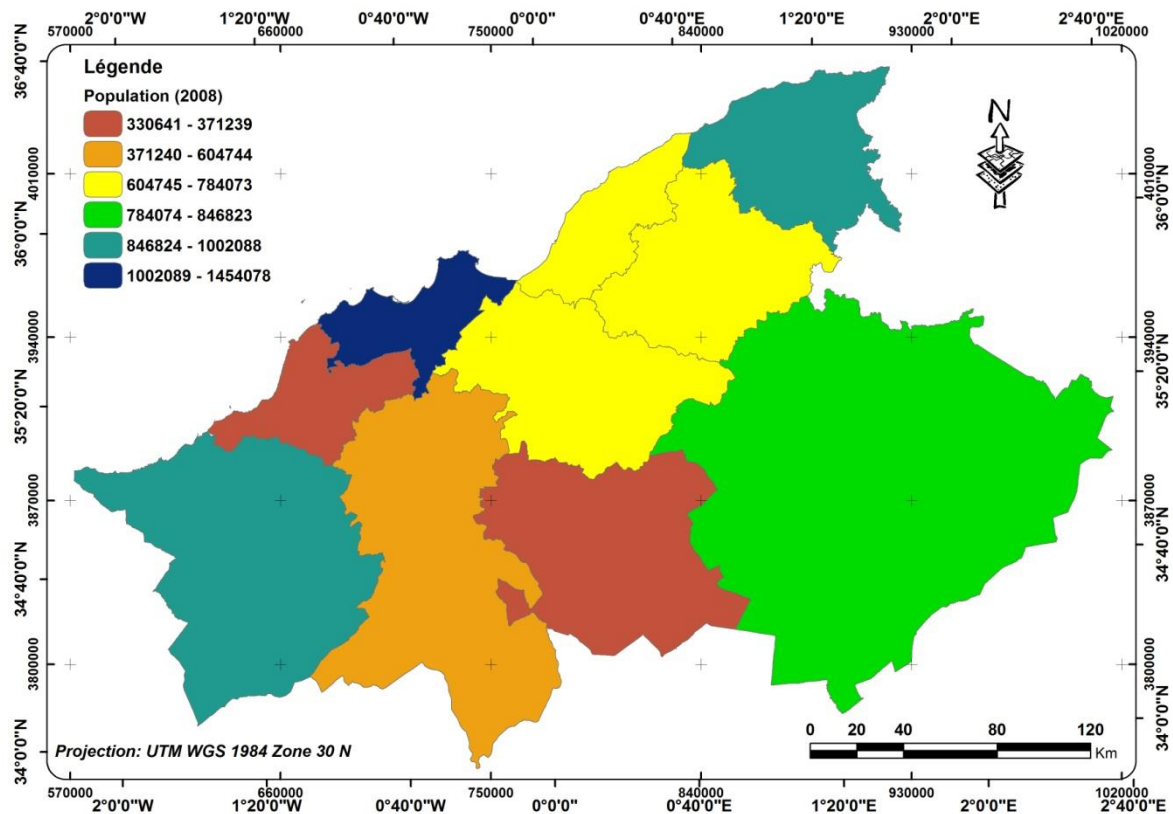


Figure 1-13: La carte de population 2008 des wilayas de l'ouest algérien

Cette inégalité en densité de population explique en partie la répartition de la population qui est affecté par plusieurs critères économiques et sociaux. L'analyse spatiale de la densité de population par commune montre que la population se concentre beaucoup plus dans les chefs-lieux de wilaya. En outre, les communes des wilayas en

¹ RGPH: RECENSEMENT GENERAL DE LA POPULATION ET DE L'HABITATION

proximité du littoral sont plus denses que les autres. Plus on éloigne vers le sud plus la densité de population par communes décroît.

En plus, une comparaison entre les densités de population de 1987 et 1998 montre clairement que beaucoup de communes ont diminué de population vers les grandes agglomérations et les chefs-lieux de wilaya. Cela est dû principalement à l'exode des campagnes rurales à cause des problèmes de sécurité et de terrorisme.

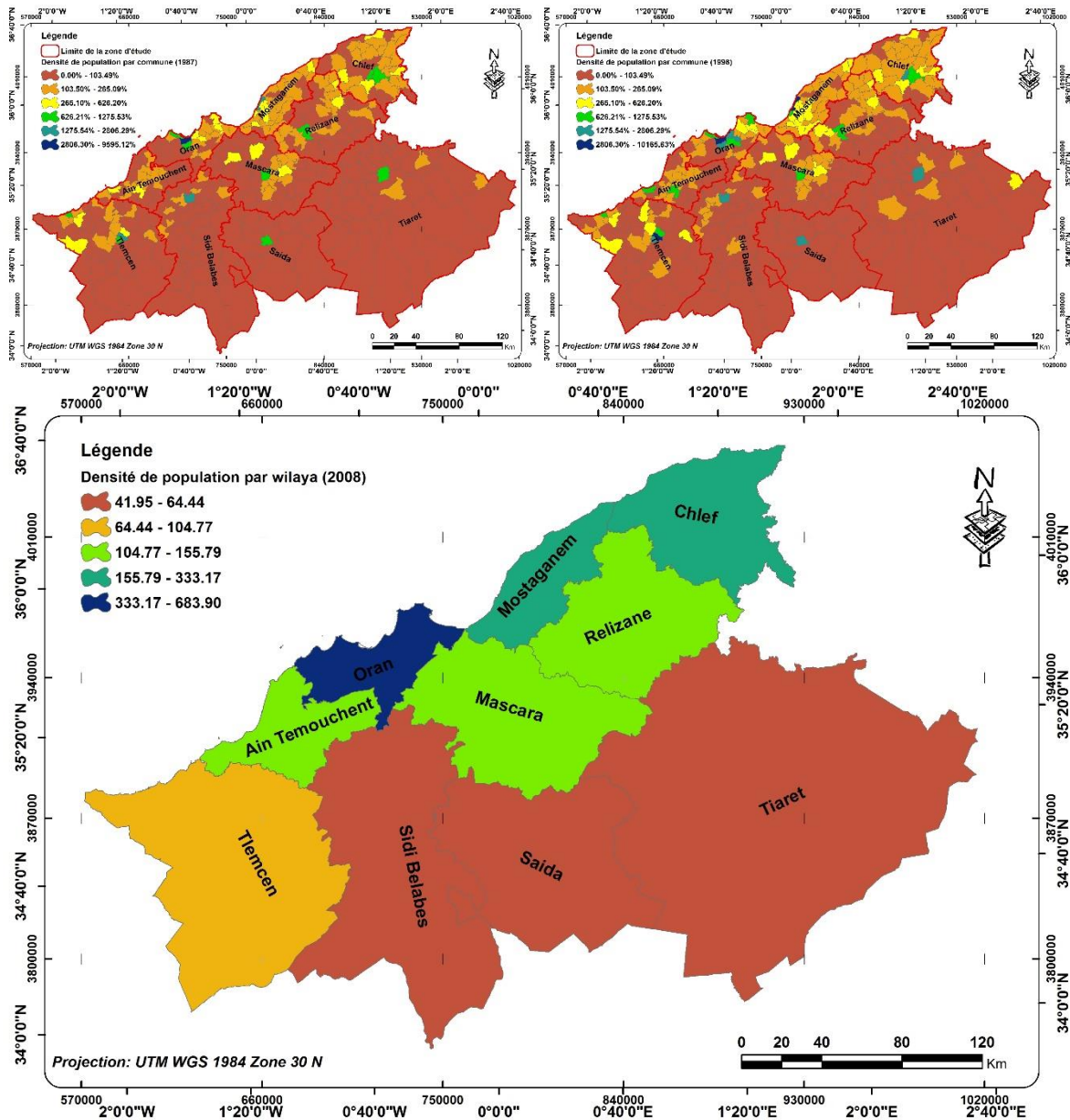


Figure 1-14: La carte de densité de population par communes : (a) RGPH 1987, (b) RGPH 1998 et (c) par wilaya RGPH 2008

3.2. Infrastructures de base

Le transport représente un des piliers fondamentaux du développement durable et de la prospérité de tout pays. Des systèmes de transport efficaces et des réseaux modernes sont donc une nécessité pour le développement économique, le bien-être social, la production à grande échelle, et la préservation de l'environnement.

En Algérie, le secteur du transport connaît une véritable mutation. Un grand nombre de projets ont été réalisés où sont en phase de réalisation, afin de rendre ce secteur plus performant et plus efficace dans sa contribution dans le développement économique du pays.

La région ouest dispose des infrastructures de base très importantes à caractère économique primordial au développement de la région. Ces infrastructures peuvent être regroupées en quatre catégories :

- Le réseau routier
- Le réseau portuaire (pour les wilayas littorales)
- Le réseau aéroportuaire
- Les secteurs porteurs tels que l'agriculture, l'industrie, la pêche et le tourisme.

Le tableau suivant résume les infrastructures de chaque wilaya selon les chiffres établis par l'Agence Nationale de Développement de l'Investissement (2013).

Tableau 1-6: Les infrastructures de base des wilayas de l'ouest (Source : ANDI, 2013)

Wilaya	Infrastructures de base						Secteurs porteurs
	Réseau routier (km)			Réseau aéroportuaire	Réseau portuaire	Réseau ferroviaire	
	Nationale	Wilaya	Communale				
Tlemcen	750	1190	2134	1	3	164 km	Agriculture, Industrie et Tourisme
Ain Témouchent	328	297	853	0	3	57 km	Agriculture, Industrie, Energies et Mines, Pêche, Tourisme et Artisanat
Sidi Bel Abbes	762	687	443	1	0	199 km	Agriculture, Industrie et Tourisme
Oran	227	630	291	1	2	95 km	Agriculture, Industrie, Pêche et Tourisme
Mascara	566	671	1548	1	0	161 km	Agriculture, Industrie et Tourisme
Saida	402	646	699	0	0	133 km	Agriculture, Industrie, Tourisme et Artisanat
Mostaganem	332	653	1200	0	3	40 km	Agriculture, Industrie, Pêche et Tourisme
Chlef	304	560	2371	1	3	67 km	Industrie, Agriculture, Pêche et Tourisme
Relizane	314	560	1801	0	0	124 km	Agriculture, Industrie, Mines, Tourisme et Artisanat
Tiaret	646	708	665	1	0	185 km	Agriculture, Industrie et Tourisme

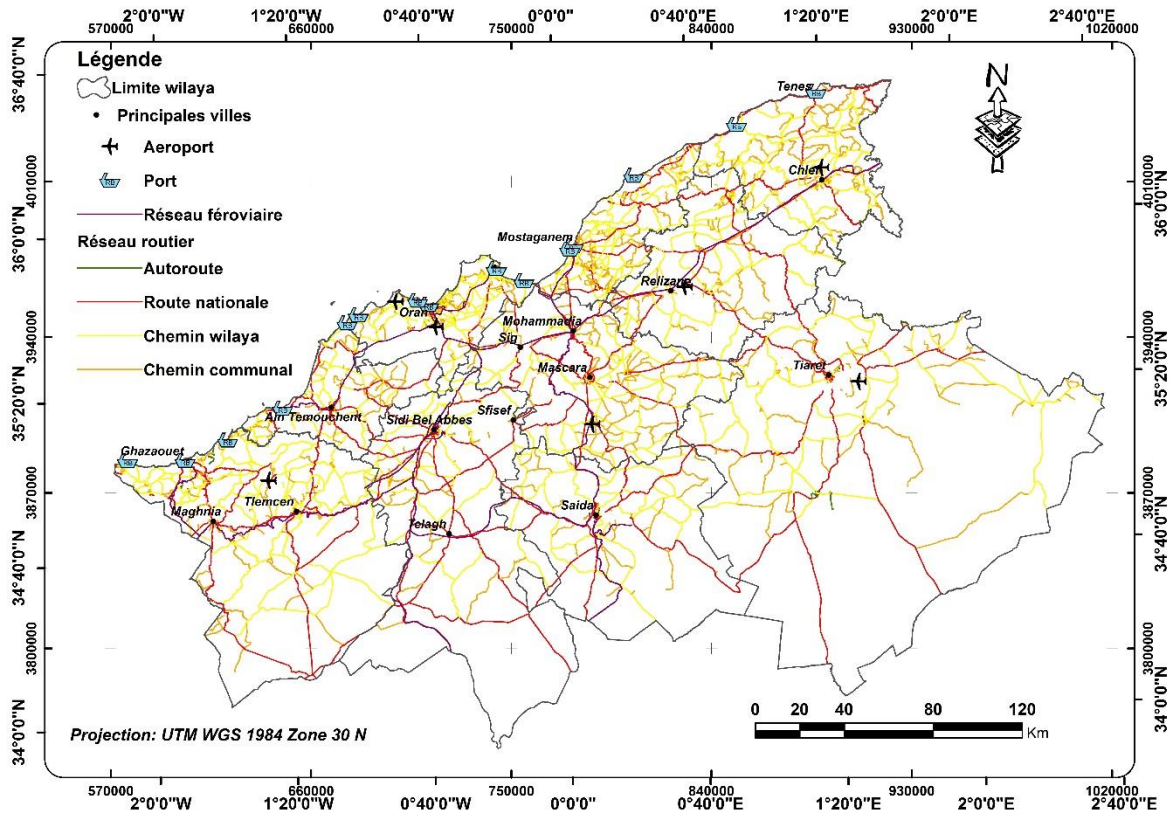


Figure 1-15: Carte du réseau de transport de l'ouest algérien

4. Conclusion

Le territoire de l'Algérie occidentale recèle des richesses extrêmement variées : paysages, biodiversité floristique et faunistique. Cette diversité est liée aux contrastes entre les zones humides, subhumides et les zones semi-arides et arides.

Mais la biodiversité de cette partie de l'Algérie reste toutefois peu connue en détails à l'échelle régionale sauf les travaux qui ont été effectués à une échelle d'un bassin ou un sous-bassin versant ou à l'échelle d'une wilaya.

Il s'avère nécessaire d'étudier et de présenter les potentialités et les différentes ressources naturelles de cette partie en vue de mieux connaître ses caractéristiques, son comportement et les interactions qu'elles subissent avec divers facteurs climatiques, anthropiques et topographiques.

**Chapitre 2 : Etat des Lieux des
Ressources Naturelles en Algérie
Occidentale**

1. Introduction

Située à la partie septentrionale de l'Algérie aux rives du bassin méditerranéen, l'Algérie occidentale avec son étendu géographique est le foyer des ressources naturelles riches et diversifiées. Ces ressources exprimées souvent sous le terme interface **Sol-Eau-Végétation** abritées dans des écosystèmes riches et très diversifiés qui demeurent à bien connaître.

La richesse qui caractérise ces écosystèmes ont fait l'objet d'une sollicitation précoce (Miara, 2017) qui demande une préservation durable surtout que certains d'eux comprennent des paysages à intérêts mondiales.

Dans cette section, une illustration des différentes ressources naturelles de la région occidentale de l'Algérie sera présentée tout en focalisant sur trois types: Ressources forestières, en eaux et du sol.

2. Ressources Forestières

La couverture forestière est considérée comme une composante essentielle dans le milieu naturel. Elle a un grand intérêt dans l'équilibre du climat, la préservation du sol et la faune et les processus environnementaux.

La partie ouest du nord algérien comporte une diversité en patrimoine forestier qui constitue un grand intérêt pour plusieurs études scientifiques grâce à sa grande richesse liée à l'hétérogénéité des facteurs historiques, géographiques, géologiques et écologiques (Mostefai, 2017).

Les écosystèmes forestiers de l'ouest algérien prennent sa part du patrimoine forestier du nord algérien qui est de l'ordre 4.149.400 ha selon la Direction Générale des Forêts (DGF, 2018) réparti en :

- ✓ Forêts naturelles : 1.329.400 ha.
- ✓ Maquis : 1.844.400 ha.
- ✓ Reboisement : 972.800 ha.
- ✓ Pelouse : 3.000 ha

Les conditions climatiques du nord algérien permettent le développement de ce patrimoine estimé à environ 11% du territoire algérien (DGF, 2018 ; FAO, 2012) dont 43% sont localisés à l'Est, 29 % à l'Ouest, 27 % au centre et 1% au niveau de l'Atlas Saharien (Fig. 2-1).

Le 29% localisé à la région occidentale représente une superficie équivalente à 1.203.326 ha avec un taux de couverture de 18.02% qui est relativement insuffisant au taux mondial admis qui est de 25%.

Le couvert forestier de la région occidentale (Fig. 2-2) est relativement moins dense que celui à l'Est et au Centre. Il est caractérisé par des forêts proprement dites d'une hétérogénéité spatiale déterminée par plusieurs facteurs environnementaux tels que le relief, la géologie et la géomorphologie, le climat etc....

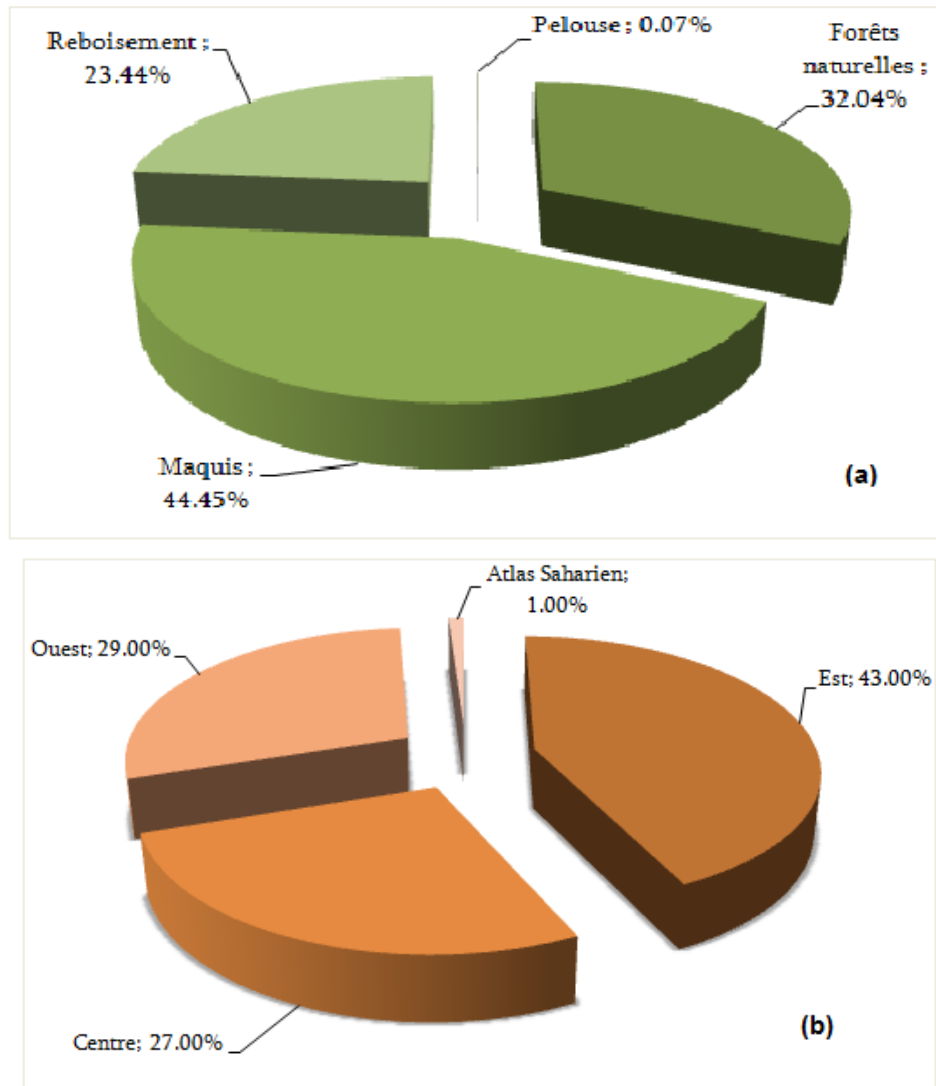


Figure 2-1: Répartition des surfaces forestières par (a) type et par (b) région.

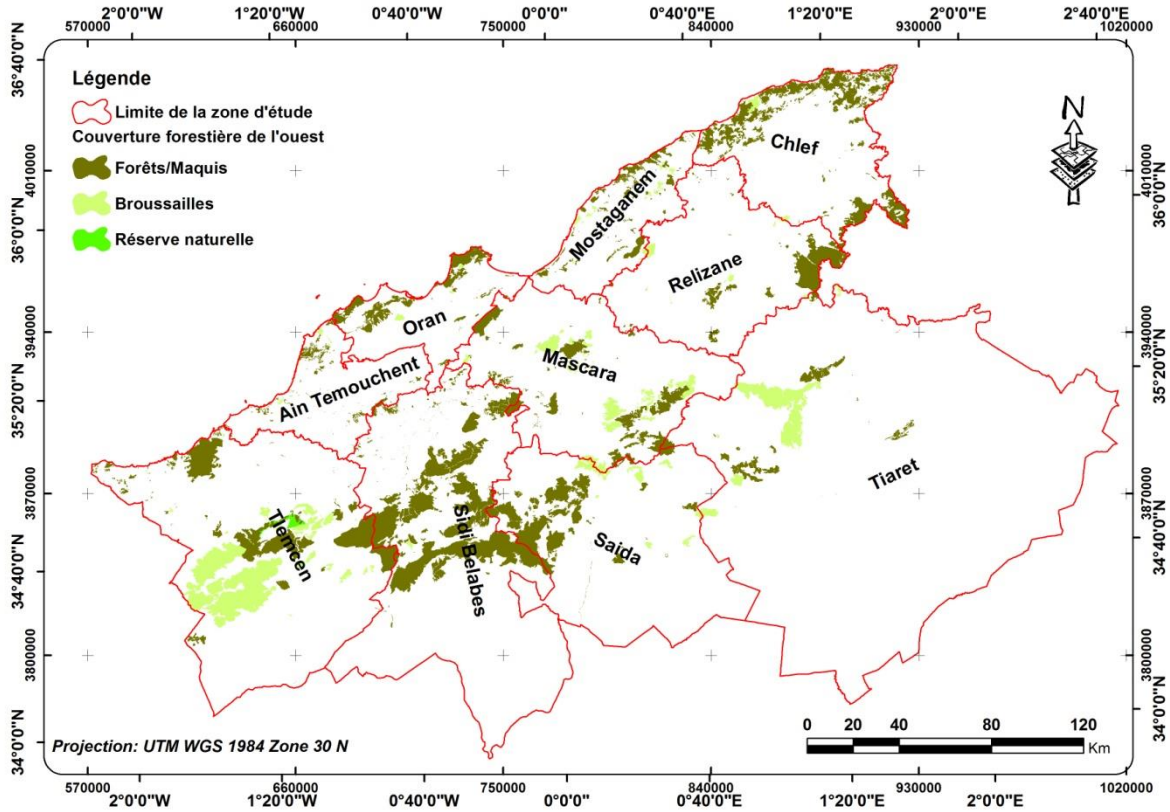


Figure 2-2: La carte de la couverture forestière de l'ouest algérien

A l'échelle du territoire occidental, la couverture forestière est très hétérogène et elle est caractérisée par la dominance de forêts mixtes avec des maquis qui résultent de la dégradation de la forêt sous l'action des activités humaines d'une manière directe ou indirecte en particulier les incendies et le défrichage.

Tableau 2-1: Surface et taux de la couverture forestière par wilaya

Wilaya	Surface forestière (Km ²)	Superficie (Km ²)	Taux de couverture forestière (%)
Ain Témouchent	251.21	2382.90	10.54
Chlef	1898.36	4089.10	46.42
Mascara	1398.66	5680.86	24.62
Mostaganem	558.71	2212.39	25.25
Oran	728.23	2126.12	34.25
Relizane	855.42	4882.51	17.52
Saida	1516.99	6769.99	22.41
Sidi Bel Abbès	3725.48	9383.99	39.70
Tiaret	941.71	20182.30	4.67
Tlemcen	3035.14	9059.20	33.50

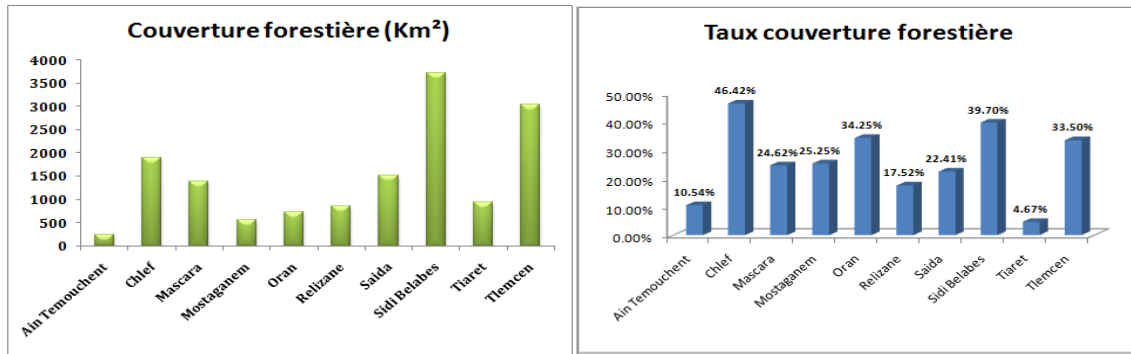


Figure 2-3: Surface et taux de la couverture forestière par wilaya

D'après la figure ci-dessus, l'analyse de la superficie de la couverture forestière montre que les wilayas de Sidi Bel Abbas et Tlemcen sont les plus couvertes avec une aire de 3725.48 et 3035.14 Km² respectivement. Les wilayas de Chlef, Saïda et Mascara sont en deuxième position avec plus de 1300 Km² suivies par les wilayas de Tiaret, Relizane, Oran et Mostaganem avec une couverture moins de 940 Km². La wilaya de Ain Témouchent est la moins couverte suite à une superficie forestière de l'ordre de 250 Km² (Tab. 2-1).

Le taux de la couverture forestière par wilaya ne reflète pas le patrimoine forestier suite à l'inégalité de la superficie de chacune d'elles. En fait, Sidi bel Abbas qui est la plus couverte à un taux de couverture inférieur à celui de Chlef en première position avec plus de 46% par opposition à 39.7% pour Sidi Bel Abbas. Oran et Tlemcen sont caractérisées par un taux plus au moins important de l'ordre de 33.5%. Un taux intermédiaire caractérise les wilayas de Mostaganem, Mascara, Saïda et Relizane. Ain Témouchent et Tiaret ont les taux de couverture les plus faibles avec respectivement 10.54% et 4.67%.

Cette hétérogénéité peut être expliquée par les facteurs déterminants de la formation des écosystèmes forestiers et l'effet des facteurs de dégradation.

L'essence prédominante en premier lieu en ce patrimoine forestier est le pin d'Alep suivi par le Chêne Vert et les Eucalyptus (Fig. 2-4). Ces essences constituent le premier groupe de forêts naturelles et autres artificielles. En second lieu, le thuya et le genévrier constituent les espèces de deuxième rang de dominance et elles sont pour rôle protectrice généralement (DGF, 2000).

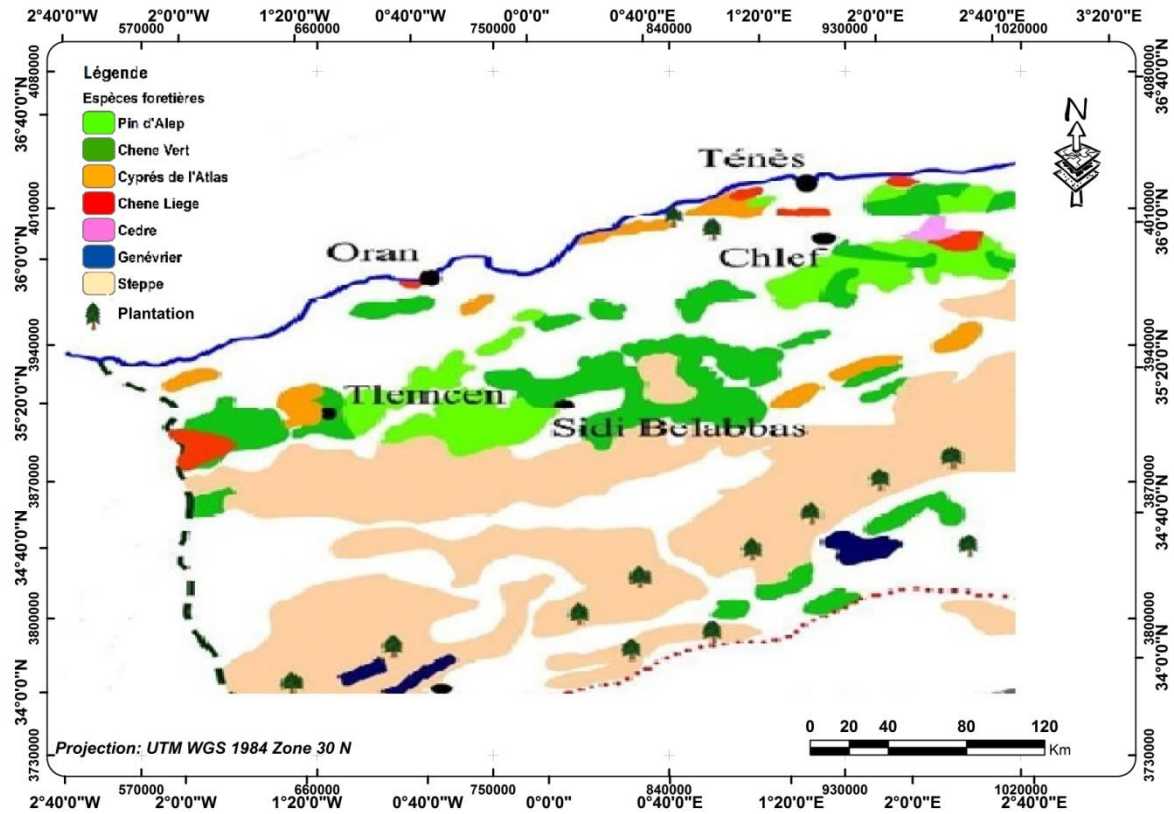


Figure 2-4: Les espèces forestières de l'ouest algérien (DGF, 2018)

3. Ressources en eaux

La zone ouest de l'Algérie fait partie de la région hydrographique Oranie-Chott Chergui qui regroupe en entier les bassins versants de la Macta, la Tafna et le Côtiers Oranais, et en partie les bassins versant des Hauts plateaux oranais, le Cheliff et Côtiers Algérois (Fig. 2-5).

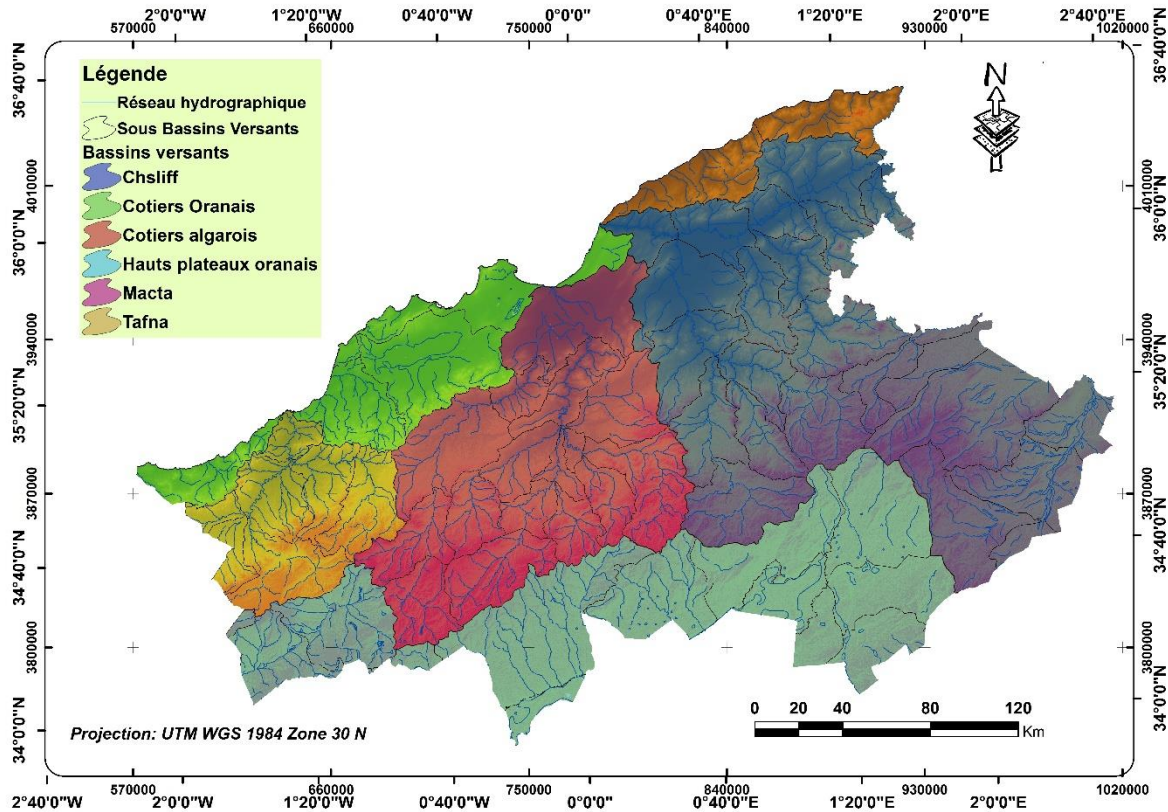


Figure 2-5: Les bassins versant englobant l'ouest algérien

Tableau 2-2: Les caractéristiques des bassins versant et les principaux cours d'eaux de l'ouest algérien

Bassin versant	Superficie	Principaux oueds	Occupation
Les Côtiers Oranais	5 831 Km ²	Oued El Malah La grande Sebkhha d'Oran	Totale
Macta	14 389 Km ²	Oued El Hammam, Oued Mekkera	Totale
Tafna	7 245 Km ²	Oued Tafna	Totale
Chôtt Chergui	49 704 Km ²	Oued El Hamel Oued Sidi Nasser	Partielle
Les Côtiers Algérois	8076 Km ²	Oued El Hachem, Oued Nador,	Partielle
Chélif	43750 Km ²	Oued Chlef	Partielle

Les différentes ressources en eaux de la région occidentale de l'Algérie peuvent être classées en :

- ✓ Ressources en eaux conventionnelles représentées par
 - Des ressources superficielles (Fig. 2-6) particulièrement les :
 - Barrages

- Zones humides
- Cours d'eau
- Ressources en eaux souterraines représentées par les différentes nappes et aquifères.
- ✓ Ressources en eaux non-conventionnelles

3.1. Ressources en eaux superficielles

3.1.1. Les barrages

En Algérie occidentale, l'inégale répartition spatio-temporelle des ressources en eaux a impliqué l'état à la construction de grands ouvrages hydrauliques pour stocker les apports et approvisionner l'eau aux différentes régions et contribué à l'irrigation de grandes superficies de terres agricoles.

Les barrages existants dans les régions hydrologiques de l'ouest algérien sont d'un intérêt très important. Ils regroupent un nombre total de 25 barrages répartis sur les dix wilayas. Le tableau 2-3 présente les caractéristiques de ces ouvrages hydrauliques.

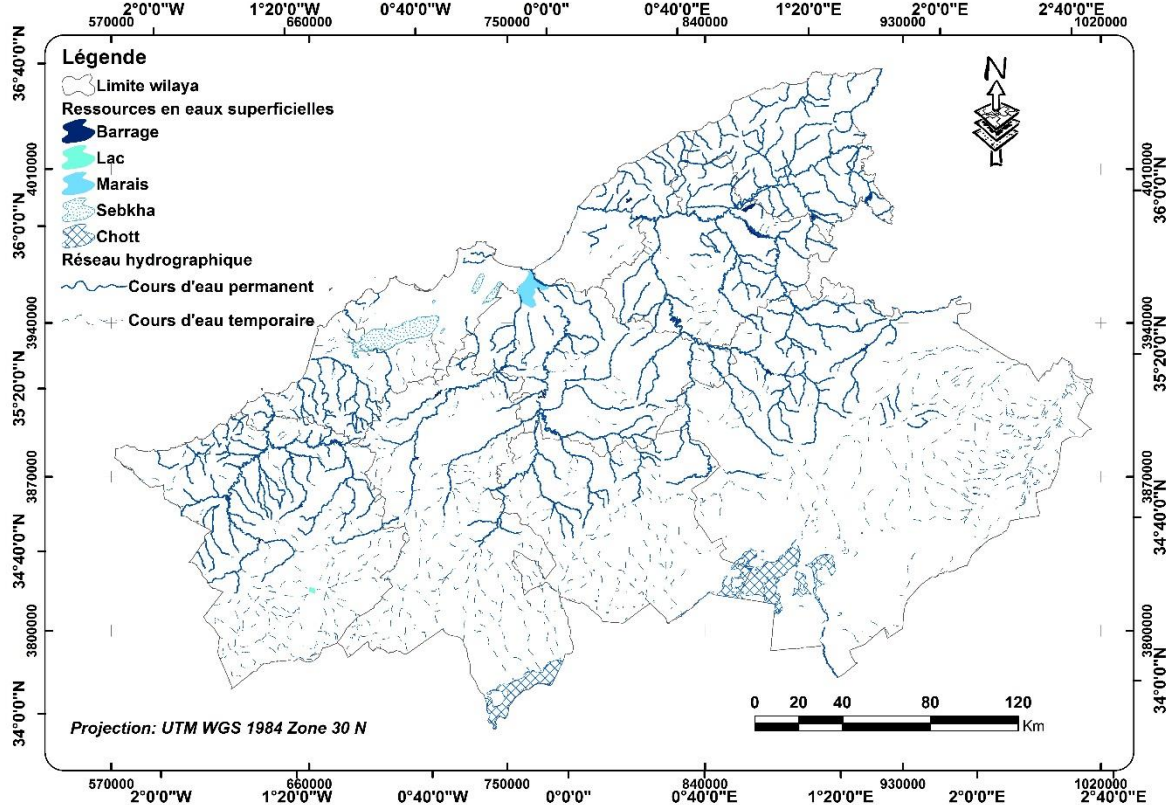


Figure 2-6: Carte des ressources en eaux superficielles de la région occidentale

Tableau 2-3: Liste des barrages de l'ouest algérien par wilaya (ANBT, 2010)

Wilaya	Barrage	Principal cours d'eau	Mise en Service	Capacité (10 ⁶ m ³)	Irrigation	Eau potable
Chlef	Oued Fodda	Fodda	1932	228	x	
	Sidi Yakoub	Sly	1983	280	x	
Mascara	Cheurfas	Mekerra	1935	14	x	
	Bou Hanifia	El Hammam	1948	73	x	x
	Fergoug	El Hammam	1970	18	x	x
	Ouizert	Sahouat	1985	100	x	x
	Cheurfas II	Mebtouh	1992	82	x	
	That	El Abtal	Incomplet	7		
Mostaganem	Kramis	Oued Kramis	2005	45	x	
	Cheliff	Cheliff (El Kheir)	2009	50		
	Kerrada	Kerrada	2011	50		
Relizane	S.M.B. Aouda	Mina	1978	235	x	x
	Merdja Sidi Abed	Chlef	1984	54.9	x	
	Gargar	Rhiou	1988	450	x	
Tiaret	Bakhadda	Mina	1935	56	x	x
	Dahmouni	Nahr Ouassel	1987	41	x	
	Colonel Bougara	Nahr Ouassel	1988	13	x	
Tlemcen	Beni Bahdel	Tafna	1946	63	x	x
	Meffrouch	Meffrouch	1962	15	x	x
	Souani	-	1988	13.5	x	
	Sidi Abdelli	Isser	1988	110	x	x
	H Boughrara	Tafna	1999	177		
	Sikkak	Sikkak	2004	25		
Sidi Bel Abbas	Sarno	Sarno	1953	22	x	

La plupart des barrages de la région ouest servent pour l'irrigation et de l'eau potable sauf quelques ouvrages pour contrôler les flux des cours d'eaux.

D'après les levés bathymétriques établis par l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (ANBT), les barrages de l'ouest algérien sont les plus menacés par le phénomène d'envasement. A l'exception du barrage de Fergoug qui est presque complètement envasé, plusieurs barrages sont en état critique avec un taux de plus de 34% (Tab. 2-4). Cette situation a fortement affecté la capacité de stockage et la qualité des eaux de ces réservoirs. Par ailleurs, le rejet de la vase dans les cours d'eau pose d'énormes problèmes écologiques et environnementaux (Serbah, 2018).

Tableau 2-4: Taux d'envasement des barrages de l'ouest algérien (ANBT, 2005)

Barrages	Année de mise en eau	Capacité initiale 10 ⁶ m ³	Capacité (dernier levé) 10 ⁶ m ³	Taux d'envasement (%)
Bakhadda	1936	56	39.94	28.68
Beni bahadel	1946	63	54.63	13.29
Bouhanifia	1940	73	38.11	47.79
Cheurfas II	1992	82	70.21	14.38
C.Bougara	1989	13	11,32	/
Dahmouni	1987	41	39,52	3,46
Fergoug	1970	18	0.4	97.78
H.Bouhrara	1999	177	175.5	9.7
Gargar	1988	450	358.28	20.38
Kerrada	/	69.5	/	/
Kramis	2005	45,4	41,368	8,84
Meffrouch	1963	15	14.99	0.07
Merdja.S.abed	1984	54.4	47.97	11.82
Oued El Fodda	1932	228	102.85	54.89
Ouizert	1986	100	93.91	6.09
Sarno	1954	22	21,25	3,41
Sekkak	2004	27	/	/
Sidi abdelli	1988	110	106.61	3.08
Sidi yakoub	1985	280	252.85	9.7
S.M.B.A	1977	235	153.71	34.59

En plus des barrages exploités dans la région ouest, des grands projets de transfert d'eau ont été réalisés particulièrement le projet de transfert Mostaganem-Arzew-Oran (MAO). Ce projet a permis l'approvisionnement de la région oranaise avec le système de transfert M.A.O (Mostaganem – Arzew – Oran) (Fig. 2-7).

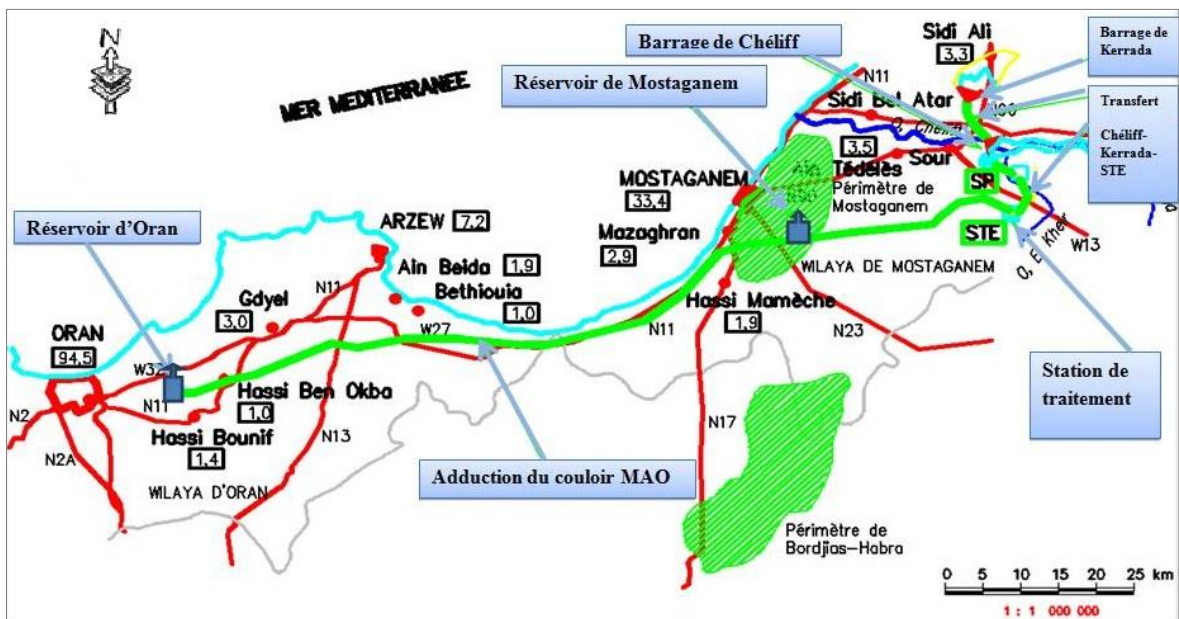


Figure 2-7: Système de transfert Mostaganem-Arzew-Oran

L'aménagement du système de production d'eau Cheliff-Kerrada assurera l'approvisionnement du couloir « Mostaganem - Arzew - Oran » pour un volume de 155 Hm³/an, réparti en 45 Hm³/an pour la wilaya de Mostaganem et 110 Hm³/an pour la wilaya d'Oran (Elmeddahi, 2016).

3.1.2. Les zones humides

Le territoire de l'ouest de l'Algérie abrite de nombreux sites d'importance écologique dont quelques-uns sont classés sur la liste des zones humides d'importance internationale de la Convention de Ramsar (Sites Ramsar). Ces zones humides subissent malheureusement des menaces excessives par les activités humaines.

Les zones humides de la région correspondent à des réserves en eaux sous forme :

- *Des marrais*
- *Des sebkhas et salines*
- *Des lacs*

Les sites inscrits dans la cadre de la convention RAMSAR à une importance internationale sont dans le nombre de 8 réparties selon le tableau 2-5.

En plus des zones humides inscrites dans la liste Ramsar, plusieurs autres sites sont non classés mais d'une importance écologique et économique à signaler tels que :

- Le lac de Sidi Mhammed Benali
- La sebkha de Dhayet Oum Ghellaz
- La sebkha de Dhayet Morsli

Tableau 2-5: Les zones humides à importance international Ramsar

Site	Wilaya	Type	Date de classement	Superficie (ha)	Intérêts
Marais de la Macta	Mascara, Oran	Marrais	02-02-2001	44500	Ecologie
Les salines d'Arzew	Oran	Lac salé	12-12-2004	5778	Ecologie, Economie
Lac de Télamine	Oran	Lac saumâtre	12-12-2004	2399	Ecologie
Grande Sebkhâ d'Oran	Oran, Ain Témouchent	Sebkhâ	02-02-2001	56870	Ecologie
Ile de Rachgoun	Ain Témouchent	Ile	05-06-2011	66	Ecologie, Tourisme
Grotte Karstique de Ghar Boumâaza	Tlemcen	Grotte	06-04-2003	20000	Ecologie, Tourisme
Dayet el Ferd	Tlemcen	Lac saumâtre	12-12-2004	3323	Ecologie, Tourisme
Chott ech Chergui	Saida	Lac salé	02-02-2001	855500	Ecologie

3.1.3. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est lié en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux qui affectent une région au cours des temps géologiques (Bouanani, 2004). Sa formation est fortement conditionnée par les facteurs caractéristiques des terrains traversés par les différents oueds (Hamlat, 2014).

Le réseau hydrographique de la région occidentale est constitué par un chevelu dense représenté en majorité de cours d'eaux temporaires. Il résulte de conséquence d'une lithologie à forte fraction argileuse des terrains constituant les bassins versants (ANRH, 1993).

Les débits des cours d'eau de la partie occidentale est caractérisé par des variations saisonnières tributaires des conditions climatiques, la lithologie et l'équipement des bassins en ouvrages hydrauliques (Hamlat, 2014). Avec un régime pluvial émanant du climat méditerranéen, le maximum des débits est enregistré pendant les saisons de l'hiver et du printemps, et le minimum s'étend sur quatre à cinq mois pendant la période estivale et le début de l'automne.

Les principaux cours d'eaux de la région occidentales sont :

- **Oued El Hammam** : se forme dans la vallée des Trois Rivières par la rencontre de l'oued Melrir à l'ouest, l'Oued Hounet au centre et l'Oued Sahouet à l'est (grossi de l'Oued Taria et de l'Oued Saïda). L'oued principal a une pente moyenne de $5,7 \text{ m.km}^{-1}$.
- **Oued Tafna** : est un cours exoréique située dans l'extrême nord-ouest et prend sa source au Djebel Merchiche, dans les Monts de Tlemcen. Il traverse les wilayas de Tlemcen et d'Ain Témouchent avant de se jeter dans la Méditerranée. Son bassin hydrographique a une superficie de $7,250 \text{ km}^2$ et alimente cinq barrages : Beni Bahdel, El-Meffrouch, Sidi Abdelli, Hammam Boughrara et Sikkak (Dahmani et al., 2003). Il possède les sous-affluents de l'Oued Khémis, l'Oued Bou Kiou, l'Oued Dahman, l'Oued Zitoun, la Sikkak, la Mouilha, l'Oued Bou Khallouf, l'Oued Tellout et l'Oued Isser.
- **Oued Mekerra** : est un cours d'eau qui coule du sud vers le nord et traverse les villes de Sidi Bel Abbès et Sig d'environ 240 km et prend sa source dans les hauts plateaux au sud des monts de Dhaïa. Il forme avec oued Sarno Oued Mebtouh qui draine le barrage de Cherfa II qui se perd dans les marais de la Macta avant de rejoindre la mer à proximité du point de jonction des wilayas d'Oran, Mascara et Mostaganem.
- **Oued el Mellah** : c'est un fleuve salé qui prend source dans les monts de Tessala et se jette en Méditerranée sur la plage de Terga.

– **Oued Chélif** : c'est le plus important cours d'eau dans la partie occidentale de l'Algérie. Avec une longueur de 733 Km, il prend sa source dans l'Atlas saharien et a son embouchure dans la Mer Méditerranée à l'est de Mostaganem. Il y est traversé par deux importants barrages : Oued Fodda et Sidi Yakoub. Il possède les principaux affluents sur ses deux rives : Oued Dourdeur, Oued Rouina, Oued Fodda, Oued Sly, Oued Ouaran et Oued Dahmous.

Le réseau hydrographique de l'ouest algérien est soumis à une forte cadence de pollution suite aux rejets domestiques industriels non traités et parfois même toxiques générés par une forte pression d'urbanisation et une activité industrielle très développée (MRE, 2006). En plus, la plupart des oueds sont des collecteurs des eaux usées qui ont mené à une dégradation de la qualité physique et bactériologique des eaux.

3.2. Les eaux souterraines

L'Algérie se place parmi les pays pauvres en matière de potentialités hydriques avec une forte disparité entre l'Est et l'Ouest. Les régions de l'Ouest algérien souffrent d'aridité, la partie Est du pays est caractérisée par un climat plus humide du fait du contexte montagneux : il s'y écoule des oueds dont les apports sont supérieurs à $1000.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ (Remini, 2010).

Une forte pression est exercée sur les potentialités des ressources hydriques grâce à la demande excessive pour l'approvisionnement de l'eau potable, l'industrie et l'irrigation qui ne cesse d'augmenter sans satisfaction. Depuis plus de décennie, le recours à l'exploitation des eaux souterraines devient une préoccupation de l'état algérien et demeure une alternative pour combler le manque.

Les potentialités en eaux souterraines de la partie occidentale de l'Algérie sont estimées à :

- 326 Hm³ dans l'Oranie Chott Chergui en année moyenne et 91 Hm³ pour une année sèche.
- 265 Hm³ dans le bassin Chellif Zahrez.

Quarante-trois unités hydrogéologiques ont été recensées dans la région, dont les principales sont illustrées en annexe 1.

Le tableau 2-6 présente les caractéristiques de quelques nappes de la région ouest.

Tableau 2-6: les caractéristiques de quelques nappes aquifères de l'ouest algérien

Nom de l'unité hydrogéologique	Superficie (km ²)	Ressources renouvelables utilisables (Hm ³ /an)	
		Année moyenne	Année sèche
Chott Hodna	7127	256,4	32,14
Plaine de Sidi Bel Abbes	1211	133	3,4
Plateau de Mostaganem	582	50,4	4,05
Plaine d'Ghriss nappe de Mascara	834	42,1	3,32
Chott Ech Chergui	17032	55	8,72
Plaine d'El Mader	1612	28,4	8,48
Bassin de Zahrez	3863	18,7	3,97
Plaine de Maghnia	231	18,2	1,21
Nappe karstique du Murdjajo	302	14,2	1,67
Plaine de M'leta	760	17	3,07
Monts de Tlemcen	2839	89	12,65
Plateau de Saida	2736	46	6,5
Valée de l'ouest Abd et Taht	2024	37,8	6,24
Chot Gharbi	14820	22	6,19
Plaine alluviale du bas Chellif	824	17,3	8,64
Plaine alluviale du moyen Chellif	215	16	4,78
Plaine alluviale du haut Chellif	459	16	8,83
Calcaire Djediouia-OuedFodda	220	12	2,6
Plaine de Ksar Chellala	446	10,2	0,86
Djebel Ben Hammade	109	0,6	0,05
Total nappes et quantifiées		1809	407,67

3.3. Les ressources en eaux non-conventionnelles

La mobilisation des ressources en eaux non conventionnelles repose sur les techniques de :

- Dessalement de l'eau de mer ;
- La réutilisation des eaux usées épurées.

3.3.1. Dessalement de l'eau de mer

En matière de mobilisation des ressources en eaux non conventionnelles et pour pallier au manque d'eau et faire face aux besoins grandissants de la population en eau potable, l'état s'oriente vers la mise en place de stations de dessalement de l'eau de mer. D'après le Ministère des Ressources en Eaux, ce programme stratégique est destiné à libérer le pays de la dépendance de la pluviométrie pour l'alimentation en eau potable des populations, et notamment dans l'ouest du pays qui souffre d'un grave déficit chronique en pluviométrie (ONS, 2012).

La stratégie nationale entreprise par l'état consiste en un large programme pour installer des usines de dessalement de petite et de grande taille. Plusieurs projets sont implantés dans la région ouest (Fig. 2-8), ce qui permet de réduire la pression sur les ressources souterraines.

Le bilan des ressources en eau non conventionnelles par dessalement d'eau de mer dans la région occidentale fait ressortir un potentiel de 516 hm³/an (ONS, 2015). Ce potentiel est mobilisé à travers six (06) grandes stations d'une capacité supérieure à 90 000 m³/j et neuf (05) petites unités de type monobloc. Les caractéristiques des différentes stations de dessalement sont présentées dans le tableau ci-après.

Tableau 2-7: Les principales stations de dessalement de l'eau de mer de la région ouest (ONS, 2015)

Wilaya	Nom station	Capacité (m ³ /j)	Capacité (Hm ³ /an)	Mise en service	Etat
Oran	Aïn El Turk	5000	1,825	2005	Opérationnelle
	Bousfert	5500	2,0075	2005	Opérationnelle
	Arzew (Kahrama)	90 000	32,85	2005	Opérationnelle
	Marsat El Hadjadj	500 000	182,5	2016	Opérationnelle
Tlemcen	Ghazaouet	2*2500	1,825	2003	En veille
	Souk Tleta	200 000	73	2011	Opérationnelle
	Honaine	200 000	73	2013	Opérationnelle
Mostaganem	Cheliff plage	200 000	73	2009	Opérationnelle
Aïn Temouchent	Chatt El Ward	5000	1,825	2006	En veille
	Bouzedjar	5000	1,825	2006	Opérationnelle
	Chatt El Hillal	200 000	73	2009	Opérationnelle
Chlef	Tenes	200 000	-	2015	Opérationnelle
	Mainis	5000	-	2014	Opérationnelle

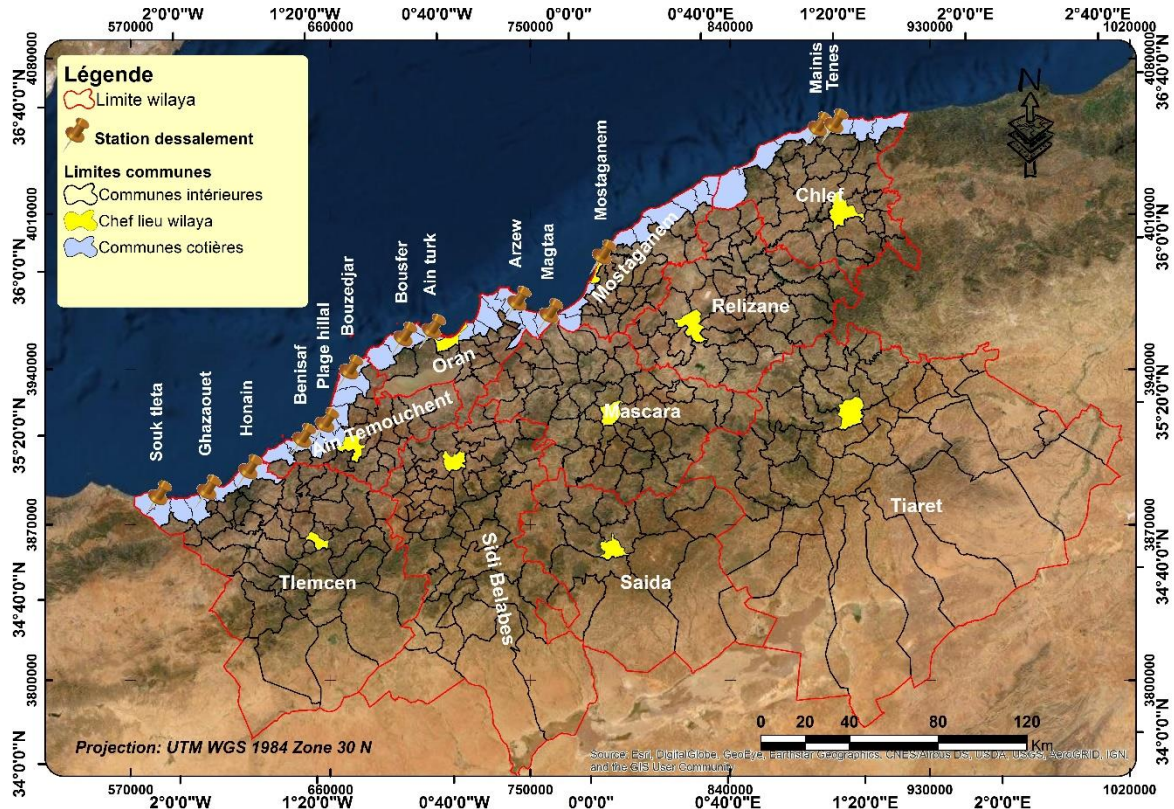


Figure 2-8: Localisation des stations de dessalement de la région ouest algérien

3.3.2. Epuration des eaux usées

Moins coûteuse, cette option repose sur les 750 Hm³ d'eau rejetés tous les ans ; récupérer 40% de ces rejets équivaldrait à produire l'équivalent de six (6) barrages d'une capacité de 60 Hm³ (Haouchine, 2012).

Il est à préciser que la mise en place de stations d'épuration des eaux usées (STEP) a pour finalité première la protection du milieu naturel et notamment les ressources en eau contre les effets nuisibles de la pollution générée par ces eaux usées. L'utilisation des eaux usées épurées comme ressource pour l'irrigation constitue un avantage certain, mais second par rapport à la finalité première des STEP.

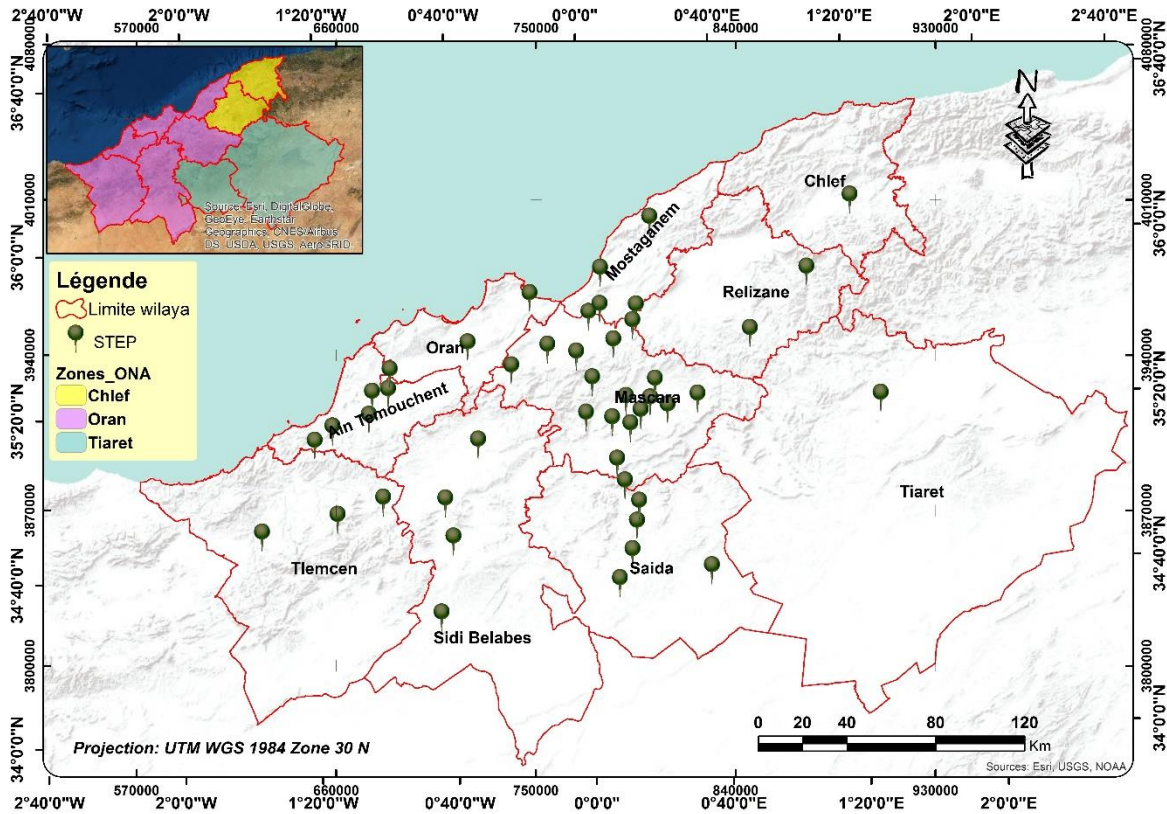


Figure 2-9: Zonage de l'ONA et les STEP des wilayas de l'ouest algérien

L'Office National de l'Assainissement (ONA) créé en 2001, établissement public national à caractère industriel et commercial (E.P.I.C), est la société chargée de la gestion, l'exploitation et de la maintenance des ouvrages et infrastructures d'assainissement. Il est placé sous la tutelle du ministère des ressources en eau (MRE).

Un nombre de 135 stations d'épuration ont été réalisées et 41 sont en cours de réalisation avec une capacité de traitement de 567 Hm³/an, dont une grande partie est exploitée dans l'agriculture. 176 stations d'épuration au total, formeront le parc des STEP à l'horizon 2030 (PNE, 2010).

La réutilisation des eaux usées épurées en irrigation concerne dans la plupart des cas des périmètres situés à proximité ou en aval des STEP. La majorité des projets de la Réutilisation des Eaux Usées Epurées (REUE) concerne des utilisations agricoles, soit par irrigation directe avec les eaux usées épurées à la sortie des STEP, soit par irrigation indirecte après dilution dans les oueds et les barrages.

Dans ce cadre, l'Office National de l'Irrigation et du Drainage (ONID) s'est lancé dans un vaste programme qui consiste à réutiliser les eaux usées épurées en aménageant des périmètres à l'aval de stations d'épuration et lagunes. Plusieurs périmètres, à titre expérimental, ont été commencés à savoir (Kessira, 2013) :

- Le périmètre de Hennaya (Tlemcen) sur 912 ha, qui est exploité depuis 2012 et alimenté à partir des eaux usées épurées de la STEP d'Ain El Hout de Tlemcen.
- Le périmètre de Mléta (Oran) sur 6286 ha, alimenté à partir de la STEP de Kerma, exploité pendant la campagne d'irrigation 2018.
- Les périmètres irrigués à Mascara alimenté : à partir de la STEP de Mascara sur une superficie projetée de 600 ha, à partir de la lagune de Ghriss sur une Superficie projetée de 150 ha et à partir de la lagune d'El Hachem sur une superficie projetée de 150 ha.



Figure 2-10: Les STEP et lagunes des sites pilotes pour l'irrigation avec les eaux usées épurées

L'utilisation de ces eaux usées épurées pour l'irrigation est conditionnée par :

- Traitements spécifiques des eaux répondant aux normes algériennes en la matière
- Application stricte des dispositions des cahiers des charges fixant :
 - Le choix des équipements d'irrigation à installer
 - Le respect du plan de culture prédéfini
 - La méthode d'irrigation à entreprendre
 - L'affichage obligatoire sur la non-potabilité de cette eau.

4. Ressources en sols

Les ressources en sols de la région occidentale de l'Algérie correspondent généralement aux terres agricoles situées dans les différentes plaines de la région et des terres de parcours.

4.1. Les plaines et terres agricoles

Le secteur agricole dans la région continue de jouer un rôle important dans l'économie occupant un nombre important de population active. La plupart des terres agricoles de la région occidentale se situent dans les grandes plaines que caractérisent ce territoire à savoir :

La plaine de Tlemcen : un bassin intérieur sublittoral limité au sud par les monts de Tlemcen. Il dispose d'un fort potentiel agricole et il est arrosé par la Tafna et ses affluents ainsi que par des grosses sources et comporte de nombreux vergers.

La plaine de Mekera : limité au nord par les monts du Tessala, elle est d'une grande plaine agricole de cultures maraîchères et céréalières.

La plaine de Ghriss : se caractérise par un climat semi-aride qui a connu une forte sécheresse entre 1994 et 2004. Elle est limitée au Nord, par les monts des Beni-Chougrane, au Sud, par les monts de Saïda, à l'Ouest, par les Monts de Bouhanifia et à l'Est par le plateau de Tighennif. La plaine est une région à vocation agricole et l'une des plus riches de la région du point de vue production.

La plaine de Mlata : Cette plaine s'étend sur près de 8.100 hectares répartis entre Oued Tlélat (3.833 hectares) et Tafraoui (4.267 hectares) est aussi réputée pour l'élevage ovin et bovin, la céréaliculture et l'arboriculture. Elle est désormais irriguée par les eaux traitées de la station d'épuration et de traitement des eaux usées. Le périmètre d'irrigation agricole par l'usage des eaux épurées est de l'ordre de 8.000 hectares inscrit dans le cadre d'un projet de développement agricole.

Tableau 2-8: Terres agricoles des wilayas de l'ouest campagne agricole 2015/16 (ONS, 2016)

<i>Wilaya</i>	<i>Cultures Herbacées</i>	<i>Terres au Repos</i>	<i>Prairies Naturelles</i>	<i>Vignes</i>	<i>Plantations Fruitières</i>	<i>Total S.A.U</i>	dont Terres Irriguées	<i>Terres Improd.</i>	<i>Pacages et Parcours</i>	<i>Total Général</i>
<i>Chlef</i>	119 809	63 748	3 545	1 269	14 860	203 230	23 424	33 567	25 714	262 511
<i>Tlemcen</i>	212 649	97 484	170	2 449	37 989	350 741	28 700	33 025	153 964	537 730
<i>Tiaret</i>	388 591	293 449	50	1 028	24 517	707 635	34 786	26 950	393 380	1 127 965
<i>Saida</i>	115 854	185 386	0	57	6 909	308 206	21 031	43 479	159 664	511 349
<i>Sidi Bel Abbes</i>	192 667	151 171	0	4 037	15 095	362 970	8 966	19 636	3 723	386 329
<i>Mostaganem</i>	101 470	990	0	10 696	19 105	132 261	34 980	0	12 510	144 771
<i>Mascara</i>	200 031	82 066	0	6 703	23 988	312 787	49 000	17 054	104 292	434 133
<i>Oran</i>	64 894	11 469	0	747	10 672	87 782	7 601	6 507	1 823	96 113
<i>Ain Temouchent</i>	137 856	18 604	0	12 656	11 067	180 183	8 820	15 296	8 104	203 583
<i>Relizane</i>	184 177	72 282	3 849	2 188	20 524	283 020	29 186	9 450	6 062	298 532
<i>Total</i>	1 717 998	976 649	7 614	41 830	184 726	2 928 815	246 494	204 964	869 236	4 003 016

La plaine de la Mina : ou Plaine de Relizane est une plaine agricole d'une superficie d'environ 340 Km² de culture Céréales, Maraichère et Arboriculture.

La quasi-totalité des exploitations du secteur productif agricole est aujourd'hui à gestion privée, malgré la diversité des formes de propriété (FAO, 2015). Au cours des dernières années, les productions ayant eu la plus forte croissance sont celles aux valeurs ajoutées les plus élevées : Céréales, Fruits et Maraîchage.

4.2. Les périmètres irrigués

L'usage de l'irrigation en Algérie est très ancien et des techniques d'irrigation séculaires fonctionnent encore à ce jour. Ces différentes techniques sont adaptées à un potentiel d'une grande diversité (plaines côtières, piémonts, hautes plaines, steppes...) (Messahel et al., 2005). La réalisation des grands périmètres algériens actuels a commencé durant la période coloniale.

Les 246494 ha irrigués dans l'Algérie occidentale (soit 8,43% de la SAU) se répartissent en deux ensembles (Fig. 2-11) : Les grands périmètres d'irrigation (GPI) gérés par les offices régionaux ou de wilaya et les irrigations de petite et moyenne hydraulique (PMH) gérées directement par les agriculteurs.

4.2.1. Les grands périmètres d'irrigation (GPI)

Les grands périmètres d'irrigation existants sont au nombre de sept (07) et totalisent une superficie équipée de l'ordre de 89650 ha (Tab. 2-9).

Les périmètres d'irrigation peuvent être classés en deux (02) catégories :

- ✓ Les périmètres anciens hérités de la colonisation avec une irrigation traditionnelle gravitaire (canaux et séguias) ;
- ✓ Les périmètres récents : réalisés après l'indépendance où domine une technique moderne d'irrigation.

Selon Mouhouche et Guemraoui (2004), après une quinzaine d'années, le constat de fonctionnement est très alarmant où la majorité des offices sont en déficit chronique pour de nombreuses raisons notamment :

- La vétusté des réseaux qui entraîne des pertes d'eau importante ;
- La tarification relativement élevée de l'eau agricole ;
- Les ressources en eau ont été réaffectées au détriment de l'irrigation ;
- L'encadrement insuffisant des établissements qui effectuent des travaux pour d'autres secteurs au détriment de la gestion, de l'exploitation et de la maintenance des périmètres qui leur sont en concession.

La sécheresse des trois dernières décennies qui a touché ces GPI a aggravé la situation certains sachant que les ressources ont été complètement mobilisé pour satisfaire les besoins en eau potable et industrielle. Ce qui explique en partie la faiblesse des superficies irriguées en GPI et a engendré une perte de confiance des irrigants envers leurs organes de gestion (Messahel et Benhafid, 2004).

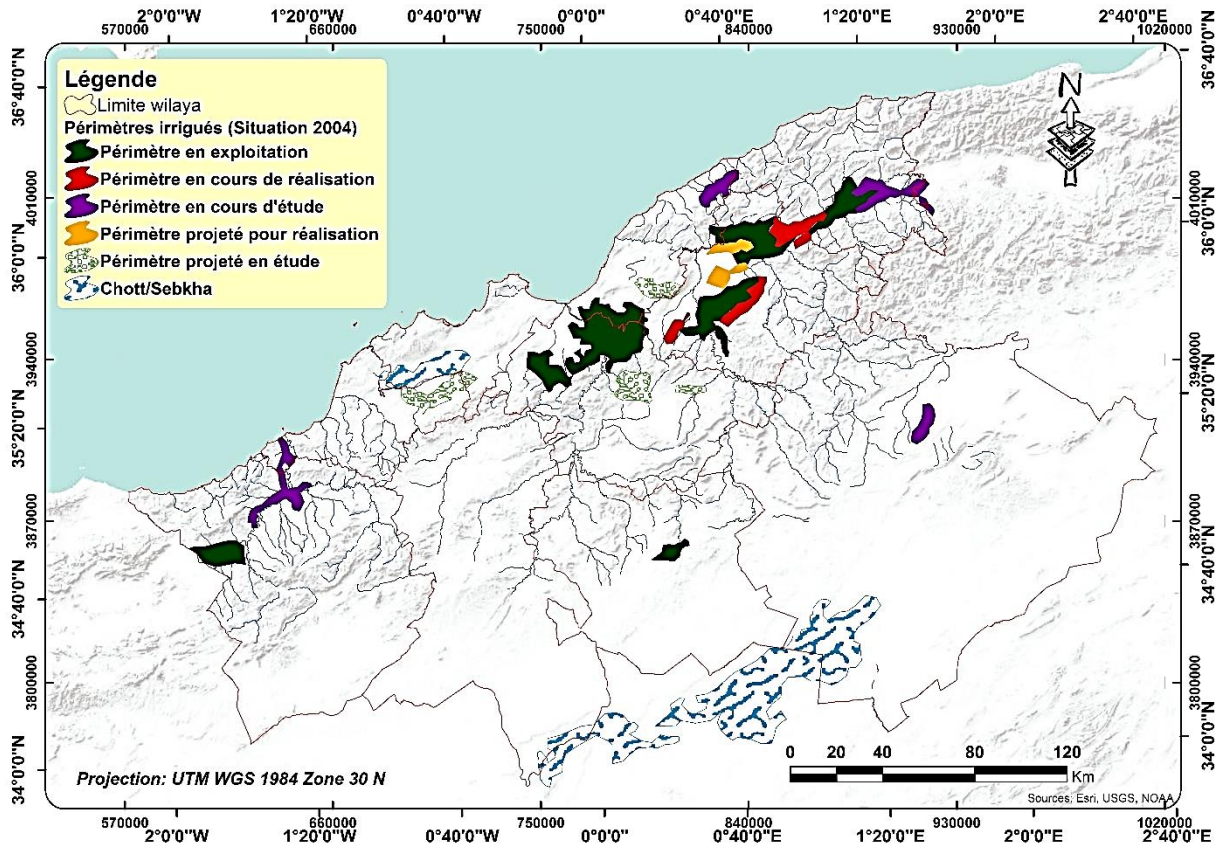


Figure 2-11: Les périmètres irrigués de l'ouest algérien (Source : AGID modifié)

4.2.2. Petite et Moyenne Hydraulique (PMH)

La grande majorité des superficies irriguées est gérée sous forme de Petite et Moyenne Hydraulique (PMH). Cette stratégie s'est développée avec une importante aide de l'état dans le cadre d'un fonds national de développement agricole.

D'après la campagne agricole 2015/2016, la superficie agricole utile de la PMH est de 2 928 815 ha alors que la superficie irriguée est de 104856 ha (Tab. 2-11).

Tableau 2-9: Les grands périmètres irrigués de l'ouest algérien

Périmètre	(Wilaya)	Date de création	Superficie équipée (ha)	Superficie irrigable (ha)	Mode irrigation
Moyen Cheliff	Chlef	1936	21.800	10.000	Gravitaire
Bas Cheliff	Relizane	1937	22.500	5.000	Gravitaire
Habra	Mascara	1942	19.600	6.500	Gravitaire
Mina	Relizane	1943	9.600	5.000	Gravitaire
Sig	Mascara	1946	8.200	4.500	Gravitaire
Maghnia	Tlemcen	1974	5.100	4.000	Sous pression
Ain -Skhouna	Saida	1974	2.850	2.000	Sous pression
Total			89.650	37.000	

Ces PMH assurent une grande partie des productions agricoles en système irrigué. Des ressources en eaux de nature différentes ont été mobilisées pour satisfaire la demande en eau de ces périmètres (Tab. 2-10). En fait, le système d'irrigation le plus utilisé s'appuie dans la plupart du temps sur des pompes individuelles pour relever l'eau à partir des forages ou des puits pour alimenter des systèmes d'aspersion ou d'irrigation localisée. On peut constater aussi que les systèmes d'irrigation gravitaire est le plus pratiqué (2.4% des terres irriguées en PMH), quant aux systèmes par aspersion et localisé par goutte à goutte est moins exploité (0.68% et 0.42% respectivement).

La majorité des investissements en PMH ont toujours été gérés localement par des associations, des syndicats ou des coopératives d'irrigation. L'initiative privée a été dominante et les irrigants directement concernés.

Tableau 2-10: Superficies irriguées en PMH par nature de la ressource en eau (2003)

WILAYA	Superficie irriguée par nature de la ressource												
	P.Barrage		Retenue collinaire		Forages			Puits		au fils de l'eau		Sources	
	Nbr	Sup	Nbr	Super	Nbr	Fo. Pub	Super	Nbr	Super	Nbr	Super	Nbr	Super
Chlef			4	18	1808		9050	1254	3406	147	2245	26	50
Tlemcen	7	312	14	73	1106		5931	1981	4694		7539		
Tiaret			2	405	1173		2767	1733	11066	421	697	331	31
Saida	0	0	2	100	345	7	1825	252	300	4	750	0	0
Sidi Bel Abbes	0	0	0	0	95		682	1422	3951	3	163	30	53
Mostaganem	1	40	5	84	6		98	8420	20346				932
Mascara					535	9	3210	2398	4796				
Oran	0	0	0	0	18		180	1897	5116			9	30
Ain Témouchent	2	274	5	78	84	2	478	758	1816		928		46
Relizane					115		1884	2015	7625	4	424	12	102

Tableau 2-11: Les superficies irriguées en PMH par types de systèmes d'irrigation (2003)

Wilaya	Superficie irriguée par système d'irrigation (ha)			
	Gravitaire	Aspersion	Goutte à goutte	Total
Chlef	9 181	4 951	637	14 769
Tlemcen	10 549	5 000	3 000	18 549
Tiaret	6 416	6 082	2 468	14 966
Saida	793	1 300	882	2 975
Sidi Bel Abbes	3 140	450	1 520	5 110
Mostaganem	18 339	1 380	1 781	21 500
Mascara	8 006			8 006
Oran	4 335	85	906	5 326
Ain Témouchent	2 606	336	678	3 620
Relizane	9 309	395	331	10 035

4.3. Les parcours

Les terrains de parcours dans la région ouest sont en deux catégories :

- Les terres de parcours situées dans la partie sub-littorale et tellienne d'un étendu plus moins modéré.
- Les parcours steppiques situés généralement dans les régions sud des wilayas de Tlemcen, Sidi Bel Abbes, Saida et Tiaret (Fig. 2-12) d'une importance économique surtout dans l'élevage des bovins et l'exploitation des ressources alfatières qui caractérise le territoire. Cette région pastorale ne s'échappe pas des facteurs de dégradation qui ne cessent de s'amplifier et qui ont causé une déstabilisation des activités des nomades de la région.

La zone steppique occupant toute la partie Sud de l'Algérie occidentale est représentée par de grandes étendues à vocation agropastorale. C'est une immense étendue parsemée de quelques dépressions telle que Dayet El Ferd (Tlemcen) et Chott Chergui et Gherbi (Saida) dans le domaine des terres pastorales et alfatières.

Le surpâturage et la sécheresse sont les deux menaces de dégradation de ces terres de parcours, des reboisements de protection sont initiés de plus en plus pour lutter contre le phénomène de désertification (Khemis, 2013).

La zone steppique qui caractérise les wilayas de l'ouest algérien représente 33.94% de la région occidentale (Tab. 2-12). La répartition spatiale montre que la wilaya de Tiaret possède plus de 55% des terres pastorales devant 16.17%, 15.25% et 13.31% pour les wilayas de Sidi Bel Abbes, Saida et Tlemcen respectivement (Fig. 2-13).

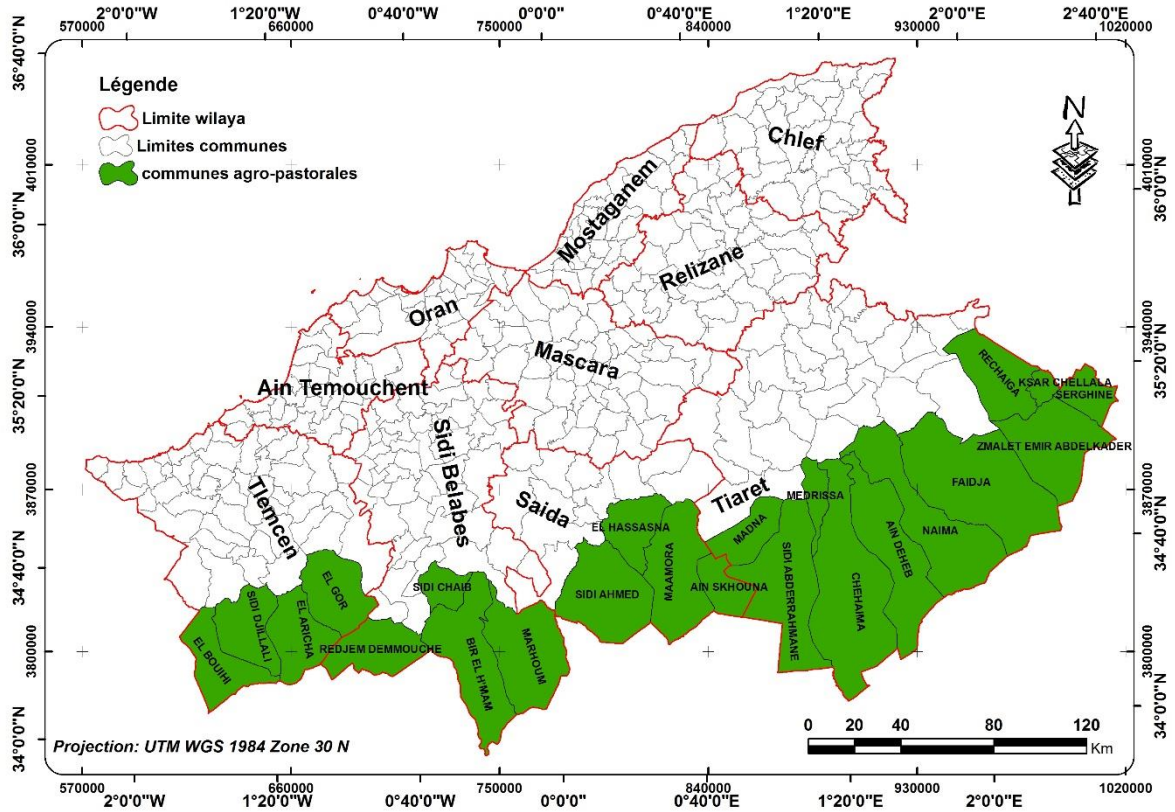


Figure 2-12: Les communes agro-pastorales des wilayas de l'ouest algérien

La dégradation de l'écosystème steppique, dans sa structure que dans son fonctionnement à travers sa productivité primaire, a été déclenchée depuis une trentaine d'année (Moulay, 2013). Cette dégradation est issue de :

- Facteurs naturels liés aux conditions du milieu physique en général ;
- Facteurs socio-économiques anthropiques qui favorisent une action souvent une intervention anarchique de l'homme sur l'écosystème.

Tableau 2-12: Les communes de la zone steppique de l'ouest algérien

Wilaya	Commune	Superficie (Km ²)	Total
Tlemcen	El Gor	803.72	3017.38
	Sidi Djillali	732.99	
	El Aricha	747.07	
	El Bouihi	733.59	
Sidi Bel Abbas	Sidi Chaib	299.60	3664.27
	Bir El H'mam	1347.03	
	Marhoum	1257.51	
	Redjem Demmouche	760.13	
Saida	El Hassasna	580.03	3461.32
	Maamora	1218.18	
	Sidi Ahmed	1257.96	
	Ain Skhouana	405.15	
Tiaret	Rechaiga	881.55	12519.01
	Serghine	368.38	
	Ksar Chellala	134.15	
	Zmalet Emir Abdelkader	1194.84	
	Faidja	2302.63	
	Naima	1612.61	
	Ain Deheb	1433.05	
	Medrissa	269.55	
	Chehaima	2228.11	
	Madna	516.40	
	Sidi Abderrahmane	1577.75	
Total			22661.97

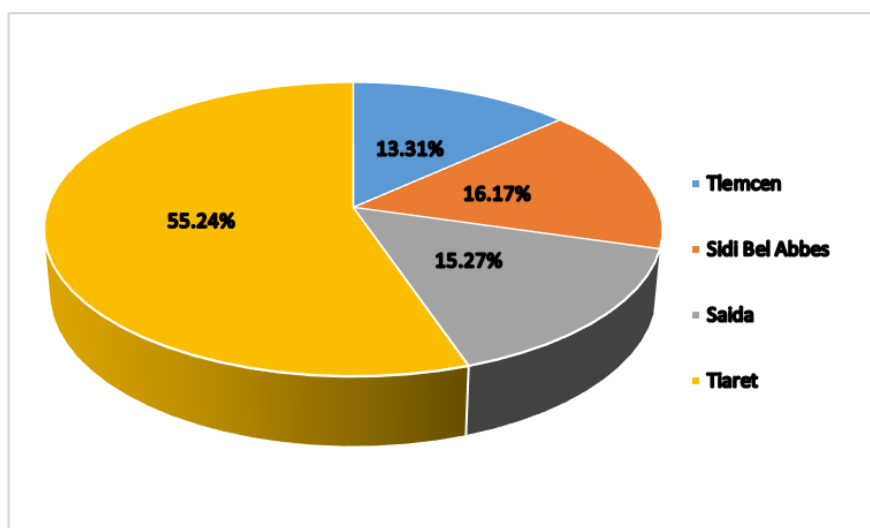


Figure 2-13: Répartition des terres pastorales dans les wilayas de l'ouest algérien



Figure 2-14 : Exemples de terrains de parcours steppiques

5. Conclusion

La région occidentale de l'Algérie constitue un patrimoine naturel très diversifié par sa richesse en ressources naturelles, son héritage culturel et social et son lieu de transition entre le nord et l'atlas Saharien. Cette diversité naturelle est sujette d'une dégradation depuis plusieurs décennies et la situation semble être poursuivre.

L'analyse et l'étude de cette situation, l'identification de ses causes et la recherche de solutions appropriées sont devenues une nécessité urgente. Cela ne va se passer sans une pré-connaissance des différents facteurs causant ce problème.

**Chapitre 3 : Facteurs Majeurs de
Dégradation des Ressources
Naturelles en Algérie Occidentale**

1. Introduction

La région occidentale de l'Algérie est caractérisée par une richesse en ressources naturelles forestières, aquatiques et en sols qui sont dans le souci grâce à divers facteurs qui causent une dégradation durable depuis plusieurs décennies. En plus de facteurs climatiques qui ne cessent d'aggraver la situation, l'expansion de la population et l'excès des activités humaines sur le prix de ces ressources ont les mis en situation critique à prendre en conscience par les autorités.

L'étude et la caractérisation des différents facteurs de dégradation semblent être le premier pas à devoir minimiser et anticiper les graves conséquences de cette destruction de nos ressources.

Dans ce qui suit, nous allons décrire les différents facteurs naturels qu'anthropiques qui sont en cause de dégradation de la diversité naturelle de la 'Algérie occidentale

2. Facteurs de dégradation

Les ressources naturelles de l'ouest de l'Algérie sont sujettes à plusieurs formes de dégradation tels que les pertes en sols, la destruction des forêts, la détérioration des ressources en eaux... Ces phénomènes de dégradation sont dus à plusieurs facteurs qu'on peut les classer en deux grandes catégories : naturels et humains ou anthropiques.

2.1 Facteurs naturels

Parmi les principales causes naturelles qui provoquent une destruction du patrimoine, il convient de citer : l'érosion hydrique, la salinité, les incendies de forêts et la sécheresse. Ces facteurs sont généralement d'origine due en grande partie aux effets du changement climatique (Baisse de pluviométrie, augmentation de température) y compris les conséquences des activités humaines.

2.1.1. *Erosion hydrique*

La fragilité des terres et le déclin du pouvoir protectrice des massif forestiers et végétative qui caractérisent le nord algérien en général et la partie ouest en particulier ont contribué nettement à favoriser sensiblement les ressources du plusieurs bassins versant à une dégradation massive causée par l'érosion hydrique.

A l'ouest algérien, les dispositions socioéconomiques et hydroclimatiques sont naturellement réunies pour intensifier et favoriser le déclenchement de ce phénomène

qui ne cesse de menacer potentiellement l'équilibre de l'environnement tant à l'échelle régionale que locale (Dekiche et al., 1997).

Selon Hallouz et al. (2018), la région occidentale est considérée comme la plus érodée avec 47% des terres qui sont affectées par l'érosion pour 26% de la région orientale, puis la zone centrale avec 27%.

Selon une étude de synthèse effectuée par Bouraba (2002), portée sur plus de 35 bassins versants du nord algérien, l'érosion spécifique varie annuellement de 307 à 5453 t/km² dans le bassin de Cheliff, 938 ton/km² dans le Côtiers Oranais et de 301 à 406 ton/km² dans la Tafna.

Les terrains à pâturages excessivement exploités, les zones forestières dénudées, les terres en jachère et les bassins versants comportant des ravines et des rigoles sont principalement les plus menacés.

D'après les chiffres établis par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT), le volume d'eau régularisé pour les barrages de la région ouest algérien est diminué de 1,99 milliards de m³ aux 1.61 milliards de m³ selon les levés bathymétriques effectués en 2003.

Des conséquences directes et indirectes sont à signaler :

- La diminution de la fertilité des sols et la perte de surface cultivable
- La distorsion de la forme des paysages
- La destruction des infrastructures de base tels les routes et les ponts
- L'envasement des barrages grâce au ruissellement et la sédimentation.

La diminution annuelle de la capacité de stockage des ouvrages hydrauliques de la région ouest a atteint une situation critique et continue jusqu'à ce jour. Plusieurs études ont montré l'état grave de plusieurs barrages de l'ouest et les mesures bathymétriques effectuées périodiquement justifient ce souci.

Achit et al. (2006) a signalé que l'envasement dépasse les 40% pour le barrage d'Oued Fodda (Chlef) et les barrages de Bouhanifia et Fergoug à Mascara.

Le tableau 3-2 montrent clairement la baisse de volume de stockage de plusieurs barrages en Algérie occidentale due au phénomène d'envasement.

Tableau 3-1: Erosion spécifique dans certains bassins de l'ouest algérien (Source : Tadrict et al., 2016)

Bassin versant (région)	Érosion spécifique des sols (t.km ⁻² .an ⁻¹)	Référence
Abd	136	Achite et al., 2007
Boukadir	446	Tadrict et al., 2016
La haute Tafna	1120	Megnounif et al., 2003
La Tafna	150	Sogreah, 1967
Mina	187	Achite et al., 2005
Mouilab	126	Terfous et al., 2001
Sebdou	1330	Ghenim et al., 2008
Sebdou	937	Bouanani, 2004
Sebdou	343	Megnounif et al., 2013
Sikkak	170	Bouanani, 2004

Tableau 3-2: Le taux d'envasement des barrages de l'ouest algérien (Source : Medjber, 2011)

Barrage	Envasement (Hm ³)	Période de calcul	Nombre année	Envasement moy annuel (Hm ³)
Foda	07.00	1953-1955	03	2.33
	28.00	1956-1974	18	1.55
	11.17	1975-1986	11	1.01
Bakhadda	3.94	1963-1967	04	0.98
	0.70	1968-1974	06	0.11
	0.22	1975-1986	11	0.02
Sarno	0.76	1955-1974	19	0.04
	0.41	1975-1986	11	0.037
Bouhanifia	9.5	1944-1953	09	1.05
	11.0	1954-1965	11	1.00
	0.5	1966-1967	01	0.50
Beni Bahdel	4.45	1944-1974	30	0.15
	0.07	1975-1986	11	0.006
Meffrouch	3.0	1940-1967	27	0.11
	0.4	1968-1986	18	0.02



Figure 3-1 : Différentes formes de l'érosion dans quelques bassins de l'ouest

Une carte de sensibilité des terres à l'érosion a été établie par l'Institut National des Sols, de l'Irrigation et Du Drainage (INSID) en 2006 pour le nord de l'Algérie (Voir Annexe 2). La carte découpe le nord algérien en trois zones : Ouest, Centre et Est et permet de représenter cartographiquement le degré de sensibilité des terrains à l'érosion, selon le niveau de stabilité et de résistance des roches au processus érosif. La carte a été élaborée selon les quatre classes suivantes :

- ✓ *Stable*
- ✓ *Moyennement stable*
- ✓ *Instable*
- ✓ *Très instable*

2.1.2. Salinité

Le phénomène de la salinité des sols est considéré comme l'une des causes de la dégradation des sols à l'ouest. Plusieurs plaines sont soumises à un taux de salinisation plus au moins élevé à savoir la plaine de Cheliff, la plaine de la Macta et les périmètres irrigués de Habra (W. Mascara) et de Skhouna (W. Saida).

En Algérie, aucune étude cartographique fiable et précise à une échelle régionale permettant de quantifier et évaluer pour la délimitation des zones affectées par la salinité des sols (INSID, 2008). Néanmoins, il faut signaler les travaux de Douaoui et Lepinard (2010) et Gherina et al. (2008) à l'échelle des zones fragmentées pour l'évaluation de degré de salinisation.



Figure 3-2 : Localisation des sols salins à l'ouest de l'Algérie (Source: INSID, 2008))

D'après la carte ci-dessus, le phénomène de la salinité est bien observé dans les plaines et vallées de la Mina, Cheliff, Habra-Sig et Maghnia ; et aux abords des Chotts et de Sebkhas tels que Chott Gharbi et la grande Sebkha d'Oran.

Le problème de la salinisation des sols peut être dû d'une part à la qualité de l'eau d'irrigation et à la remontée de la nappe phréatique salée d'autre part. La sécheresse latente qui a caractérisé la région occidentale de l'Algérie s'ajoute aux facteurs précédents.

Le tableau ci-dessous présente quelques chiffres sur le taux de salinisation des sols en quelques périmètres à l'ouest Algérien.

Tableau 3-3: Superficie de sols affectés par la salinité à l'ouest (Source : INSID, 2008)

Périmètres irrigués	Superficies irrigables	Superficies affectées	%
Haut Cheliff	20 200	6 400	32
Moyen Cheliff	21 800	8 700	40
Bas Cheliff	22 500	15 000	67
Mina	9 600	4 190	44
Habra	19 600	8 100	41
Sig	8 600	3 200	37

2.1.3. Les incendies de forêts

L'héritage forestier de l'ouest Algérien représentant 29 % de l'écosystème entier du territoire national (Khader et al., 2009) subit divers facteurs dévastateurs dont les incendies sont considérés les plus marquées. Les conditions climatiques du bassin méditerranéen et la composition du couvert forestier composé généralement de Pin d'Alep ont aggravé la situation.

Sur plus de 190000 ha de superficie forestière de l'ouest, 24725 ha ont été incendiée durant la période 2008-2017 (DGF, 2018) ce qui équivaut à un taux de 13%.

Chaque année, les différentes circonscriptions des forêts enregistrent plusieurs foyers de feux dont la cause est dans la plupart des cas due à l'activité humaine. Les chiffres présentés dans la figure 3-3 montre que les wilayas de Tlemcen, Chlef et Sidi Bel Abbes sont les plus touchées par les incendies en contrepartie les autres wilayas ont moins d'incendies.

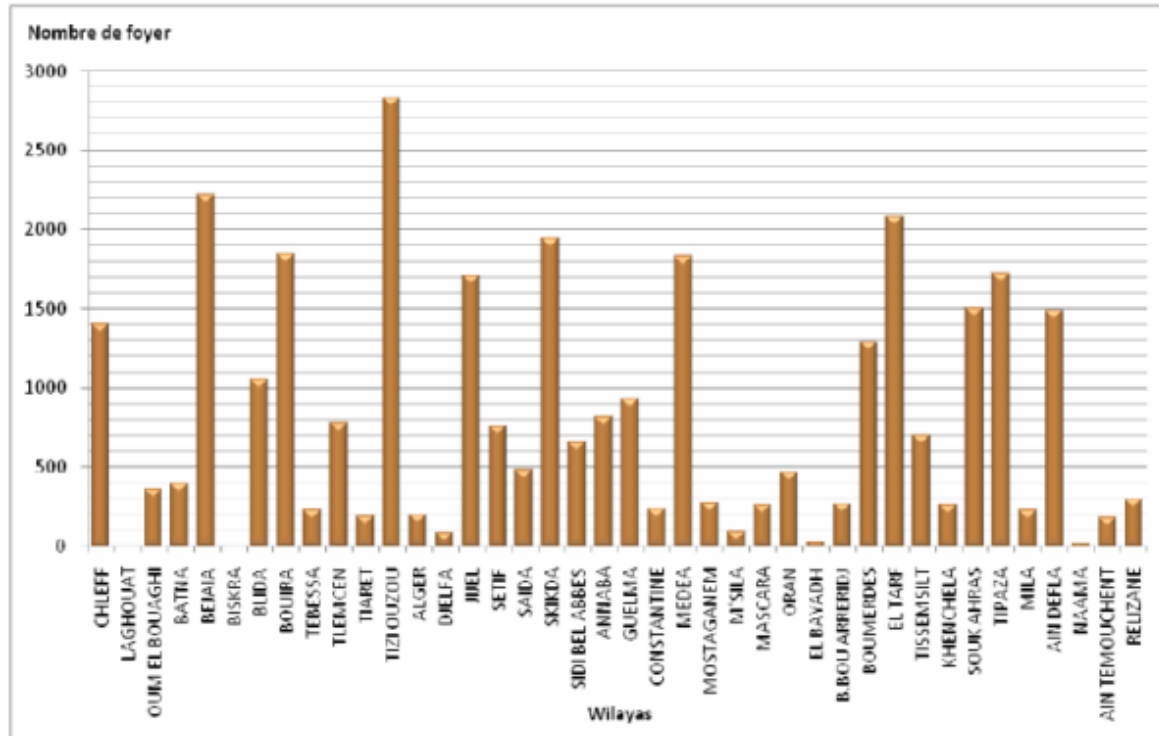


Figure 3-3 : Nombre des incendies par wilaya de 1956-2006 (Source: (Arfa, 2008) in (Chiali Charif, 2018))

Avec des conséquences graves sur les écosystèmes forestiers, les incendies peuvent :

- ✓ Menacer la vie et la santé humaine
- ✓ Détruire les biens tels que les habitations et les infrastructures
- ✓ Réduire la production forestière
- ✓ Réduire le rôle de protection des sols ce qui augmente le risque d'érosion
- ✓ Accroître le bilan foncier détenu pour les moyens de lutte et la régénération de la végétation

Devant cette situation, réfléchir à avoir des solutions dans les plus courts délais devient une nécessité pour les décideurs et les écologistes pour faire face à cette perte environnementale importante.

Plusieurs chercheurs ont mis l'accent sur le risque des incendies de forêts et ses lourdes conséquences à travers des travaux de recherche à l'échelle d'une forêt ou une zone d'une wilaya. Notons que la plupart de ces études restent sans valorisation et véritable incarnation sur le terrain.

Le tableau suivant illustre quelques travaux sur l'évaluation des incendies de forêts dans la zone occidentale.

Tableau 3-4: Quelques auteurs qui ont travaillé sur les incendies de forêts de l'ouest algérien

Auteur	Année	Forêt	Wilaya
Khader et al.	2009	Nesmoth	Mascara
Belghrebi et al.	2018	Guetarnia	Sidi Bel Abbas
Benguerai et al.	2019	Zelamta	Mascara
Chiali Charif	2018	Telagh	Sidi bel Abbas
Talbi et al.	2017	Dhoui Thabet	Saida

2.1.4. La sécheresse

La sécheresse est un phénomène naturel dû essentiellement à un déficit en eau pour une application spécifique, une période de temps définie et une région bien particulière (UICN, 2005 ; OMM, 2005), qui associé à d'autres facteurs climatiques peut provoquer une diminution du ruissellement des cours d'eau et de l'humidité des sols et un renouvellement insuffisant des aquifères (DGF, 2019). Les actions nuisibles des activités humaines sur l'environnement (déforestation, rejets des gaz toxiques, surexploitation des ressources en eaux et des sols, etc.) ont amplifié les répercussions négatives de ce phénomène.

Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental pour l'Evaluation du Climat) constate dans un rapport de synthèse publié en 2007 (IPCC, 2007) que les pays du Maghreb subissent une hausse des températures de 1 à 2°C à partir de 1970 ce qui est le double de la moyenne mondiale qui est de l'ordre de 0.74°C.

De plus, l'Algérie a enregistré une diminution de la disponibilité en eau théorique de 1500 m³ en 1962 à 430 m³ par habitant par an en 2020. Cette disponibilité est beaucoup moins inférieure au seuil de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par habitant par an (DGF, 2019).

Plusieurs études ont constaté que l'Algérie est exposé à une sécheresse intense et persistante depuis plus de 03 décennies (Meddi et Meddi, 2009; Ghenim et al., 2010 ; Meddi et Hubert, 2007) et caractérisée par un déficit pluviométrique évalué à 30 % (OSS, 2013). Les évènements de sécheresse les plus sévères sont ceux des deux dernières décennies caractérisées par un déficit pluviométrique de l'ordre de 12% et 13% pour les régions Centre et Est respectivement et de l'ordre de 20% pour la région Ouest (Medjreb et Henia, 2011).

La carte de déficit pluviométrique établie par l'ANRH en 2017 (Fig. 3-4) dans le cadre d'un projet d'expertise indique que les wilayas de la région ouest sont le plus déficitaires et confirme les observations ci-dessus. D'après Meddi et Meddi,

(2007), cette région occidentale a subi une diminution de la pluviométrie annuelle comprise entre 10 et 20%.

Cette situation avait une ampleur significativement néfaste sur les ressources en eaux notamment :

- ✓ Le régime des cours d'eaux
- ✓ L'alimentation et le renouvellement des eaux souterraines
- ✓ La perturbation des approvisionnements de l'eau pour les agglomérations et les périmètres irrigués.

Par conséquent, le niveau des nappes phréatiques a chuté dans des proportions alarmantes entraînant la minéralisation des zones non saturées des nappes aquifères profondes, comme le plateau d'Oran et les hautes plaines (PNUD, 2009 in Ghzel, 2018). Plus encore, la baisse des niveaux de pression hydrostatique dans les régions côtières a entraîné la pénétration d'eau de mer dans les réserves d'eau douce des nappes aquifères des régions d'Oran et de Terga (Nichane et Khelil, 2015).

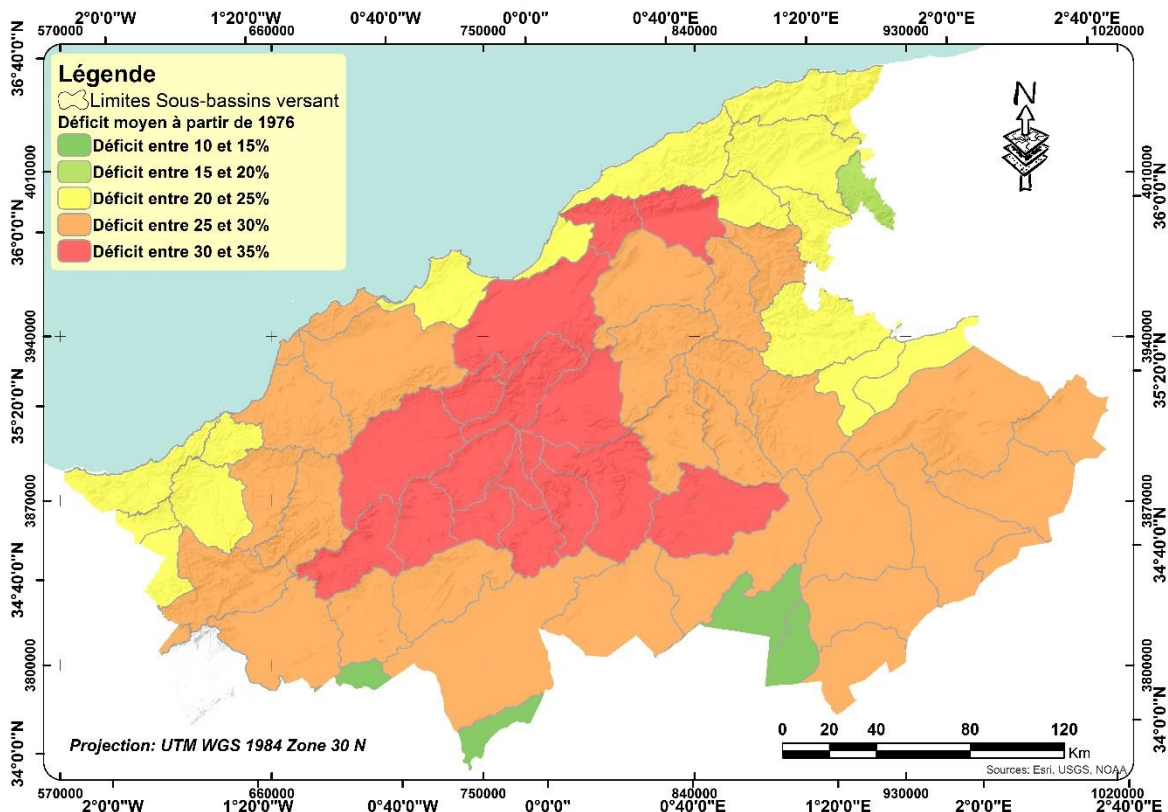


Figure 3-4: Carte de déficit pluviométrique avant 1976 de l'ouest algérien (Source: ANRH, 2017)

D'après Ghenim et Megnounif (2011), le niveau de stockage des barrages a atteint des niveaux alarmants au point où la cuvette du barrage Meffrouche s'est complètement asséchée en octobre 2006.

Ce constat est confirmé par la carte de degré de gravité de sécheresse de l'Algérie établie par World Resources Institute (WRI) (Fig. 3-5) qui montre clairement le degré élevé de la région occidentale. Les wilayas de Sidi Bel Abbas, Saida, Tlemcen et Mascara sont le plus touchées en premier lieu suivies par les wilayas de Tiaret, Relizane et Chlef. Les régions côtières nord-est et nord-ouest ont moins de degré.

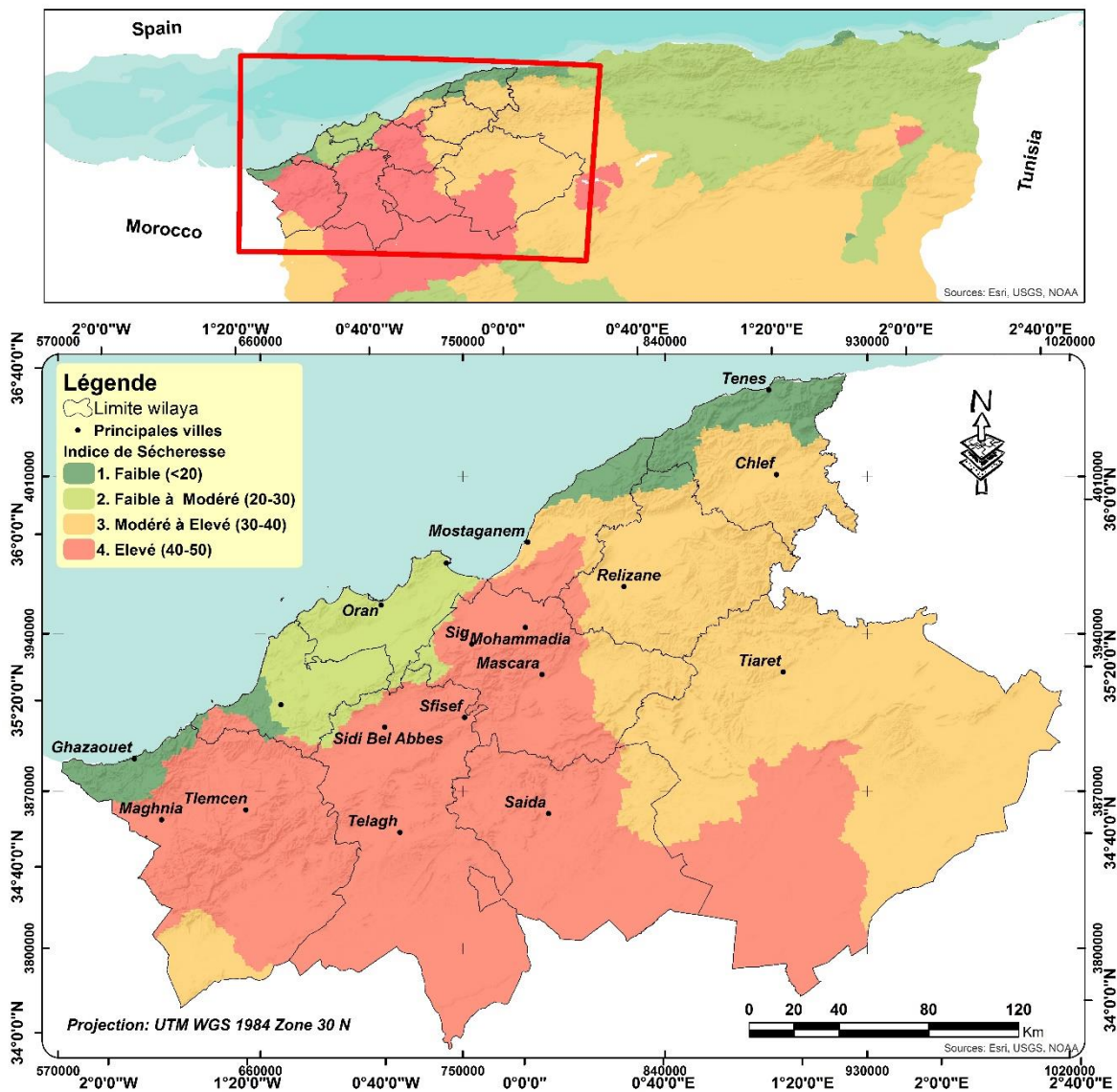


Figure 3-5: Carte de l'indice de sécheresse de l'Algérie occidentale (Source: Gassert et al., 2014)

2.2. Facteurs anthropiques

Si les facteurs climatiques peuvent prendre une certaine part dans la destruction de l'environnement, il est évident que l'action de l'homme prend la part la plus importante. En effet, les activités exercées par l'homme avec ses différentes sortes (pratiques agricoles excessives, urbanisation, surpâturage...) peuvent accentuer et accélérer le rythme de cette dégradation de manière considérable.

2.2.1. Urbanisation

Cette forme de dégradation englobe tout type de construction à savoir la construction de maisons, de zones industrielles, de zones commerciales, d'infrastructures routières et ferroviaires, de barrages, etc.

Cette dégradation n'est pas grave quand elle se fait au détriment des terres à faible potentiel de productivité agricole, mais elle l'est quand il s'agit de sols à fort potentiel de production, ce qui est le cas le plus fréquent (Brabant, 2008).

A l'échelle régionale occidentale comme à l'échelle nationale, l'urbanisation a pris une tendance dangereuse dans le fait que les terres urbanisées étant soustraites des sols agricoles dans la majorité des zones.

L'ensemble des impacts négatifs de l'expansion urbaine sur les terres qu'elle s'approprie, est bien décrit pour la ville du Tiaret. Entre 1962 et 1992 la ville est passée de 40 000 habitants sur une surface construite d'environ 240 ha, à 160 000 habitants sur près de 3 000 ha (Plan Bleu, 2003).

Avec le grand projet de l'habitat rural lancé en Algérie depuis 2000, des milliers d'hectare de terre agricoles ont été substituées par des habitats en béton armé. Ce projet malheureusement a été opéré d'une manière anarchique sans aucune planification et programmation par les services de l'habitat et le cadastre. La figure suivante montre un exemple d'une zone rurale dans la wilaya de Mascara dans un intervalle de 10 ans 2010-2020 où la densité de l'habitat rural a augmenté par presque le triple. En outre, le projet de l'auto route Est-Ouest a envahi une réserve naturelle de la Macta qui est en souci.

Le recours aux outils spatiaux tels que l'imagerie satellitaire et les Systèmes d'Informations Géographiques peut être très utile pour diriger et gérer d'une manière optimale l'opération de l'urbanisation. L'inventaire des zones bâties, revêtues et artificialisées devient facile à effectuer, soit sur les photos aériennes ou sur les images satellites.

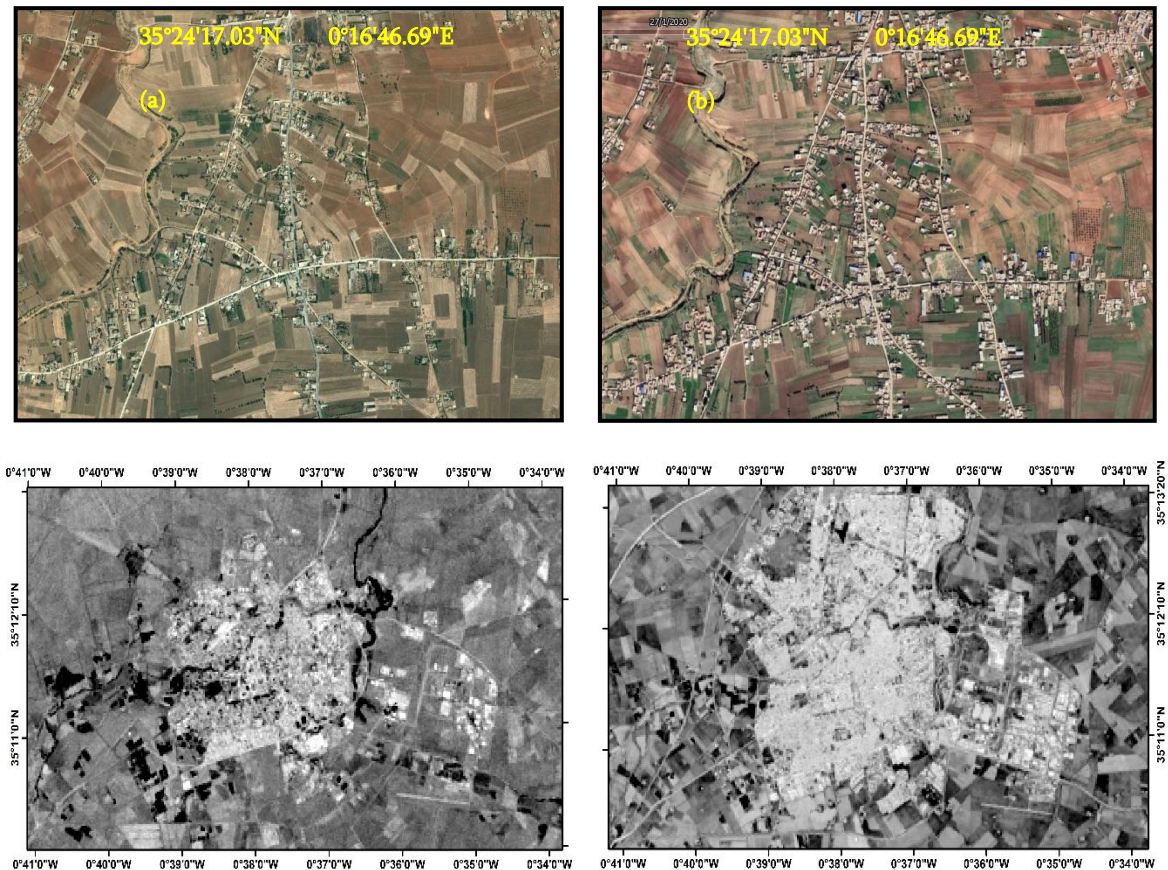


Figure 3-6: Evolution des habitats ruraux construits à Mascara (a) 2010 (b) 2020 (Source: Google earth) et l'extension urbaine de la ville de SidiBel Abbes de (c) 1991 à (d) 2019 (images Landsat)

2.2.2. Surpâturage

Le souci majeur de tout pasteur, est d'accroître l'effectif de son cheptel, avec une diversification des espèces animales. Si cela se fait avec une incontestable pression animale sur la végétation des terrains de parcours, on verra à une situation de déséquilibre écologique et climatique suite à la dégradation intense de ce milieu fragile (ensablement, érosion, salinisation ...) induisant des graves conséquences à court et à long terme.

Actuellement les terres de parcours de la zone ouest de l'Algérie comme pour le reste des régions rencontrent les mêmes problèmes à savoir l'accès libre au parcours sans limite et la semi-sédentarisation qui provoque une exploitation plus intense (Haddouche, 2009).

Les parcours steppiques des wilayas de Tlemcen, Sidi Bel Abbes et Saida connaissent des pratiques pastorales intensives suite à la nature de la région où les l'activité pastorale est considérée comme primordiale.

La dégradation de ces milieux peut être progressive et relativement lente traduite par des changements qui se sont perçoivent sur le très long terme (Haddouche, 2009).

Ces zones caractérisées aussi par la fragilité de son écosystème se trouvent dans un état de dégradation avancée, entraînant la mutation et la transformation du mode d'utilisation et d'exploitation de l'espace steppique (Yerou, 2013).

Les effets de cette néfaste dégradation peuvent être traduits par :

- ✓ Une régression du couvert végétal
- ✓ Le développement des espèces indésirables
- ✓ La désertification notant que la wilaya de Tlemcen figure aujourd'hui parmi les 12 wilayas touchées par le phénomène de la désertification

Deux extraits des images Google Earth au-dessus de deux régions steppiques de Tlemcen et de Saida datés de 1984 et 2019 montrent clairement l'état de dégradation que subissent les parcours de ces régions.

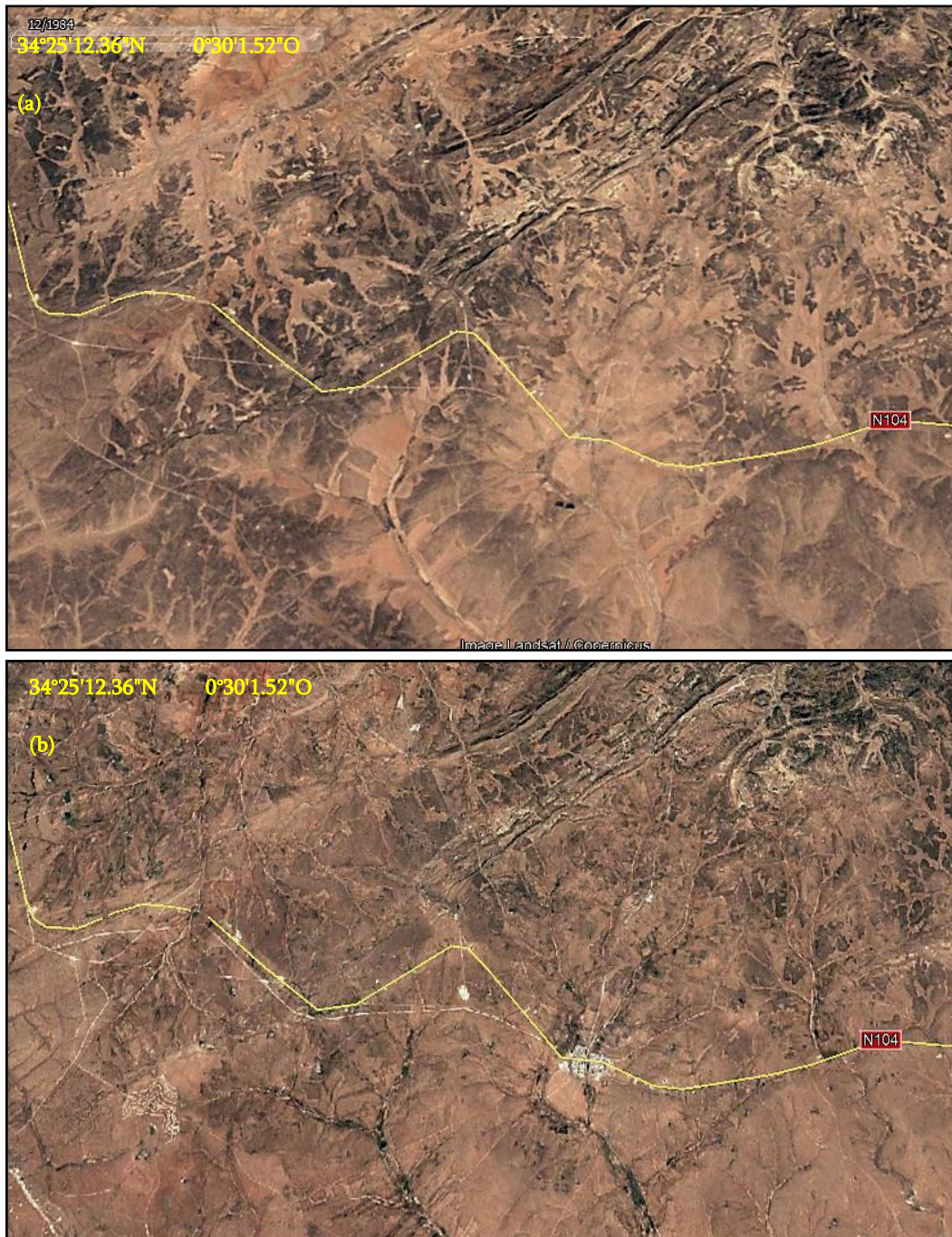


Figure 3-7: L'état des parcours sud de Saida en (a) 1984 et (b) 2019 (Source: Google Earth)

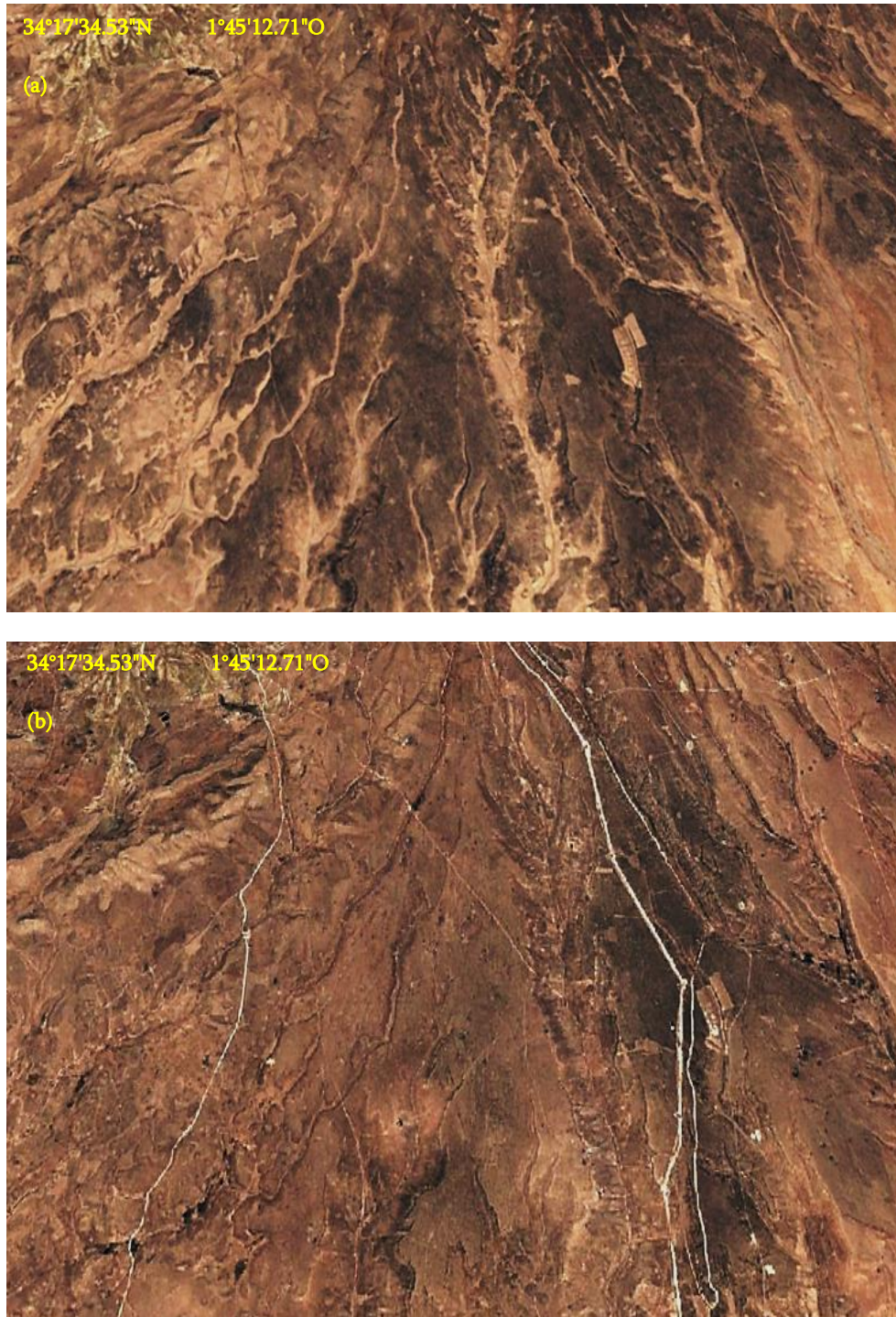


Figure 3-8 : L'état des parcours sud de Tlemcen en (a) 1984 et (b) 2019 (Source: Google Earth)

3. Conclusion

Les ressources naturelles de la région occidentale algérienne subissent un état de dégradation critique suite à de nombreux facteurs tant naturels qu'humains. Cet état nous pousse à prendre la situation en sérieux pour remédier à ce problème.

L'étude et la connaissance au préalable des différentes ressources qu'on dispose dans notre territoire et la caractérisation de leurs états demeurent la première pierre pour construire un plan de gestion et d'aménagement efficace.

Le savoir et le recensement des différents facteurs causant la dégradation des ressources préalablement recensées semblent être le pas suivant le plus important.

L'évolution majeure des techniques de localisation et de l'analyse spatiale ces deux dernières décennies ont ouvert les portes à de nouvelles pistes pour les chercheurs et les aménagistes pour faire face à cette inquiétude.

Les Systèmes d'Information Géographiques et la télédétection ont pris leur place dans cet axe. Grace à leurs pouvoirs d'acquérir, analyser, archiver et afficher les données à caractère spatial deviennent une solution inévitable dans presque tous les domaines de gestion territoriale.

Partie II :

Apport des SIG et de la Télédétection à l'Etude et l'Evaluation de la Dégradation des Ressources Naturelles

Chapitre 4 : Notions de base en Géomatique

1. Introduction

Les données localisées ont trouvé leur place actuellement dans de nombreux domaines où la dimension spatiale des données était encore mal cernée voire même méconnue. La carte sous ses différentes formes (numérique et analogique) constitue un support de communication très affectif. Sous sa forme numérique, elle représente également un moyen attractif et une interface de saisie ergonomique.

La représentation cartographique numérique permet donc de spatialiser les données et de faire interagir des acteurs sur un territoire donné et par là-même modifie l'approche classique des problèmes intégrant une forte dimension spatiale. Cette spatialisation a changé considérablement la façon d'organiser et d'analyser la gestion d'un territoire, et ceci à n'importe quelle échelle.

La réalisation d'une base de données à référence spatiale fait intervenir de nombreuses techniques englobées sous le nom de la « Géomatique ». Il est donc primordial d'apprendre tous les aspects de ces techniques.

2. Géomatique

2.1. Définition de la géomatique

Le mot « géomatique » est la combinaison syntaxique de deux mots : Géographie et Informatique. Elle peut être définie comme une discipline qui fait appel à un ensemble des outils et de méthodes permettant de la modélisation, l'analyse et la représentation cartographique d'un territoire donné (Hamadouche, 2015). Elle est un domaine qui intègre l'utilisation de l'outil informatique et les technologies de l'information et de la communication (TIC) en géographie plus précisément pour la collecte, la structuration, le traitement et la diffusion des informations localisées géographiquement.

La représentation et la localisation de l'information géographique d'un territoire est l'élément clé de la géomatique. La mutation technologique a mené à une extensification de l'usage des données à référence spatiales qui fait de la géomatique un outil très indispensable.

D'ailleurs, tous les domaines manipulant des informations à caractère spatial (cadastre, hydraulique, géologie, aménagement de territoire, foresterie, urbanisme...) peuvent recourir à la géomatique. Par conséquent une diversité d'applications est ouverte aujourd'hui dont une grande partie s'étend vers l'usage du web pour la diffusion de l'information géographique.

2.2. Techniques de la géomatique

La géomatique met en œuvre plusieurs techniques qui sont impliquées directement ou indirectement dans les différents processus de la collecte, l'analyse et la diffusion des informations géolocalisables.

Les principaux outils et techniques impliqués dans cette discipline sont :

La géodésie :

C'est la science qui étudie la forme et les dimensions de la terre. Elle est d'une grande utilité en géomatique comme une source de données de positionnement spatial et de définition de référentiels cartographiques qui sont indispensables pour la description des informations géographiques.

La photogrammétrie :

La photogrammétrie est la technique qui permet de représenter les objets en 3D à partir des images stéréoscopiques satellitaires, aériennes ou au sol par une restitution analogique ou numérique. Elle est utilisée dans divers domaines : architecture, archéologie, conservation de monuments historiques, auscultation d'ouvrages d'art etc.

La topographie :

C'est la technique qui utilise les mesures de la forme et les levés sur terrain des objets pour les représenter sous forme une carte ou un plan 2D. Ces objets peuvent être naturels tels que le relief, une parcelle agricole ou artificiels comme un immeuble, une chaussée ou ouvrage hydraulique. Elle permet de fournir des mesures de grandes précisions pour pouvoir les utiliser dans un SIG ou en photogrammétrie.

La télédétection :

La télédétection correspond à tous le processus permettant une acquisition distancielle des informations sur les objets terrestres sans contact physiques avec ceux – ci. Elle s'appuie sur l'exploitation des propriétés du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par ces objets pour produire une représentation numérique de ces propriétés.

Actuellement, la télédétection est au cœur d'un grand nombre d'applications en résolvant une diversité de problématiques en environnement, climat, sciences de la terre, géo-risque ... etc.

La cartographie :

La cartographie désigne la réalisation et l'étude des cartes. Elle mobilise un ensemble de techniques servant à la production cartographique. La cartographie constitue un des moyens privilégiés pour l'analyse et la communication en géomatique. Elle sert à mieux comprendre l'espace, les territoires et les paysages. Elle est utilisée aussi dans d'autres disciplines telles que la démographie, l'économie, la sociologie et la santé pour une meilleure lecture spatialisée des phénomènes associés.

Informatique spécialisée :

L'informatique est l'outil offrant à la géomatique la possibilité d'automatiser les traitements, modéliser et diffuser les données à travers différentes plateformes (logiciels, réseaux informatiques, appareils mobiles...). Elle permet la réalisation de systèmes d'informations géographiques (SIG) en passant par l'analyse des besoins des utilisateurs et la définition des programmes informatiques.

Systèmes d'Informations Géographiques :

Les SIG sont des systèmes informatiques destinés à l'acquisition, la manipulation, le stockage et l'édition des informations géographiques en vue d'étudier une thématique précise à une certaine échelle (locale, régionale ou globale).

L'usage des SIG est d'autant plus important que les autres techniques en plusieurs domaines (aménagement de territoire, l'étude du changement, catastrophes naturelles, prévision des risques, développement durable...). Il constitue un outil très performant pour un grand public à savoir les aménagistes, les gestionnaires, les décideurs et même les citoyens publics.

2.3. Champs d'applications de la géomatique

Le développement des technologies informatiques et les moyens de communication et de diffusion de l'information ont permis d'ouvrir les portes à une large gamme d'applications. La géomatique peut être appliquée à une multitude de disciplines telles que :

- ✓ La gestion environnementale
- ✓ La gestion des risques
- ✓ Aménagement de territoire
- ✓ Modélisation
- ✓ Gestion des réseaux
- ✓ Socio-économie

3. Système d'Informations Géographiques (SIG)

3.1. Définition

Un SIG est un système informatique qui de collecter, organiser, gérer et analyser des informations géographiques à partir de diverses sources en vue de les présenter cartographiquement pour la gestion de l'espace (Société française de photogrammétrie et télédétection, 1989). Ils sont considérés comme l'outil le plus utilisé dans les activités de la géomatique.

Les SIG comme outil d'analyse et de représentation cartographique sont devenus indispensables actuellement. Non seulement ils permettent la représentation des informations localisées spatialement sous forme de cartes, mais ils permettent aussi de partager l'information géographique à travers divers moyens (supports mobiles, réseaux informatiques), créer une coopération multidisciplinaire entre les organismes et même une intégration du public à travers une interactivité de nouveaux usages (Hamadouche, 2015).

Pour la mise en place d'un SIG, plusieurs éléments constitutifs doivent être mis en œuvre pour garantir les principales fonctionnalités assurant la gestion adéquate des informations géographiques.

3.2. Les composants d'un SIG

Un SIG est constitué de cinq principaux éléments comme la montre la figure 4-1.

3.2.1. Le matériel

Le matériel constitue tous les équipements informatiques et non-informatique où se fonctionne un SIG. Il peut contenir entre autres les ordinateurs, les stations de travail, les imprimantes, les instruments de saisie ... etc.

Avec l'évolution du monde du numérique, une large gamme de machines sous plusieurs architectures peut être utilisée pour le fonctionnement des SIG partant des ordinateurs de bureau, portables, des serveurs de données aux réseaux d'ordinateurs interconnectés (Intranet, extranet ou internet).



Figure 4-1 : Les composants d'un SIG

3.2.2. Les logiciels

La partie logicielle d'un SIG correspond aux différentes applications et outils soft qui assurent les fonctions permettant d'importer, stocker, analyser et visualiser les données géographiques. Elle peut être d'un des types suivants :

- ✓ Outils de saisie et de manipulation des informations
- ✓ Logiciel de traitement et d'analyse
- ✓ Système de Gestion de Base de Données (SGBD)
- ✓ Interface utilisateur
- ✓ Outils d'interrogation et de requêtes

3.2.3. Les données

Les données sont le noyau des SIG et représentent certainement les composantes les plus importantes. Ces données peuvent être acquises de sources internes (digitalisation, classification des images...) ou externes (statistiques, inventaires ...).

3.2.4. Les utilisateurs

Les utilisateurs d'un SIG désignent les personnes ayant la possibilité d'exploiter les données grâce aux outils qui lui ont offert. Ils peuvent être d'une très grande communauté depuis les créateurs et les gestionnaires du système jusqu'aux personnes utilisant ses produits finaux. Cette communauté ne cesse d'augmenter avec l'avènement

des réseaux d'intranet et d'extranet, où une grande partie de la citoyenneté sera considérée comme utilisateur de SIG à un certain niveau.

3.2.5. Processus et méthodes

Comme pour tout système d'informations, un SIG ne peut être mis en œuvre sans la définition de certaines méthodes et procédures qui lui sont propres. En effet, un SIG peut intégrer divers métiers envisagés par un savoir-faire fourni par une ou plusieurs personnes. A titre d'exemple, un SIG peut mobiliser des compétences en géodésie, en analyse des données, en modélisation de données, en cartographie ou en traitement d'images.

3.3. Les principales fonctionnalités d'un SIG

Dans le monde des SIG, on peut y avoir une diversité de domaines d'application où on gère des informations à caractère spatial mais ils doivent tous assurer certaines fonctionnalités communément appelées les '5A' (Fig. 4-2).

3.3.1. Abstraction

Cette fonction concerne l'abstraction des données qui consiste à une reproduction du monde réel en format numérique bien structuré. L'élaboration d'un modèle de données et les traitements associés passe par une organisation de ces données et les relations entre les objets selon le problème à résoudre. Cette modélisation doit représenter la réalité le plus fidèlement possible.

La structuration du monde réel se passe souvent par une décomposition en couches d'informations ou couches thématiques représentées par plusieurs manières.

3.3.2. Acquisition

Cette seconde fonctionnalité permet la collecte de données pour pouvoir alimenter un SIG. Ces données correspondent aux informations géographiques qui caractérisent la forme des objets ainsi que leurs attributs en format numérique.

3.3.3. Archivage

L'archivage revient à la fonction du stockage des données géographiques dans des supports physiques locaux (disques durs ou autres) ou dans une base de données réseaux permettant la consultation et le transfert de données du client au serveur ou le contraire.

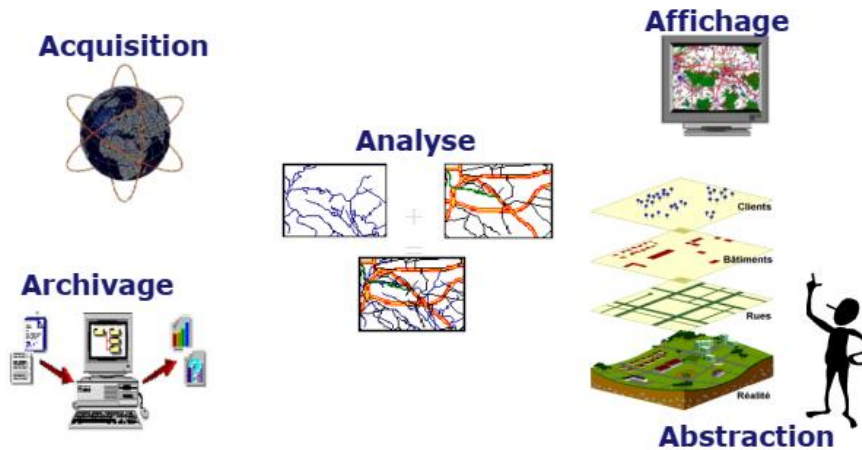


Figure 4-2: les principales fonctionnalités d'un SIG

3.3.4. Analyse

Un SIG offre aux utilisateurs la possibilité de manipuler et d'interroger des données géographiques afin de répondre aux requêtes des utilisateurs. Ces requêtes peuvent être selon un critère attributaire (ex : wilaya = 'Mascara') ou spatiale (ex : les propriétés intersectées avec la route nationale RN96).

3.3.5. Affichage

Hamadouche (2015) a décrit que les SIG permettent l'édition des données et des résultats des traitements sous diverses formes : affichage à l'écran (affichage des différentes couches, résultat des requêtes... etc.), édition sur traceur, imprimante (édition des données sur support papier), ou copie d'écran, mais aussi création de rapports, statistiques, d'histogrammes ou de graphiques diverses.

3.4. Source de données géographiques

L'acquisition de données géographiques peut être effectuée à partir de plusieurs sources différentes avec une précision plus ou moins fiable (Fig. 4-3):

- La digitalisation manuelle à partir des cartes papiers ou sur écran affichant des supports scannés (cartes, plan, photo aérienne...).
- L'exploitation des images satellitaires qui constituent une source d'informations très intéressante pour plusieurs domaines d'études par les SIG.
- La collecte de données sur terrain par le biais de levé topographique, mesures GPS ou des mesures de photogrammétrie (mesures des angles et de distances)
- Les données socioéconomiques provenant des différents organismes constituent elles aussi une source incontournable pour les SIG. Elles peuvent être des

données de localisation spatiales (comme par exemple la localisation des forages, le réseau routier...) ou des données descriptives alphanumériques (par exemple statistiques agricoles, populations des communes, volume en eau des barrages...).

- Les plateformes de cartographie web telles que Google maps, Google Earth, Bing maps ou Yahoo maps sont considérées comme une autre source de données qui offrent de nouveaux débouchés dans le domaine des SIG. Ces plateformes fournissent des données à une échelle spatiale et temporelle très importante à une large gamme d'utilisateurs.

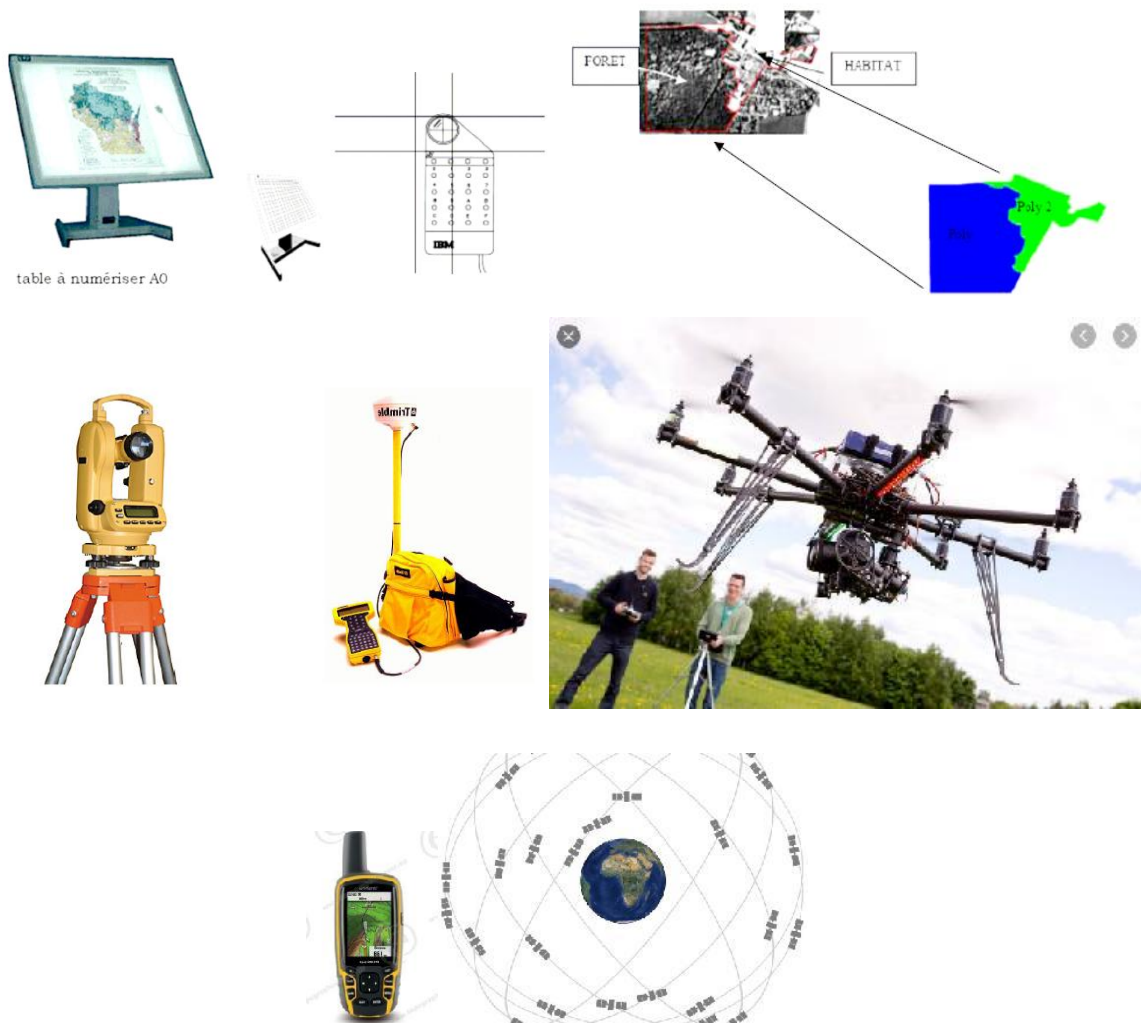


Figure 4-3: Quelques sources d'acquisition des informations géographiques

3.5. Information géographique

L'information géographique désigne toutes données associées à un objet spatialement référencé sur la surface de la terre. Elles sont d'importance primordiale pour la gestion d'un espace ou des objets dispersés dans un l'espace.

Les données géographiques sont décrites selon 2 niveaux de description :

- ✓ **Le niveau géométrique** : représente la géométrie qui décrit la forme et la position des données géographiques.
- ✓ **Le niveau sémantique** : représente les données attributaires qui fournissent les informations caractérisant la donnée géographique (ex: nom de la ville, code de la commune, nombre d'habitant ...).

3.5.1. Les données géométriques

Elles décrivent la forme des objets, leurs positions par rapport à un système de coordonnées ainsi que les relations spatiales entre eux. Deux formats sont couramment utilisés pour représenter ce type de données :

– *Le format raster* :

La représentation en format raster est obtenue par discrétisation du monde réel en grilles régulières, juxtaposées et organisées en lignes et en colonnes pour recréer la réalité (Habert, 2000). Le format raster est souvent stocké sous forme d'une image numérique composée de mailles ou pixels dont chacun correspond à une grandeur caractérisant une portion de la surface de la terre (Fig. 4-4).

– **Le format vecteur**

Le format vecteur représente tout objet spatial en utilisant l'une des entités de base : point, ligne ou polygone. Ces entités permettent de décrire la forme ainsi que la localisation spatiale d'un objet qui est doté d'un identifiant qui permet de le relier à une table attributaire. (Fig. 4-5).

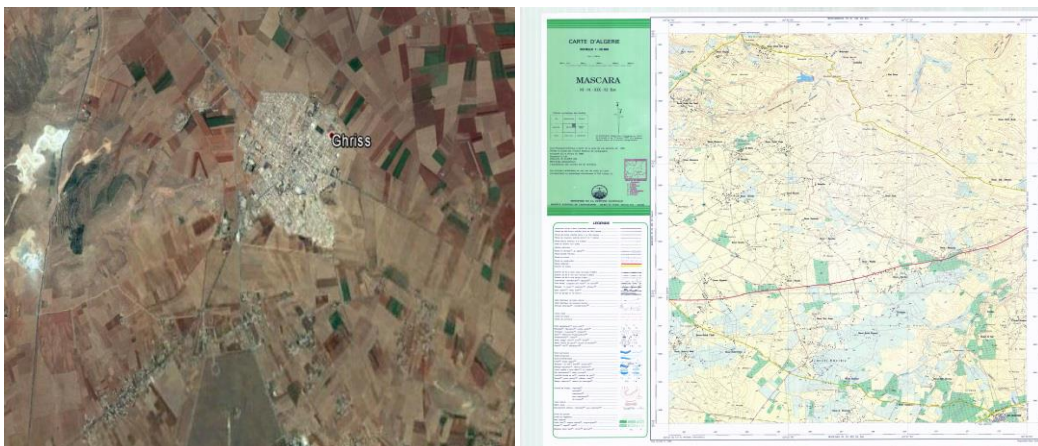


Figure 4-4: exemples de données en format raster : Image satellitaire (gauche), Carte scannée (droite)

3.5.2. Les données attributaires

Ce sont des attributs associés à un objet ou une localisation géographique et regroupent les différents types propriétés qui le caractérisent. Ils sont stockés dans une table séparément des données géométriques mais liés avec un champ commun qui permet de créer une liaison dynamique en eux. Cette liaison se fait généralement où chaque fois qu'on sélectionne une entité graphique ses attributs seront sélectionnés automatiquement et de même si on sélectionne une ligne d'attributs l'objet graphique correspondant sera sélectionné (Fig. 4-6).

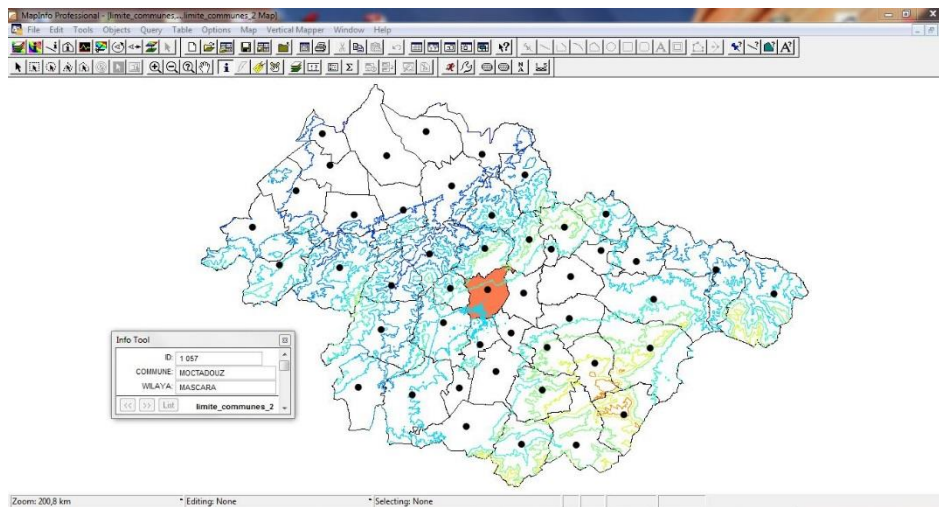


Figure 4-5: Un exemple d'une représentation en mode vecteur

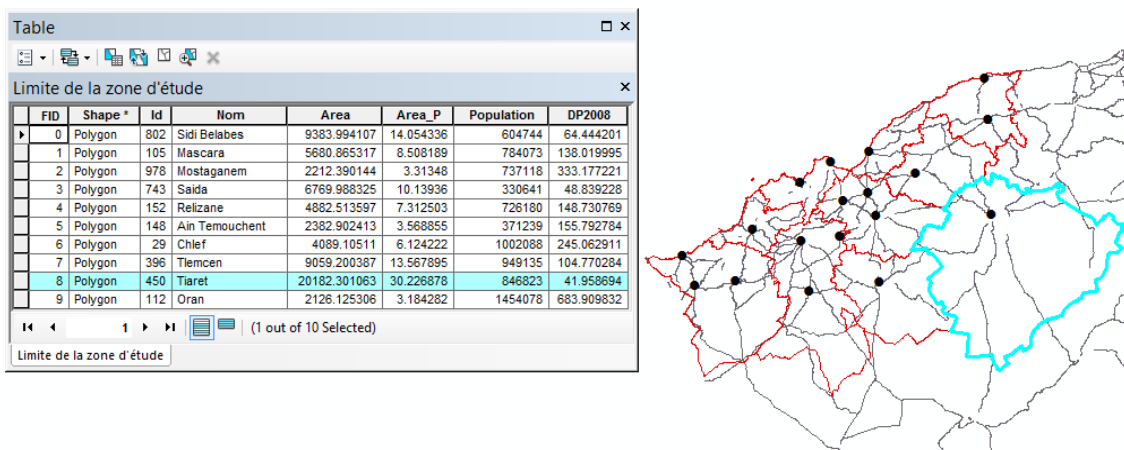


Figure 4-6: Liaison entre l'entité graphique et les attributs associés

3.6. Typologie des SIG

3.6.1. Les visionneuses (Viewers)

Ils correspondent à des versions allégées du logiciel SIG et qui permettent une visualisation seule de l'information géographique. Ce type de SIG est fourni avec certaines fonctions de consultation, recherche et interrogation de données.

3.6.2. SIG Web

On parle de SIG Web *ou* SIG en ligne quand les fonctions incluent de plus des requêtes attributaires et spatiales ou encore des géotraitements plus élaborés dans une plateforme réseau (Intranet ou Internet).

3.6.3. SIG Mobile:

Permet aux utilisateurs du terrain de capturer, mettre à jour, manipuler, analyser et afficher des informations géographiques en utilisant des équipements mobiles (Tablettes, Smartphones...).

3.6.4. SIG Métier:

Ces logiciels sont très spécialisés, destinés à des métiers particuliers. Leur champ d'application est réduit mais ils sont souvent les seuls ou les meilleurs dans leur domaine. Fréquemment, les éditeurs de logiciels commercialisent des modules additionnels qui transforment les SIG généralistes en SIG métiers.

3.6.5. SIG de Bureau:

Ils ont pour vocation essentielle l'import de données externes et leur analyse pour donner des cartes à insérer dans des rapports ou des présentations. Ils permettent bien sûr la modification de données géométriques ou descriptives mais ils ne disposent pas d'outils d'assurance qualité perfectionnés pour saisir des Bases de Données complètes. Ils disposent d'outils de développement pour s'adapter à tout type d'application.

4. Télédétection

4.1. Définition

Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale (1988) définit la télédétection comme un ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.

Autrement, la télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, d'observer et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, phyto-masse, matière organique du sol, ...) (Soudani, 2005).

D'après la seconde définition, la télédétection est opérée à distance en utilisant des plateformes dites **vecteurs** embarquant des instruments de mesures dits **capteurs**. Les vecteurs peuvent être placés au sol, en atmosphère ou dans l'espace. Ces deux composants constituent un système d'observation de la terre en s'appuyant sur des méthodes d'acquisition de l'information basées sur les propriétés du rayonnement électromagnétique sous forme de mesures de l'énergie réfléchie et/ou émise par la surface de la Terre.

Actuellement, la télédétection devient un outil très puissant et indispensable pour plusieurs champs d'étude dont les applications se sont multipliées surtout avec l'évolution des outils d'acquisition et de traitement informatique. On peut se contenter à la télédétection en météorologie, en océanographie, en climatologie, en géographie, en environnement et même en socio-économie.

4.2. Principe de la télédétection

La télédétection repose sur l'exploitation des propriétés du rayonnement électromagnétique atteignant des objets terrestres et parvenu au capteur. Le principe d'un système d'observation de la terre peut être résumé en 5 étapes (Fig. 4-7) :

✓ **Source d'énergie** : un système de télédétection doit obligatoirement impliquer une source d'énergie pour produire un rayonnement électromagnétique. On distingue trois types de sources :

- Source naturelle utilisant le rayonnement solaire pendant le jour dans le spectre du visible et proche infrarouge. Dans ce type de source, le capteur enregistre le rayonnement réfléchi par les objets terrestres alors on parle de la télédétection optique.
- Source artificielle embarquée à bord du satellite qui permet d'envoyer une énergie électromagnétique vers la surface de la terre par une antenne et le capteur enregistre le rayonnement rétrodiffusé. On parle de la télédétection active.

- La surface de la terre peut être aussi considérée comme une source d'énergie grâce à l'émission propre de ses objets dans le domaine du l'infrarouge thermique ou les micro-ondes passives.

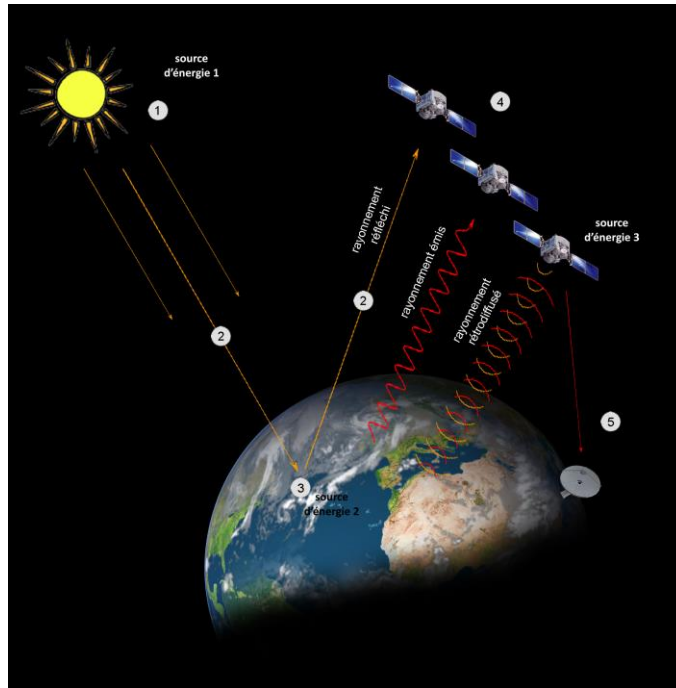


Figure 4-7: Principe de la télédétection spatiale (Source: e-cours.univ-paris1.fr¹)

✓ **Interaction du rayonnement avec l'atmosphère :** le rayonnement électromagnétique émis par la source d'énergie traverse un double trajet source-objet et objet-capteur. Lors de ce trajet, ce rayonnement subit des interactions avec les différents composants de l'atmosphère ce qui induit à une perturbation du signal enregistré par le capteur. Cette perturbation est due à la diffusion et l'absorption par les molécules du gaz, les aérosols et la vapeur d'eau.

✓ **Interaction avec les objets terrestres :** lors son arrivée à la surface de la terre, le rayonnement électromagnétique interagit avec ses objets. Plusieurs formes d'interactions peuvent se produire selon la nature du rayonnement et les caractéristiques des objets.

✓ **Réception du rayonnement par le capteur :** La portion d'énergie réfléchi, émise ou rétrodiffusée par les objets de la surface de la terre est enregistrée au niveau du capteur puis transformée de l'analogique à des grandeurs discrètes.

✓ **Transmission vers les stations de réception :** le signal capté et enregistré par le capteur sera ensuite transmis vers une station de réception au sol pour produire une

¹ <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/index.html>

image brute des données acquises et reçues par le capteur. Des éventuels traitements peuvent être appliqués sur cette image.

4.3. Télédétection passive et active

Selon la source d'illumination utilisée en télédétection, deux formes d'acquisition de données peuvent se distinguer :

- ✓ **La télédétection passive** : repose sur le rayonnement solaire réfléchi par les objets terrestres (dans le spectre du visible et proche infrarouge PIR) ou émis sous forme de chaleur thermique (dans le domaine infrarouge thermique IRT) ou dans le domaine des micro-ondes passives. Deux phénomènes peuvent se produire à savoir la réflexion en visible-PIR et l'émission en IRT ou les micro-ondes.
- ✓ **La télédétection active** : dans cette forme de télédétection, le capteur, qui est un émetteur et un récepteur en même temps, enregistre le rayonnement rétrodiffusé par les objets terrestres. Ce type utilise souvent un rayonnement de grande longueur d'ondes telles que celles utilisées par les RADAR et les LIDAR.

Les deux formes de télédétection sont illustrées par la figure suivante.

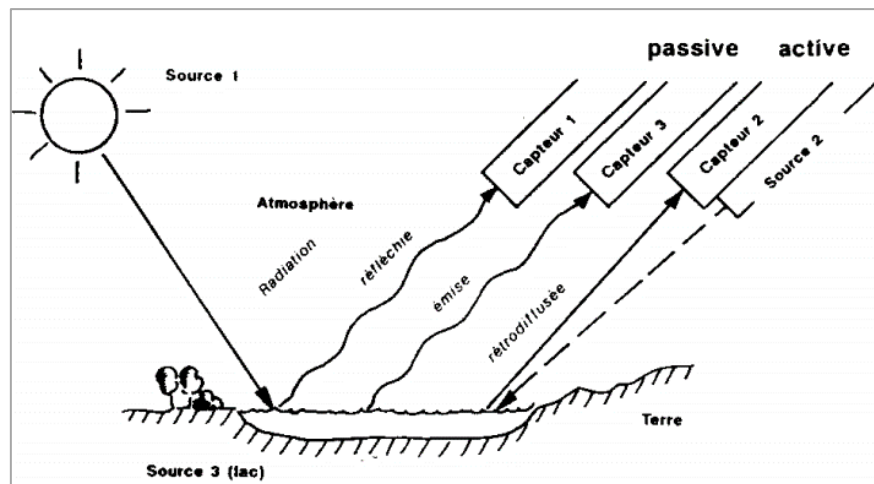


Figure 4-8: Les deux formes de la télédétection active et passive (Source : Jaquet, 1989)

4.4. Interaction rayonnement électromagnétique-objet

Le processus d'acquisition des données en télédétection utilise le rayonnement électromagnétique émis par la source d'énergie. Ce rayonnement est composé de différentes ondes et représenté sous la forme d'un spectre électromagnétique. Les ondes

sont caractérisées par leurs longueurs d'onde et leurs fréquences (deux grandeurs inversement proportionnelles) (Fig. 4-9).

Le spectre électromagnétique est divisé en plusieurs domaines selon les longueurs d'ondes. Les domaines du visible, infrarouge (proche, moyen et thermique) et les micro-ondes sont les plus souvent utilisés en télédétection.

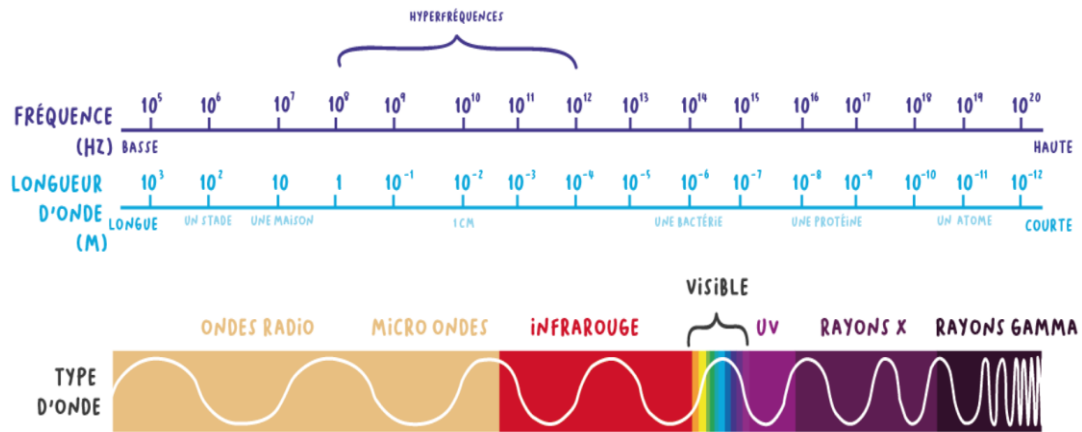


Figure 4-9: les domaines du spectre électromagnétique (Source : site GeoBretagne¹)

Trois phénomènes peuvent se produire lorsque le rayonnement atteint un objet terrestre : la réflexion, l'absorption et la transmission. Par conséquent, trois grandeurs physiques en résultent : le rapport du rayonnement réfléchi au rayonnement incident appelé réflectance (ρ). De la même manière, on définit l'absorptance (α), rapport du rayonnement absorbé au rayonnement incident et la transmittance (τ), rapport du rayonnement transmis au rayonnement incident (Soudani, 2005). La somme de ces trois grandeurs est toujours égale à 1 ($\rho + \alpha + \tau = 1$).

En télédétection, seule la réflectance dans le visible qui est prise comme paramètre caractérisant les objets terrestres. On peut ajouter la quantité d'énergie émise par les objets définie sous le nom de l'émissivité, dans le cas du thermique et micro-onde passif ; et le coefficient de rétrodiffusion dans le mode actif. C'est ces trois grandeurs ; la réflectance, l'émissivité et la rétrodiffusion qui sont captées et transformées par la suite en images de télédétection (Fig. 4-10).

La réflectance d'un objet le long du spectre électromagnétique définit ce qu'on appelle la signature spectrale (Fig. 4-11). C'est la quantité d'énergie émise ou réfléchie en

¹ <https://cms.geobretagne.fr/content/comprendre-une-image-satellitaire>

fonction de la longueur d'onde qui permettra l'identification de cet objet sur les images satellitaires.

En fonction de la nature et des caractéristiques intrinsèques des objets et des surfaces, le rayonnement incident interagira avec la cible selon l'une ou l'autre des propriétés ou de manière générale selon une combinaison de ces propriétés. Par exemple, un sol lisse interagit différemment d'un sol rugueux, une eau douce et profonde aura une

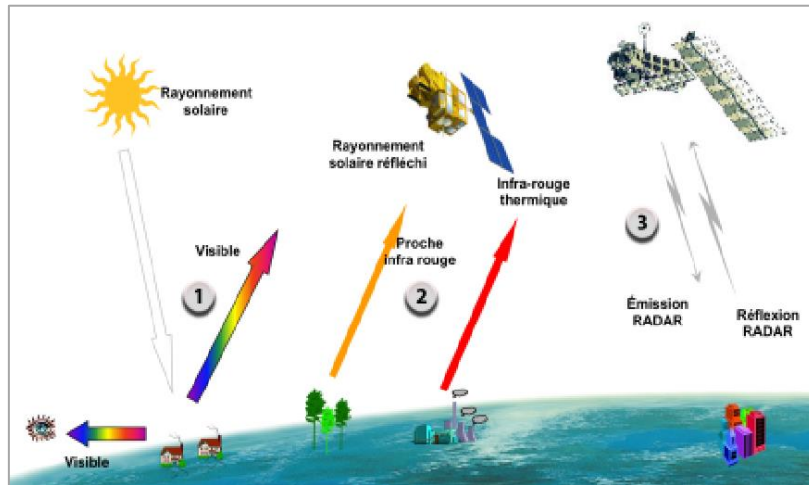


Figure 4-10: La réflexion, l'émission et la rétrodiffusion des objets terrestres (Source: site de l'ENSG¹)

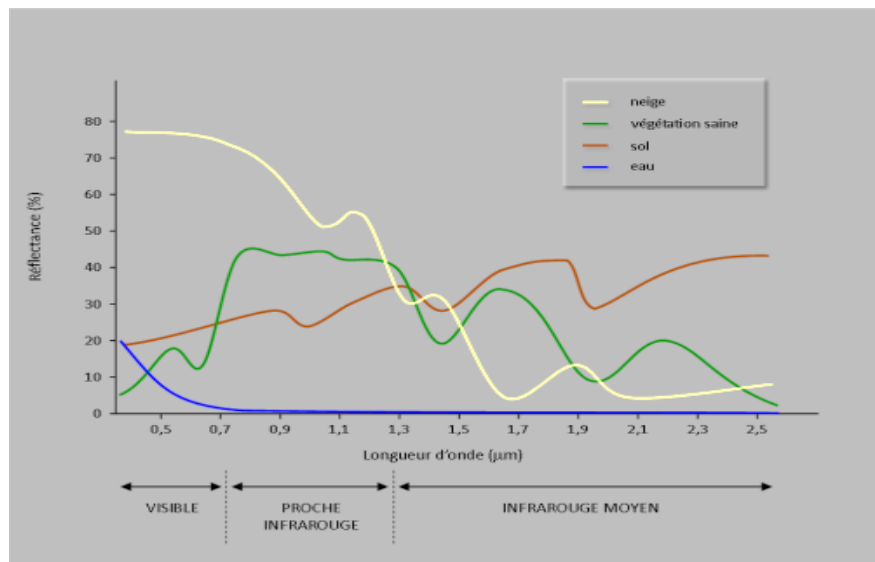


Figure 4-11: La signature spectrale de quelques objets terrestres (Source : e-cours.univ-paris1.fr²)

¹ https://streaming.ensg.eu/teledetection/portail/3/1/co/3sequence1.html#segment_JmzewQvL4BdsTXtOyEO5uc1

² <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-7-signatures-spectrales.html>

signature spectrale différente que celle d'une eau turbide, peu profonde et salée. Un exemple de la signature spectrale de quelques objets de la surface terrestre est illustré par la figure ci-dessus.

4.5. Caractéristiques des images de télédétection

Les images acquises par les techniques de la télédétection sont représentées sous forme des images numériques qui se caractérisent par des propriétés fondamentales : la résolution spectrale, spatiale et temporelle.

4.5.1. Résolution spectrale

La résolution spectrale définit le pouvoir et l'aptitude du capteur à distinguer le rayonnement émis ou réfléchi par les objets au sol dans des gammes de longueur d'onde. (Hamadouche,2015). Chaque capteur utilise de fenêtres de longueurs d'onde pour enregistrer la réponse spectrale des objets terrestres dont chaque fenêtre correspond à une bande spectrale. Plus la résolution spectrale est fine, plus les bandes spectrales du capteur sont étroites. La résolution spectrale de quelques capteurs sont présentées dans la tableau 4-1.

4.5.2. Résolution spatiale

Une image de télédétection est discrétisation d'une surface de la terre composée de lignes et de colonnes formées de pixels dont chacun correspond à une tâche élémentaire observée par le capteur. Les dimensions au sol de cette tâche définies la résolution spatiale de l'image qui peut varier de 2.5m pour Alsat 2, 10m pour Sentinel 2, 30m pour Landsat 8 à 250 m pour MODIS.

4.5.3. Résolution temporelle

La résolution temporelle ou la répétitivité désigne la période pour laquelle le satellite effectue un cycle orbital pour observer exactement la même zone de la terre. Il peut varier de quelque jour à une dizaine de jours. Par exemple Alsat 2A a une répétitivité de 3 jours, Sentinel 2 à 5 jours alors que Landsat 7 dispose d'une période de revisite de l'ordre de 16 jours. Une présentation de la résolution temporelle de quelques satellites est présentée dans le tableau 4-1.

4.6. Produits de de télédétection

Les produits issus de la télédétection sont diversifiés à cause de l'évolution des outils de traitements d'images satellitaires et les techniques associées. En effet, ces produits

peuvent être des images brutes telles qu'elles sont transmises à la station de réception ou traitées à un certain niveau. Ils peuvent être aussi classés selon leur nature en image en niveaux de gris, images couleurs, images binaires ou néo-images.

4.6.1. Images en niveaux de gris

La majorité des données de télédétection se présentent en format numérique ce qui amène qu'une grande partie des traitements requière des systèmes permettant l'analyse et l'interprétation par ordinateur.

Tableau 4-1: Les différentes résolutions de quelques capteurs satellitaires (Source : Satellite Imaging Corporation¹)

Capteur	Résolution spatiale (m)	Résolution spectrale	Résolution temporelle
Sentinel 2	MS : 10, 20, 60	B, V, R, PIR, MIR	5 jours
SPOT 5	Pan : 2,5-5 MS : 10 MIR : 20	V, R, PIR, MIR	2-3 jours
ASTER	MS : 15-30 IRT : 90	B, V, R, PIR, MIR, IRT	16 jours
Worldview-4	Pan : 0,31 MS : 1.24	B, V, R, PIR	1 jour
Landsat 8	Pan : 15 MS : 30	CA, B, V, R, PIR, MIR, IRT	16 jours

Les images de télédétection sont souvent stockées en un seul fichier contenant plusieurs images acquises en plusieurs bandes spectrales ou canaux. Ce fichier est désigné par le terme image multibande. Certains produits sont structurés sous forme de plusieurs images enregistrées séparément dont chacune est appelée image monobande.

Les pixels de ces images que se soient multibande ou monobande sont codés par un nombre de bits permettant la représentation de plusieurs niveaux de gris. En effet, une image dont les pixels sont codés par 8, 12 ou 16 bits permet de représenter 256, 4096 ou 256² niveaux de gris respectivement. Tous les systèmes de traitement d'images disposent un outil d'affichage en niveaux de gris.

Les variations des niveaux de gris dépendent de la grandeur physique exprimée par cette image. Les images du VIR expriment la réflectance des objets terrestres et les images du l'infrarouge thermique expriment l'émission propre des objets. Quant aux images du domaine microonde active, elles caractérisent la rétrodiffusion du signal émis par le capteur. La figure 4-12 présente quelques exemples des images en niveaux de gris.

¹ <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/>

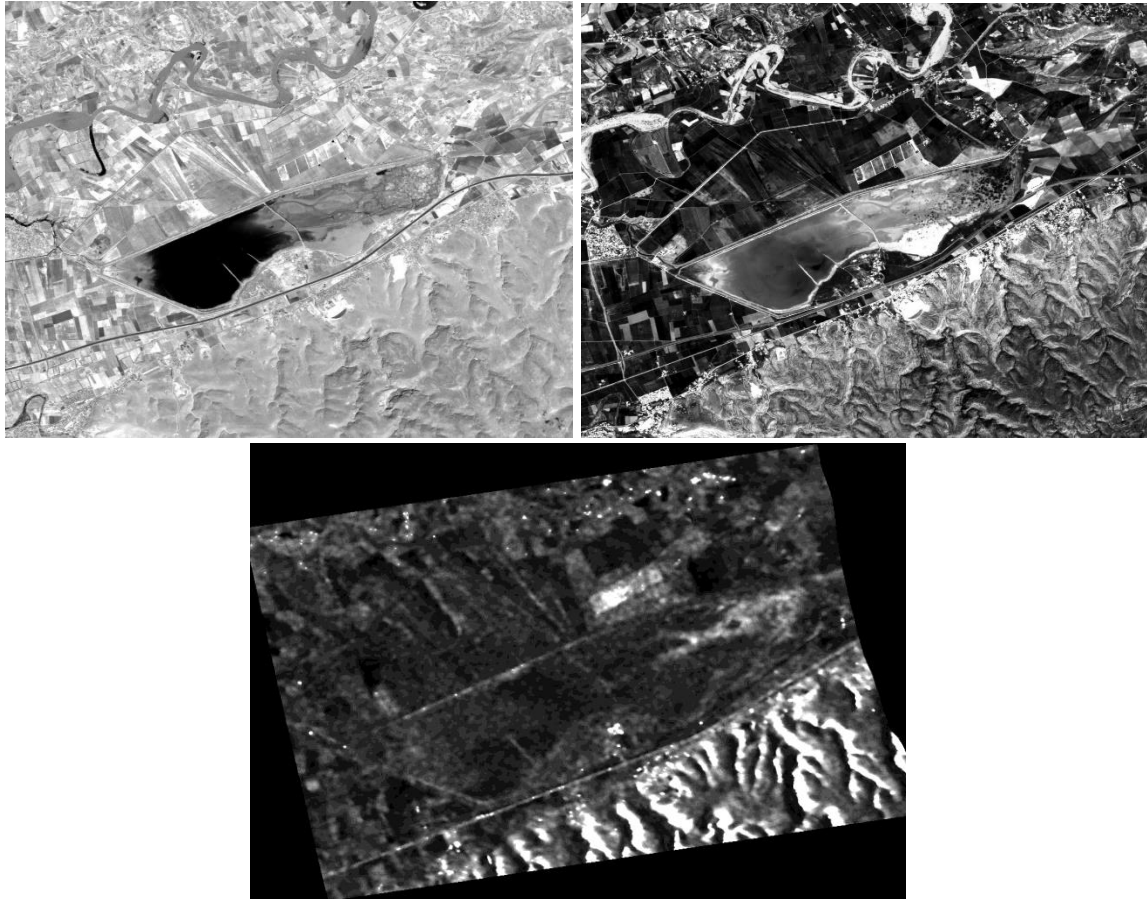


Figure 4-12: Exemples d'images en niveaux de gris : (haut) bandes Rouge et PIR de Sentinel 2, (bas) Image radar Sentinel 1

4.6.2. Images couleurs

Les images de télédétection en couleur sont produites à partir de combinaison de plusieurs images en niveaux de gris. Tous les logiciels de traitement d'images satellitaires sont munis d'une fonction de composition colorée qui utilise le système RVB (Rouge-Vert-Bleu) pour construire des images couleurs où chaque image monobande est affectée à l'un des éléments RVB. Par conséquent, l'image couleur résultante dépende de la combinaison des trois images en niveaux de gris choisies (Fig. 4-13).

Si les images des bandes rouge, verte et bleue sont affectées par ordre aux éléments RVB, l'image couleur produite est appelée image vrai-couleurs, sinon elle est appelée fausse-couleurs. Plusieurs combinaisons fausse-couleurs sont présentées en télédétection dont chacune caractérise une thématique donnée (eau, urbain, végétation...).

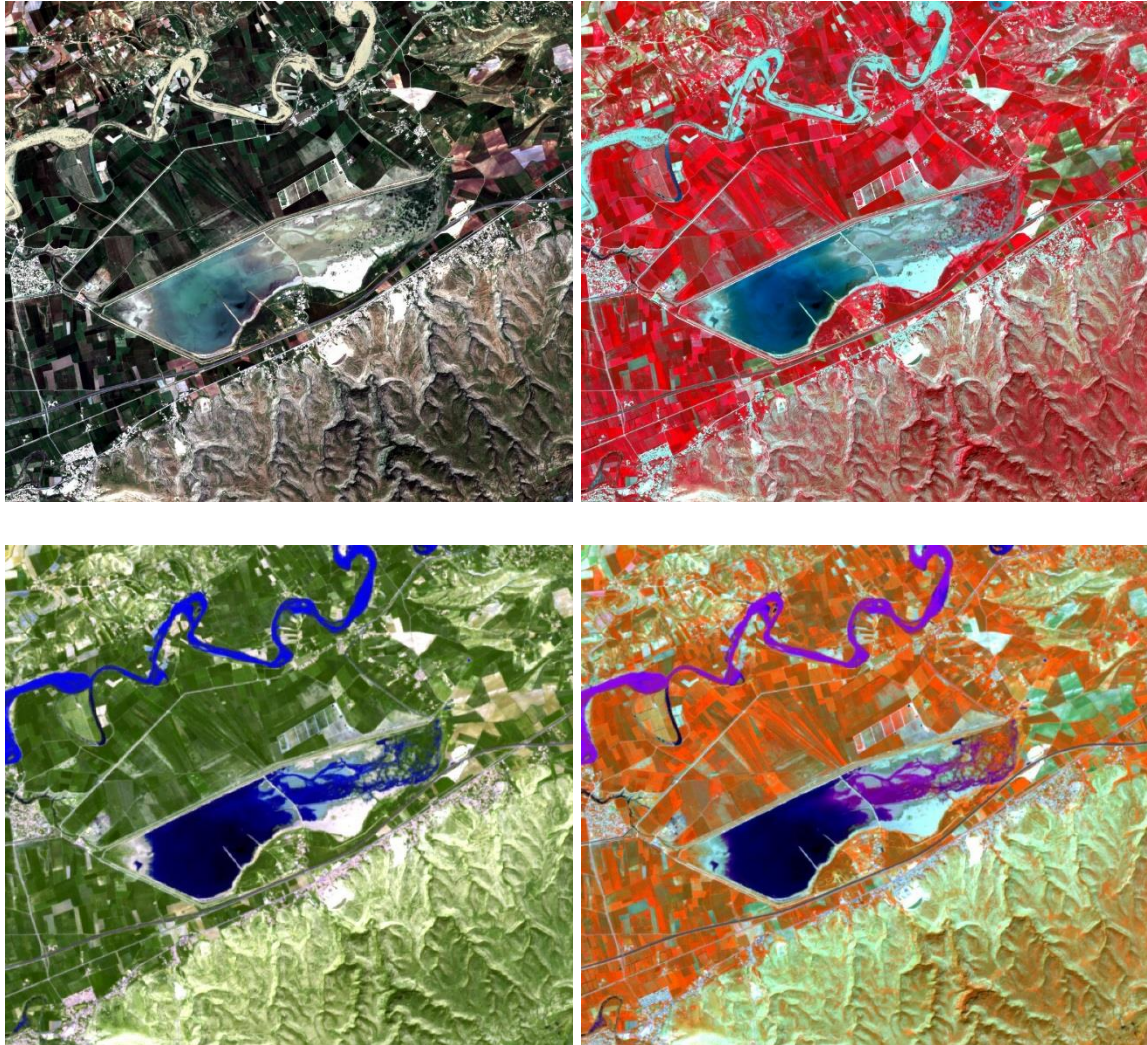


Figure 4-13: (a) image Sentinel 2 vrai-couleurs, (b) fausse-couleurs IR, (c) fausse-couleurs urbain et (d) fausse-couleurs sol/eau

4.6.3. Les indices spectraux

Des images fictives ou souvent appelées néocanaux, néo-images ou indices spectraux peuvent être créées par une combinaison mathématique de plusieurs bandes spectrales. Ces néo-images sont utilisées pour montrer des informations qui ne sont pas visibles directement dans les images en niveaux de gris.

Plusieurs types d'indices ont été proposés par les chercheurs dont chacun décrit une thématique bien précise. Les types d'indices le plus utilisés en télédétection sont :

- **Les indices de végétation** : sont très utilisés pour identifier et suivre la dynamique de la végétation ainsi pour estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux. Les plus connus sont : Ratio Vegetation Index (RVI), Difference Vegetation Index (DVI),

Normalized DVI (NDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Transformed SAVI (TSAVI), Leaf Area Index (LAI)...etc.

- **Les indices du sol** : sont utilisés beaucoup plus en sciences du sol. Ils ont été créés pour mettre en évidence diverses caractéristiques du sol telles que la brillance, la couleur, la texture et la rugosité. Les indices des sols les plus utiles sont : Brightness Soil Index (BSI), Color Index (CI), Redness Index (RI) ... etc.
- **Les indices d'eau** : les indices dits de l'eau mettent en évidence la présence des surfaces d'eau libre. Ils ont été développés de telle sorte qu'ils peuvent distinguer les eaux de surface par l'augmentation du contraste entre la classe eau et les autres classes (sol et végétation). Par conséquent, l'eau toujours prend les valeurs élevées de ce type d'indices. Les plus communément utilisés sont : Normalized Difference Water Index (NDWI), Modified NDWI (MNDWI), Automated Extraction Water Index (AEWI)... etc.
- **Les indices urbains** : ce type d'indices est souvent utilisé pour mettre l'accent sur le tissu urbain d'une zone donnée. Ils permettent de refléter les zones urbaines par une forte nuance de gris correspondant à des valeurs élevées. Les plus connus sont : Normalized Difference Built-up Index (NEBI), Indice de Cuirace (IC), Urban Index (UI)...

La figure 4-14 illustre un exemple de 4 indices spectraux de la plaine de Ghriss.

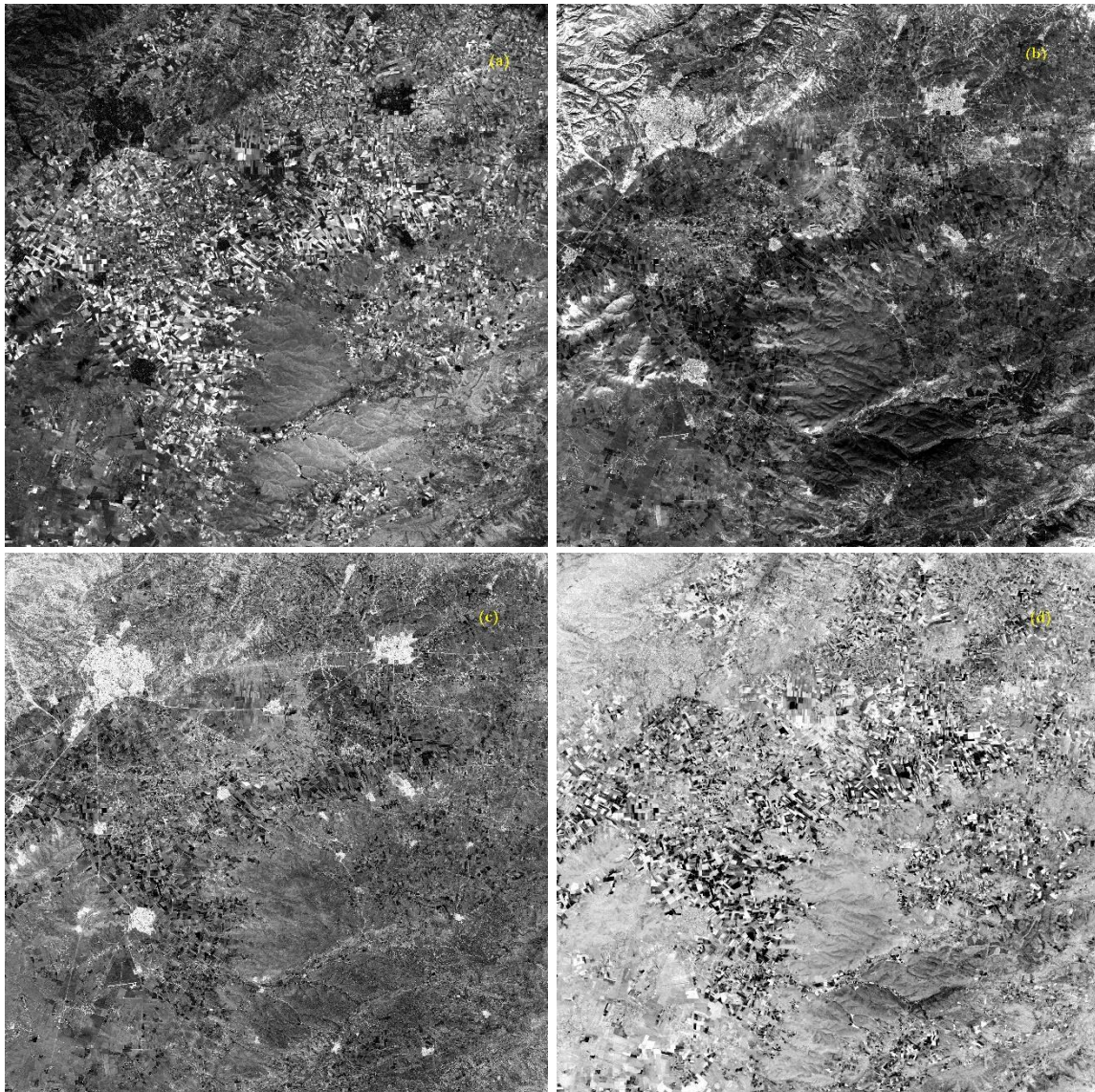


Figure 4-14: (a) Indice de végétation NDVI, (b) indice du sol BI, (c) indice de l'eau NDWI et (d) l'indice urbain NDBI de la plaine de Ghriiss

4.6.4. *Mosaïque d'images*

Parmi les traitements utiles en télédétection, nous pouvons citer l'opération appelée mosaïque d'images. Deux ou plusieurs images acquises par le même capteur sont juxtaposées et assemblées afin d'obtenir une nouvelle image qui couvre un étendu vaste du territoire qui ne peut être couvert par une seule image.

Le résultat de cette opération est une image de mosaïquage créée en plaçant côte à côte une multitude de petites images (Fig. 4-15).

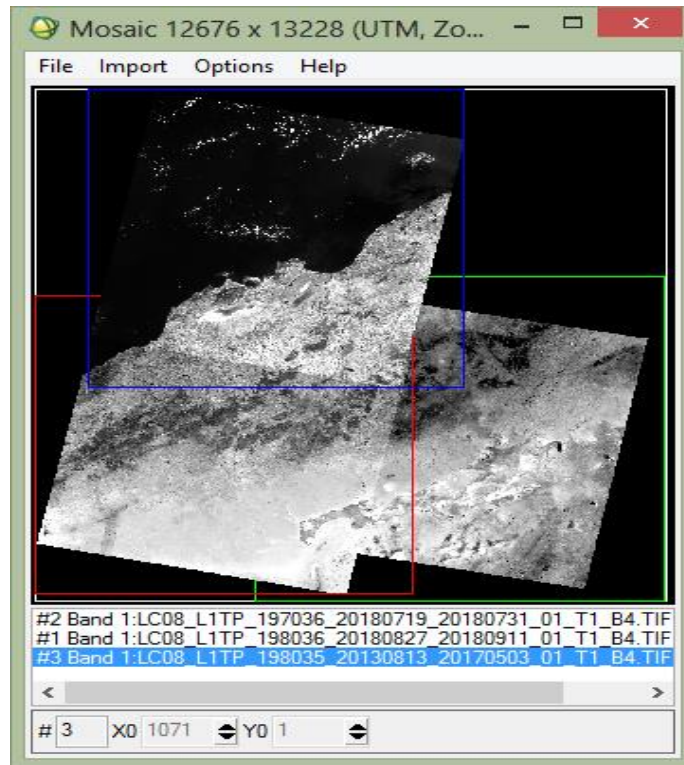


Figure 4-15: Exemple de mosaïque de trois images Landsat

4.7. Quelques fournisseurs des images satellitaires

Il existe dans le domaine de l'imagerie satellitaire de nombreux fournisseurs de données géospatiales à travers le monde. Ceux qui sont propriétaires et ceux qui sont gratuits. Les utilisateurs désirant obtenir un certain type d'images peuvent également adresser une commande au fournisseur dédié pour cela pour avoir son besoin.

Sur le web, chaque fournisseur possède une plateforme qui permet aux utilisateurs des images satellitaires de faire des recherches et/ou des commandes directement en ligne si les produits ne sont pas disponibles. Si les produits sont disponibles dans les bases de stockage, l'utilisateur peut obtenir directement une ou plusieurs images si elles sont gratuites, sinon il doit passer par le propriétaire.

Nous allons présenter quelques exemples de plateformes qui offrent la possibilité de rechercher des images satellitaires au-dessus de large zone du globe (Fig. 4-16).

4.7.1. Earth Explorer

Earth Explorer (EE) est une plateforme de United States Geological Survey (USGS) qui fournit une recherche en ligne, un affichage, une exportation de métadonnées et un téléchargement de données pour les sciences de la Terre. Les images sont fournies à partir des archives de l'USGS qui contiennent une collection complète et bien conservée des

données de plusieurs satellites d'observation de la terre tels que la série de Landsat de la NASA, Sentinel 2, Aster, MODIS, MNT Aster ... etc. La plateforme de Earth Explorer est accessible par le lien suivant : <https://earthexplorer.usgs.gov>.

4.7.2. GloVis

Comme le Earth Explorer, Global Visualization Viewer (GloVis) de l'USGS a été utilisée pour visualiser, commander et télécharger facilement des données de télédétection. GloVis donne accès gratuitement à un large éventail d'imagerie satellitaire à travers une interface simple et conviviale utilisant la technologie de pointe où l'utilisateur peut choisir le type d'image à rechercher et centrer la carte dans la zone d'intérêt. Il est disponible à travers le lien : <https://glovis.usgs.gov>.

4.7.3. Google Earth Engine (GEE)

GEE est un vaste catalogue d'images satellites et d'ensembles de données géospatiales dotées de capacités d'analyse à l'échelle planétaire. GEE est gratuit pour la recherche, l'éducation et une utilisation à but non commercial, mais il requiert une inscription. Google a rassemblé un grand nombre de données rasters sur cette plateforme hébergée sur le cloud. L'enjeu est de pouvoir disposer de séries spatiales et temporelles à partir d'images de diverses sources et diverses résolutions. Les images peuvent être visualisées directement à travers le navigateur Earth Engine de Google. GEE fournit plusieurs applications très pratiques telles que Timelapse qui permet de visualiser des séries d'images satellites sur les 35 dernières années, Climate Engine qui est particulièrement dédié au suivi des données climatiques et Global Forest Watch permettant quant à elle de suivre l'évolution de la surface forestière mondiale. GEE est accessible via l'URL suivant : <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/>.

4.7.4. Google Earth

Google Earth est une application gratuite proposée par Google permettant de survoler à n'importe quel point de la Terre, au sol ou en vue aérienne. La résolution n'est pas identique partout, mais elle est souvent très bien à tel point que l'on distingue facilement les objets au sol.

Google Earth met à la disposition des utilisateurs plusieurs fonctions telles que la recherche d'un lieu ou des infrastructures (hôtel, restaurant...), la vision en relief, la vue en rue ou en 3D. Il permet aussi de mesurer des distances et de surfaces, superposer des couches vectorielles, exporter une image, enregistrer des lieux ou tracer des itinéraires.

Google Earth est disponible en trois versions : Web, Mobile et Ordinateur.

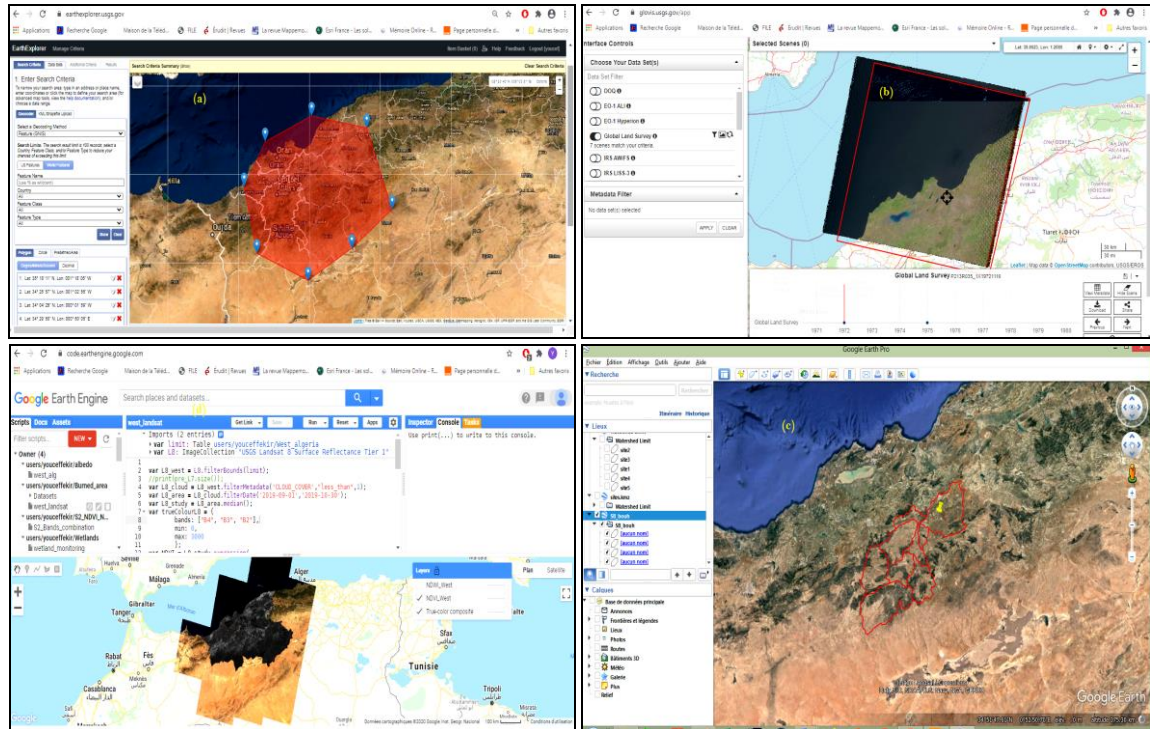


Figure 4-16: Les interfaces de (a) Earth Explorer, (b) GloVis, (c) GEE et (d) Google Earth.

5. Conclusion

La géomatique a devenu un outil très indispensable pour la surveillance et le suivi de la biodiversité. Grâce aux différentes techniques qu'elle englobe, elle est adaptée à de grandes variétés de champs d'applications notamment dans l'étude et l'évaluation des ressources naturelles. Cette dernière est sujette à une forte pression qui a induit à une dégradation qui ne cesse d'amplifier.

Le développement et l'évolution des SIG et des techniques de la Télédétection ont considérablement amélioré le suivi spatio-temporel des phénomènes causant une dégradation des différentes ressources naturelles. L'acquisition et la mise à disposition d'informations géographiques plus ou moins fiables et des données satellitaires multi-dates a rendu possible la caractérisation de l'état de la surface terrestre à n'importe quelle échelle. Ces informations sont de plus en plus utilisées dans la cartographie numérique des aléas des risques liés aux plusieurs facteurs de dégradation en particulier l'érosion hydrique, la désertification, les feux de forêts et éventuellement la sécheresse.

**Chapitre 5 : Evaluation de la
dégradation des sols et du risque
d'érosion hydrique par SIG,
Télédétection et le modèle RUSLE,
cas du bassin de Bouhanifia**

1. Introduction

Comme la plupart des pays du bassin méditerranéen, l'érosion hydrique est considérée comme l'un des plus importants facteurs de dégradation des sols en Algérie.

Grace aux conséquences négatives sur la fertilité des sols, l'envasement des barrages, la qualité des eaux superficielles et la forme de paysage, l'Algérie est gravement affectée par ce phénomène.

Plus de 45% des terres fertiles ont été endommagées par l'érosion avec une dégradation spécifique moyenne annuelle de 2000 à 4000 t/Km² (Demmak, 1982). De ce fait, l'Algérie est l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion (Achite, 2006). Une grande partie de ces terres menacées se localise dans les versants nord du pays avec plus de 12 millions d'hectares dans les zones montagneuses (MATE, 2002). Selon les chiffres de Ministère de l'Aménagement du Territoire et l'Environnement (MATE), l'érosion touche 26% de la région Est de nord Algérie, puis la zone centre avec 27% et ensuite la région Ouest qui est considérée la plus érodée avec 47%.

Dans la partie ouest de l'Algérie, cette situation critique a affecté gravement les barrages réalisés dans plusieurs bassins versants. Le barrage de Bouhanifia n'a pas échappé à ce problème (Labioud, 2004). Avec une capacité de stockage initiale de 70 Million m³, il a perdu 60% de sa capacité grâce au problème d'envasement (Remini, 1997) qui ne cesse de continuer et la capacité de stockage devient critique.

En réponse à cette situation alarmante, l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) a lancé plusieurs opérations de dragage du barrage pour vaincre les sédiments déposés par l'érosion. Le dernier a été lancé en 2013 et vise à draguer environ 6 millions de m³ de limon. Plusieurs études ont été menées sur la valorisation et la réutilisation des limons dragués du réservoir de Bouhanifia dans la fabrication de matériaux de construction (brique, tuile), l'industrie céramique et les travaux routiers (Kreirzti et al., 2019; Maarouf et al., 2018; Labioud et al., 2004).

Bien que le dragage soit utile pour la récupération du volume perdu et l'entretien du barrage (Zaoui, 2015), la gestion d'une grande quantité de sédiments extraits par dragage pose de réels problèmes à l'environnement et à l'économie (Levacher et al., 2006) et il ne résout pas le vrai problème causé. La gestion des bassins versants en amont reste un moyen très efficace pour lutter contre l'érosion et par conséquent l'envasement des barrages. Cela ne peut se faire sans une étude des facteurs causaux et une évaluation de l'érosion des sols. Ce dernier peut aider à obtenir plus de connaissances sur l'interaction

de différents facteurs et la localisation des zones vulnérables à l'érosion et est considéré comme un facteur clé de tout plan de conservation.

Il existe plusieurs modèles d'estimation de la perte des sols tels que les modèles empiriques (statistiques), semi-empiriques (conceptuels) et à bases physiques (déterministes) (Devatha et al., 2015). Le modèle de l'Equation Universelle des Pertes des Sols ou Universal Soil Loss Equation (USLE) développé par Wischmeier et Smith (1978) est le modèle le plus utilisé au monde. Il prend en compte les facteurs qui contrôlent le processus érosif (précipitations, type de sol, topographie, couvert végétal et pratiques de conservation). De nombreux modèles améliorés basés sur USLE ont été proposés dans le monde entier avec des applications diverses et spécifiques telles que USLE révisé (Revised USLE) et USLE modifié (Modified USLE).

RUSLE est une méthode empirique qui permet de prédire le taux annuel moyen d'érosion du sol d'un site en multipliant plusieurs facteurs : agressivité des précipitations (R), érodibilité du sol (K), longueur et inclinaison de la pente (LS), effet de la couverture végétale (C) et pratiques de conservation (P) (Hajji et al., 2017). L'évolution des outils d'analyse spatiale tels que les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection fait de RUSLE un modèle très pratique en raison de la simplicité et l'adaptabilité des équations utilisées pour calculer les valeurs de différents facteurs et de l'exigence de peu de données en entrée. L'intégration des facteurs du modèle RUSLE en tant que couche numérique dans un SIG rend possible l'élaboration d'une carte spatiale du taux de perte de sol qui sera très utile à un tel plan de conservation efficace.

Dans ce contexte, cette section vise à évaluer la dégradation des sols due à l'érosion à l'aide du modèle RUSLE dans le bassin versant de Bouhanifia situé à l'ouest de l'Algérie. L'approche adoptée consiste à évaluer le taux de perte de sol en $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ intégrant les facteurs du modèle RUSLE dans un environnement SIG et pour constituer une carte synthétique du risque érosif. Une analyse de la contribution des différents facteurs causaux impliqués dans le modèle utilisé est effectuée. Un scénario d'application d'un facteur estimé de pratiques antiérosives a été proposé pour mieux comprendre et montrer l'effet de ces pratiques sur la réduction des pertes de sol.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Localisation de la zone d'étude

Le bassin versant de Bouhanifia est un sous-bassin du grand bassin de la Macta situé au nord-ouest de l'Algérie. Il occupe plus de 38% de la totalité de la Macta. Il est géographiquement localisé entre les longitudes 0° 43' 15" Est et 0° 27' 21" Ouest et entre les latitudes 34° 22' 58" et 35° 32' 56" Nord. Il est borné entre les monts de Béni Chougrane au nord-est et les monts de Dhaia au sud-ouest et une partie centrale constituée de plaine et de plateau (Fig. 5-1).

Il est caractérisé par une altitude variant de 258 à 1462 m avec une superficie d'environ 5602 km² qui s'étale sur trois wilayas : Mascara, Saida et Sidi Bel Abbès. Plus de 47% de la superficie du bassin versant est située à une altitude supérieure à 800 m en amont et environ 30% en aval avec une altitude inférieure à 600 m.

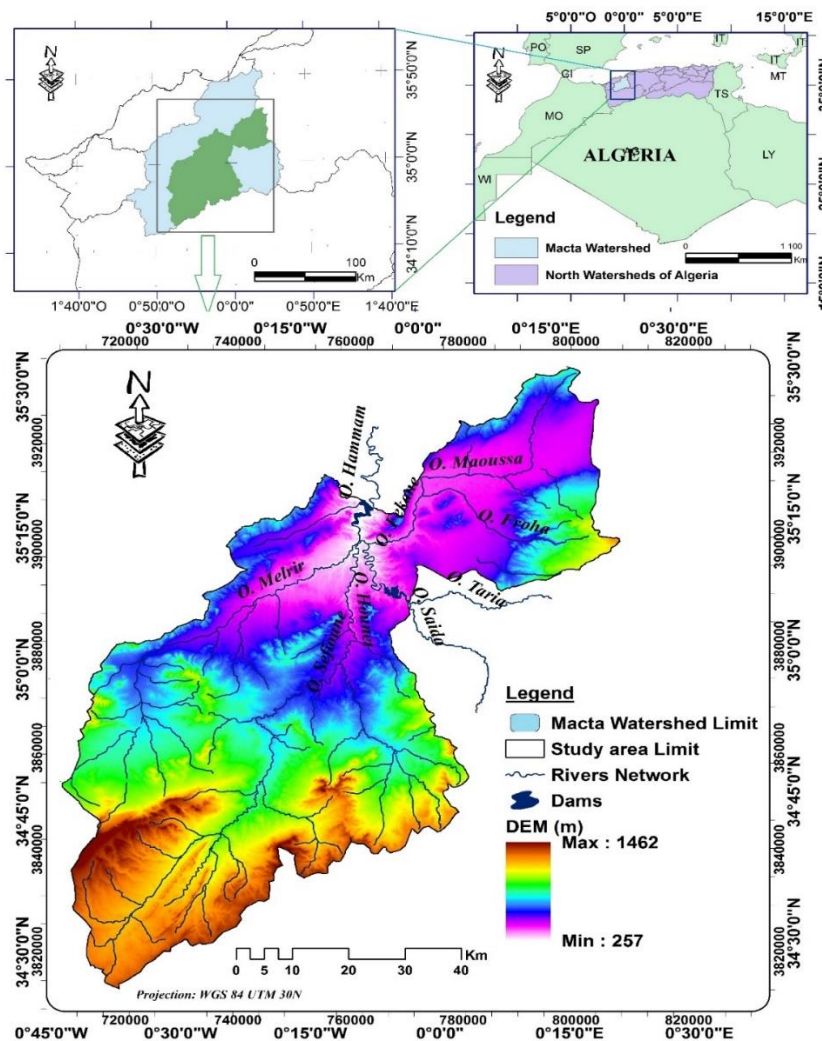


Figure 5-1 : Localisation géographique du bassin de Bouhanifia

2.2. Caractéristiques du bassin

Le climat est de type semi-aride avec un hiver froid et un été sec et chaud. La pluviométrie est d'une moyenne annuelle de 321 mm et une température moyenne de 17.2 °C (Station de Bouhanifia). Les pluies violentes de l'automne provoquent une forte érosion (Benstaali et Benayada, 2017) qui s'amplifie en appliquant à des terrains particulièrement très érodables (Morsli et al., 2004 In Mahi, 2012).

Sur le plan hydrologique, le bassin de Bouhanifia est divisé en 09 sous-bassins (Fig. 5-2) dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Le bassin est caractérisé géométriquement par une superficie de 5602.62 km² pour un périmètre de 497.87 km. La forme du bassin peut être exprimée par l'indice de compacité de Gravelius qui a été évalué à $K_G = 1,86 > 1$. Par conséquent le bassin est donc de forme allongée, ce qui permet de se faire une idée sur le débit de pointe.

Le bassin versant peut-être assimiler à une surface rectangulaire de même superficie dont ses dimensions équivalentes (longueur L et largeur l) évaluées à L=223.91 Km et l=25.02 Km.

Le bassin de Bouhanifia est drainé par l'oued Hammam qui se forme aux trois rivières point de confluence des trois oueds : Hounet, Melrir et Sahouet. Le premier est formé par la confluence des oueds de Safioun et Berbour, et le dernier se forme par la confluence des oueds de Taria et Saida (qui alimentent le barrage de Ouizert) et est grossi de l'oued Fekane.

Ce réseau de drainage avec une densité de 1.7 km/Km² et une pente moyenne de 5.7 m/Km (Benstaali et Benayada, 2017) alimente le barrage de Bouhanifia en aval par l'oued principal d'Oued Hammam.

Tableau 5-1: Caractéristiques des sous-bassins du bassin de Bouhanifia

Name	Superficie		Périmètre (Km)	Indice de Compacité
	Km ²	%		
O. Fekane	1183.16	21.12	169.50	1.38
O. Sefioun	460.98	8.23	106.62	1.39
O. Berbor	605.59	10.81	129.92	1.48
O. Louza	761.68	13.60	127.31	1.29
O. Hounet	260.52	4.65	106.93	1.85
O. Melrir	702.29	12.54	128.71	1.36
O. Sahouet	140.51	2.51	58.27	1.38
O. Mezoua	1250.95	22.33	177.10	1.40
O. El Hammam	236.93	4.23	93.85	1.71

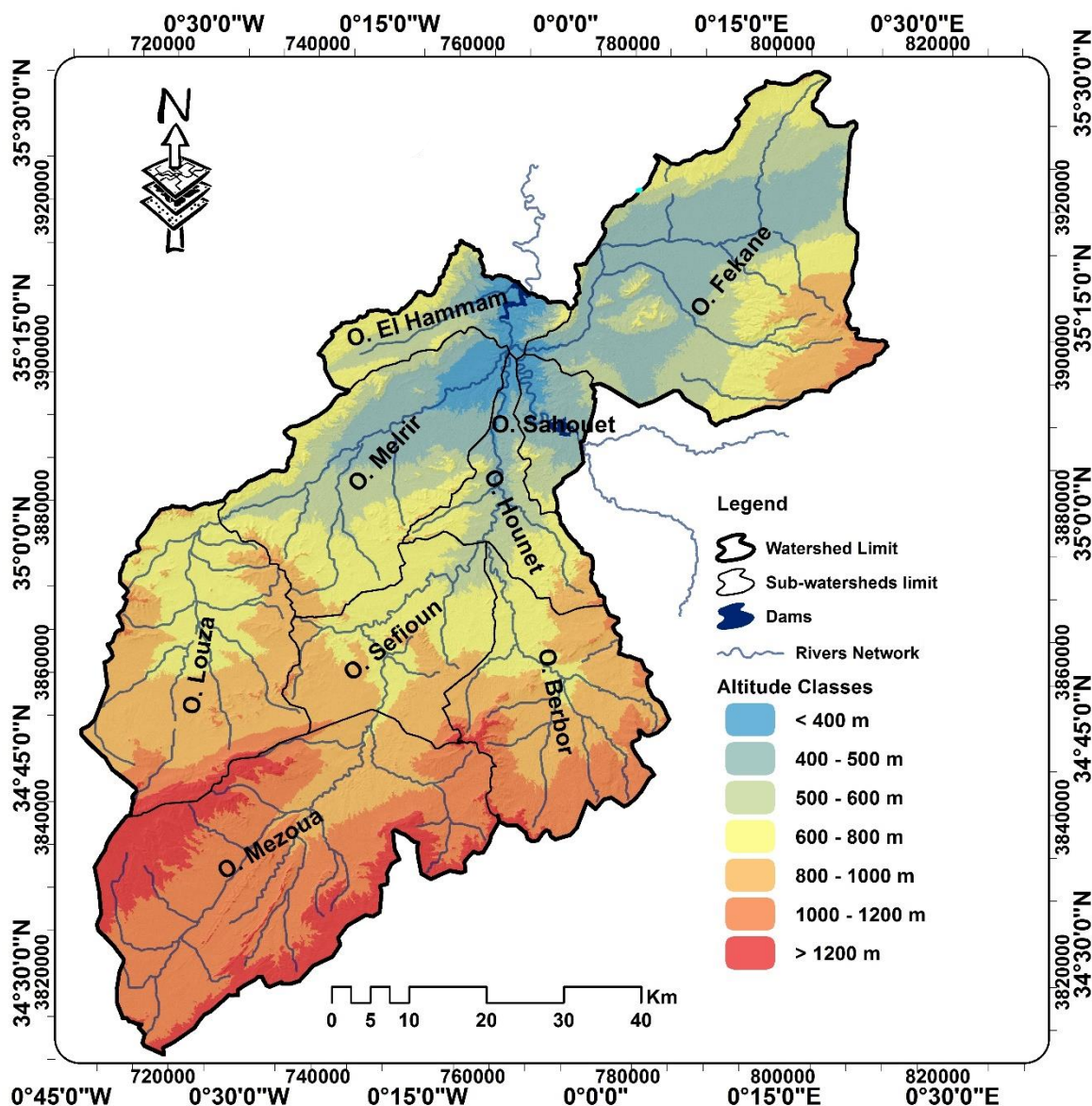


Figure 5-2 : Classes d'altitudes de la zone d'étude

2.3. Source de données

Pour la réalisation de ce travail, plusieurs données de diverses sources ont été utilisées. Ces données concernent :

- Des données cartographiques : Carte des unités des sols
- Des données de précipitations issues des stations pluviométriques
- Des images satellitaires multi spectrales
- Modèle Numérique de Terrain

Le tableau 5-2 décrit les propriétés des données utilisées.

Tableau 5-2: Description des données utilisées

Données	Format	Caractéristiques	Source
Précipitation	Excel (xls)	Annuel/Mensuel 1978-2004	Agence Nationale de Ressources Hydriques (ANRH)
3 Images satellitaires SENTINEL 2 MSI	Raster (GeoTiff)	SENTINEL 2 MSI LIC TOA Reflectance Résolution Spatiale: 10/20 m Résolution Spectrale: 13 bandes Projection: UTM/WGS84 30N Date : 2018/11/29	United States Geological Survey Global Visualization Viewer (GloVis) (https://glovis.usgs.gov/app?fullscreen=0)
Modèle Numérique de Terrain (MNT)	Raster (GeoTiff)	ASF Radiometrically Terrain Corrected high Resolution ALOS PALSAR products Résolution Spatiale: 12.5m Projection: UTM/WGS84 30N	Dataset: ASF DAAC (https://vertex-retired.daac.asf.alaska.edu/)
Caractéristiques de type de sol	RASTER (BIL) + dbf	Harmonized World Soil Database Résolution Spatiale: 30 arc second Projection: Geographic WGS84 Lon/Lat	FAO HWSD V. 1.21 (http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/HWSD_Data.html?sb=4)

2.4. Description du modèle RUSLE

L'érosion des sols est un processus complexe qui dépend de la pluviométrie, des propriétés des sols, la topographie, l'occupation du sol et l'activité humaine (Zhang, 2009). Pour l'estimation des pertes en sol par érosion, plusieurs modèles ont été développés. Certains de ces modèles sont à base empiriques ou semi-empiriques tels que USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier et Smith, 1978) et ses versions révisées et modifiées RUSLE (Revised USLE) (Renard et al, 1997) et MUSLE (Modified USLE) (Williams, 1975), SWAT (Soil and Water Assessment Tools (Arnold et al, 1998) et d'autre à base physique tels que ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation) (Beasley et al , 1980) et WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Foster et Lane , 1978).

Ces modèles se différencient par les données mises en entrée et leur aptitude de prédire l'érosion hydrique des sols (Chadli, 2016).

Dans ce travail, nous avons opté pour le modèle RUSLE (version révisée de USLE) intégré à un SIG. Il est largement utilisé dans les pays de monde et particulièrement en Algérie, Maroc et Tunisie à travers plusieurs travaux d'estimation des pertes en sols par le phénomène de l'érosion (Tab. 5-3).

Tableau 5-3: Quelques travaux utilisant le modèle RUSLE

Références	Bassin versant	Pays
Benchettouh (2017)	Oued Kramis	Algérie
Toubal (2018)	Oued Sahouet	Algérie
Toumi et al. (2013)	Oued mina	Algérie
Sadiki et al. (2009)	Oued Sahla	Maroc
El Hafid et Akdim (2018)	Oued Isly	Maroc
Chafai et al. (2020)	Oued Ayda	Tunisie
Zante et al. (2003)	Abdessadok	Tunisie

Ce modèle permet d'estimer le taux de pertes annuelles des sols par érosion par la multiplication de cinq facteurs intervenant dans le processus érosif à savoir : Le facteur d'érosivité des pluies (R), le facteur topographique (LS), le facteur d'érodibilité des sols (K), le facteur d'occupation du sol (C) et le facteur des pratiques antiérosives (P).

La formulation du modèle RUSLE est comme suit :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad 5.1$$

Avec :

A: Taux de perte des sols (ton/ha/an)

R: Erosivité des pluies (MJ.mm/ha.h.an)

K: Erodibilité des sols (ton.ha.h/ha.MJ.mm)

LS: Facteur topographique (sans dimension)

C: Facteur de l'occupation des sols (sans dimension)

P: Facteur des pratiques antiérosives (sans dimension)

Les paramètres pris en compte par le modèle RUSLE sont décrits ci-dessous.

2.4.1. L'Erosivité de Pluie (facteur R)

La pluie est la principale force motrice de l'érosion du sol (Fang, 2019). Son impact apparait directement sur la surface du sol par l'effet de battance où les agrégats sont brisés, les particules sont détachées et transportées par la suite à la faveur des eaux de ruissellement (Benkaci, 2018).

L'agressivité de la pluie est caractérisée par sa quantité, son intensité et sa durée. Plus les précipitations sont intenses et plus elles durent longtemps, plus grands sont les risques d'érosion (Stone et Hilborn, 2000).

Cette agressivité est exprimée dans le modèle RUSLE par le facteur d'érosivité R (en MJ.mm/ha.h.an). Selon Wischmeier et Smith (1978), il est défini comme la moyenne

à long terme du produit de l'énergie cinétique. Cette dernière est responsable de détachement des particules du sol sous l'effet des gouttes de pluie (E) multipliée par l'intensité maximale de pluie durant 30 minute (I₃₀) (Benchetouh, 2017). Ce facteur correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée où se manifeste l'érosion en nappe sur une parcelle nue de 9 % de pente (Roose, 1994).

Le facteur d'érosivité R est calculé en utilisant l'équation suivante (Wischmeier et Smith, 1978):

$$R = M \cdot E \cdot I_{30} \quad 5.2$$

Où

R: L'érosivité de pluie en (MJ.mm/ha.h.an)

M: Coefficient qui dépend de l'unité système de mesure

E: Energie cinétique de la pluie

I₃₀: Intensité maximale de la pluie durant 30 min

Le calcul de l'indice R en utilisant cette équation requiert des données de précipitations enregistrées pour une durée de 30 minutes. Ces données sont rarement enregistrées où la plupart des stations pluviométriques enregistrent seulement la pluviométrie journalière.

Pour combler ce manque, plusieurs auteurs ont proposé des équations alternatives pour estimer l'érosivité de pluie en n'utilisant que les précipitations mensuelles et/ou annuelles d'une période donnée. L'équation 5.3 proposée par Rango et Arnoldus (1987) a été utilisée largement en plusieurs travaux en Algérie :

$$\text{Log}R = 1.74 \times \text{Log} \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} + 1.29 \quad 5.3$$

Avec

R: facteur d'érosivité de pluie (MJ.mm/ha.h.an)

P_i: Précipitation moyenne mensuelle (mm)

P: Précipitation moyenne annuelle (mm)

Dans notre cas, nous avons utilisé cette formulation pour estimer et spatialiser le facteur R avec des données de précipitation mensuelles et annuelles issues de 24 stations pluviométriques réparties sur la surface du bassin versant, 19 stations sont situées à l'intérieur et 5 stations à l'extérieur.

2.4.2. L'Erodibilité des sols (K)

Le facteur d'érodibilité est une caractérisation de la fragilité des particules des sols d'être détachées et transportées par la pluie et le ruissellement (Koussa et Bouziane, 2018). Il se mesure sur des parcelles nues de référence de 22,2 m de long sur des pentes de 9 % et sur un sol nu, travaillé dans le sens de la pente et qui n'a plus reçu de matières organiques depuis trois ans (FAO, 1989).

L'érodibilité des sols K dépend des propriétés des sols à savoir la texture, la teneur en matière organique, la perméabilité et la structure (Roose, 1994). Wischmeier et al (1971) définie une équation pour estimer le facteur K en fonction des propriétés des sols citées ci-dessus.

$$K = \frac{0.00021.M^{1.14} \cdot (12-a) + 3.25 \cdot (b-2) + 2.5 \cdot (c-3)}{100} \quad 5.4$$

Avec M: paramètre de taille des particules du sol ou la texture (fonction de % de limon, argile et sable fin), a:taux de la matière organique, b: code de la structure du sol et c: code de la classe de perméabilité.

En l'absence des paramètres de la structure et de la perméabilité du sol de notre zone d'étude, nous avons utilisé la carte des sols mondiale publiée en Mars 2012 sous le nom Harmonized World Soil Database (HWSD) version 1.21. Cette carte regroupe les caractéristiques de plus de 16000 unités du sol sous forme d'une carte raster de 30 arc second (~1 km) de résolution et une dimension de 21600 lignes x 43200 colonnes (FAO, 2012).

HWSD est le produit d'un projet de partenariat entre plusieurs organismes :

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)
- International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA),
- ISRIC-World Soil Information, Institute of Soil Science – Chinese Academy of Sciences (ISSCAS)
- Joint Research Centre of the European Commission (JRC)

Pour l'estimation des valeurs de l'érodibilité K des différentes type du sol du bassin versant de Bouhanifia, nous avons utilisé l'équation proposé par Williams (1995) écrite sous la forme :

$$K_{USLE} = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad 5.5$$

Où:

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \cdot \exp \left[-0.256 \cdot m_s \cdot \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \quad 5.6$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right) \quad 5.7$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.25 \cdot orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95 \cdot orgC]} \right) \quad 5.8$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 \cdot \left(\frac{1 - m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp[-5.51 + 22.9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)]} \right) \quad 5.9$$

Avec :

m_s : pourcentage de contenu en sable (particule de diamètre 0.05-2 mm)

m_{silt} : pourcentage de contenu en limon (particule de diamètre 0.002-0.05 mm)

m_c : pourcentage de contenu en argile (particule de diamètre < 0.002 mm)

$orgC$: pourcentage de contenu du carbone organique

Ces paramètres sont facilement extraits de la base de données HSWD en utilisant l'application HSWD Viewer. Cette application est développée pour fournir un outil géographique simple afin d'interroger et visualiser la base de données HSWD (Fig. 5-3).

L'application HSWD Viewer nous a permis de localiser notre zone d'étude et les unités du sols associées grâce à une superposition de la couche de délimitation du bassin versant de Bouhanifia au-dessus de la carte des sols HSWD.

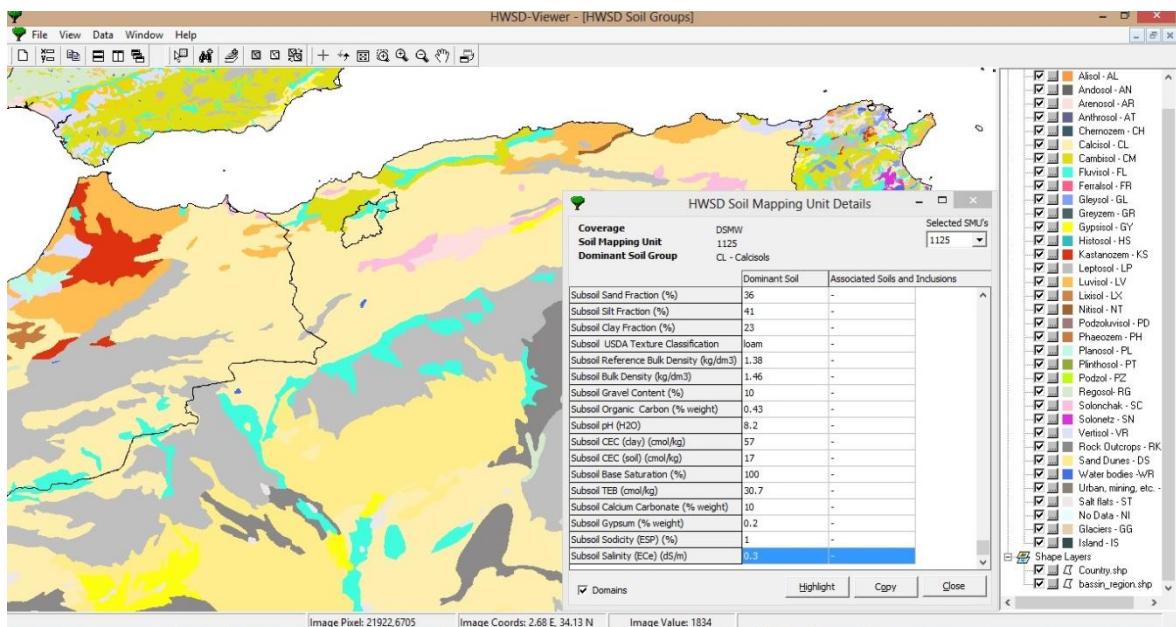


Figure 5-3: L'interface de l'outil HSWD Viewer

L'outil nous a permis aussi d'extraire les caractéristiques des unités cartographiques du sol de notre zone d'étude et faire les exporter sous format Excel.

L'association des unités cartographiques du sol et leurs caractéristiques avec un SIG permet par la suite de calculer et spatialiser le facteur d'érodibilité du sol K de tout le bassin entier.

2.4.3. Le facteur topographique LS

Le facteur LS est un facteur qui caractérise l'effet de la topographie sur le processus érosif. Il est fonction de l'inclinaison de la pente et sa longueur. Khali Aissa et al (2016) a mentionné que Fauck (1956) et Fournier (1967) ont affirmé qu'il suffit une action pluviale pour déclencher le phénomène de l'érosion, puisque ce dernier apparaît sur des pentes très faibles, de l'ordre de 2%.

Le facteur LS représente un rapport des pertes de terre sous des conditions données, aux pertes de terre en un endroit caractérisé par une inclinaison standard de 9 % et une longueur de pente de 72,6 pieds (22.13 m) (Stone, 2000). Plus la pente est forte et plus elle est longue, plus le risque d'érosion est élevé.

L'inclinaison de la pente et sa longueur sont calculées à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Dans notre étude, nous avons requis le MNT RTC (Radiometric Terrain Corrected) ALOS PALSAR d'une résolution spatiale de 12.5m x 12.5m délivré par Alaska Satellite Facility (ASF) gratuitement en ligne via le lien (<https://vertex-retired.daac.asf.alaska.edu/>).

Le calcul du facteur LS en utilisant les paramètres Inclinaison de pente et la Longueur de la pente se fait par l'équation suivante :

$$LS = \left(\frac{L}{22.13}\right)^m \cdot (0.065 + 0.045 \cdot s + 0.0065 \cdot s^2) \quad 5.10$$

L: Longueur de pente en mètre

s: Inclinaison de la pente en %

m: Paramètre dépendant de classes des pentes selon le tableau 5-4.

Tableau 5-4: les valeurs de paramètres m relatives aux classes de pentes (Wischmeier et Smith, 1978)

Classes de pentes (%)	Valeur de m
> 1	0.2
1 - 3	0.3
3 - 5	0.4
> 5	0.5

Les paramètres L, m et s qui interviennent au calcul du facteur LS sont aisément obtenus à partir du MNT en utilisant un environnement SIG. Le paramètre L est calculé en utilisant le module Slope Length du logiciel SIG SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) version 6.1 quant aux paramètres s et m sont obtenus par la dérivation de la pente en % à partir du MNT en utilisant le module Spatial Analyst de l'environnement SIG ArcGIS version 10.3.

L'utilisation des logiciels SIG nous a permis de facilement calculer les différents paramètres et élaboré une spatialisation sous forme une carte du facteur LS.

2.4.4. Le facteur d'occupation du sol

Le facteur d'occupation du sol C ou le facteur des pratiques culturales exprime l'effet du couvert végétal et son aménagement sur les pertes des sols par l'érosion. Il joue un rôle important dans la préservation des sols et l'amortissement des gouttes de pluies, le ralentissement du ruissellement et l'infiltration.

Le facteur C tenant en compte de couverture végétale dépend de :

- Le taux de couverture végétale ou la densité
- La hauteur de la couverture végétale
- L'architecture des plantes ou la structure des feuilles
- Le système d'aménagement de la couverture végétale

Les valeurs du facteur C peuvent être obtenues en faisant références à une carte d'occupation du sol d'une zone donnée, en attribuant la valeur de C associée à chaque type d'occupation. Le recours aux outils d'analyse spatiale restera un moyen efficace.

Plusieurs travaux ont proposé des méthodes alternatives pour estimer le facteur C en l'absence d'une carte d'occupation du sol actualisée. L'imagerie satellitaire et ses produits dérivés tels que les indices de végétation ont montré leur efficacité pour l'estimation et la cartographie de ce facteur. L'indice de végétation de différence normalisée ou NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est le plus utilisé dans ce cadre. Cet indice a une forte corrélation avec la couverture végétale. Il est obtenu en combinant les bandes Rouge et Proche Infra Rouge d'une image satellitaire multispectrale en appliquant la formule suivante :

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} \quad 5.11$$

Durant ce travail, pour le calcul du NDVI on a utilisé les images multispectrales acquises le 29/11/2018 par le capteur Sentinel 2 MSI (Multi Spectral Imager) avec une résolution spatiale de 10m. Les bandes, rouge et proche infrarouge, correspondent respectivement aux bandes 4 et 8 de ce capteur.

Pour couvrir la zone d'étude entière, on a téléchargé trois scènes Sentinel 2 L1C acquises à la même date, assemblées puis découpées selon la limite du bassin versant. Ces traitements ont été effectués avec l'application open source SNAP (Sentinel Application Platform) développée et distribuée par l'ESA (European Space Agency).

Les images Sentinel 2 L1C sont des images qui représentent la réflectance au sommet de l'atmosphère ou Top of Atmosphere Reflectance (TOA). Pour avoir la réflectance au sol des objets, une correction atmosphérique est indispensable. Cette action a été effectuée en utilisant le plugin Sen2Cor qui est un algorithme qui converti les données L1C au données L2A qui correspondent à la réflectance au-dessous de l'atmosphère ou Bottom Off Atmosphere (BOA) Reflectance (Uwe, 2016).

L'estimation du facteur C à partir des images du NDVI se base sur une relation linéaire entre ces deux paramètres (Toumi et al, 2013). Une régression linéaire s'applique entre deux valeurs extrêmes du NDVI et les valeurs correspondantes du facteur C tirées du diagramme expérimentale de Gitas et al (2009) (Fig 5-4.a). Les paramètres de cette régression linéaire sont illustrés dans la figure 5-4.b et l'équation de la droite de régression ainsi obtenue est :

$$C = 0.926 - 1.086 \times NDVI \quad 5.12$$

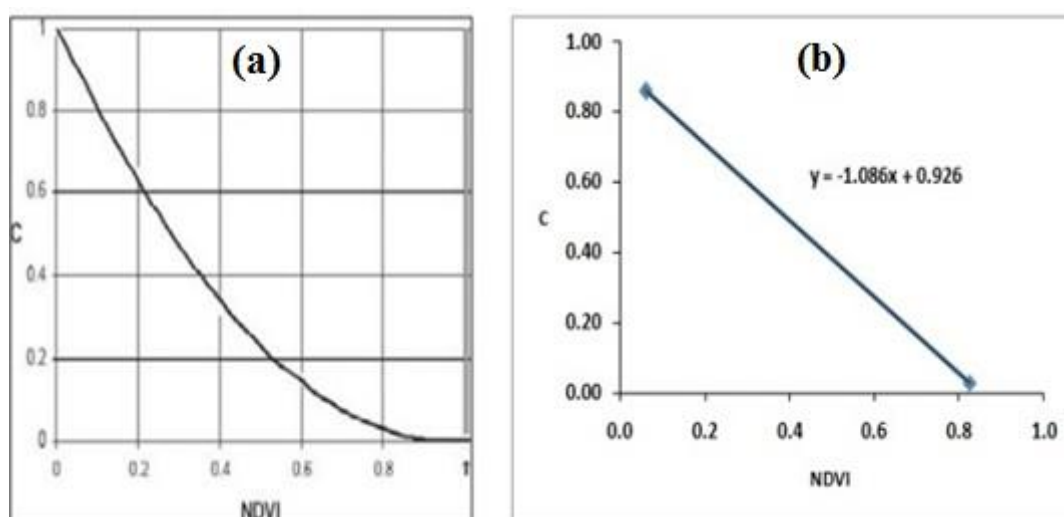


Figure 5-4: (a) Diagramme expérimental de Gitas et al. (2009) (b) Droite de regression entre NDVI et le facteur C

Cette droite de régression nous a permis de spatialiser les valeurs du facteur C sur la surface entière du bassin versant de Bouhanifia.

2.4.5. Le facteur de pratiques anti-érosive (P)

Le facteur P des pratiques antiérosives exprime l'influence des méthodes de conservation sur l'érosion. Ces pratiques concernent toutes les techniques culturales mises en œuvre pour diminuer le ruissellement et l'érosion.

Le facteur P représente le ratio des pertes de terre associées à une pratique de conservation aux pertes de terre associées à la culture en lignes dans le sens de la pente (Stone, 2000). Il prend des valeurs entre 0 et 1, la valeur 0 correspond aux terrains bien aménagés et conservés et la valeur 1 représente des endroits qui ne figurent aucune pratique de conservation.

2.5. Estimation des pertes des sols

L'estimation et la quantification du taux de pertes des sols en ton/ha.an sont réalisées en intégrant les cinq facteurs du modèle RUSLE (R, K, LS, C et P) dans un environnement SIG ARCGIS sous forme de couches raster. La spatialisation des pertes des sols se fait par la multiplication pixel à pixel des cinq couches. Les différentes étapes de la démarche adoptée sont représentées dans la figure 5-5.

Les opérations effectuées pour la création des différentes couches à partir des sources de données utilisées ont été automatisée grâce à l'outil de Model Builder du logiciel ArcGis. Cet outil nous a permis d'introduire les fonctions et les calculs nécessaires en spécifiant les entrées du modèle RUSLE. La figure 5-6 illustre l'automatisation du modèle RUSLE avec cet outil.

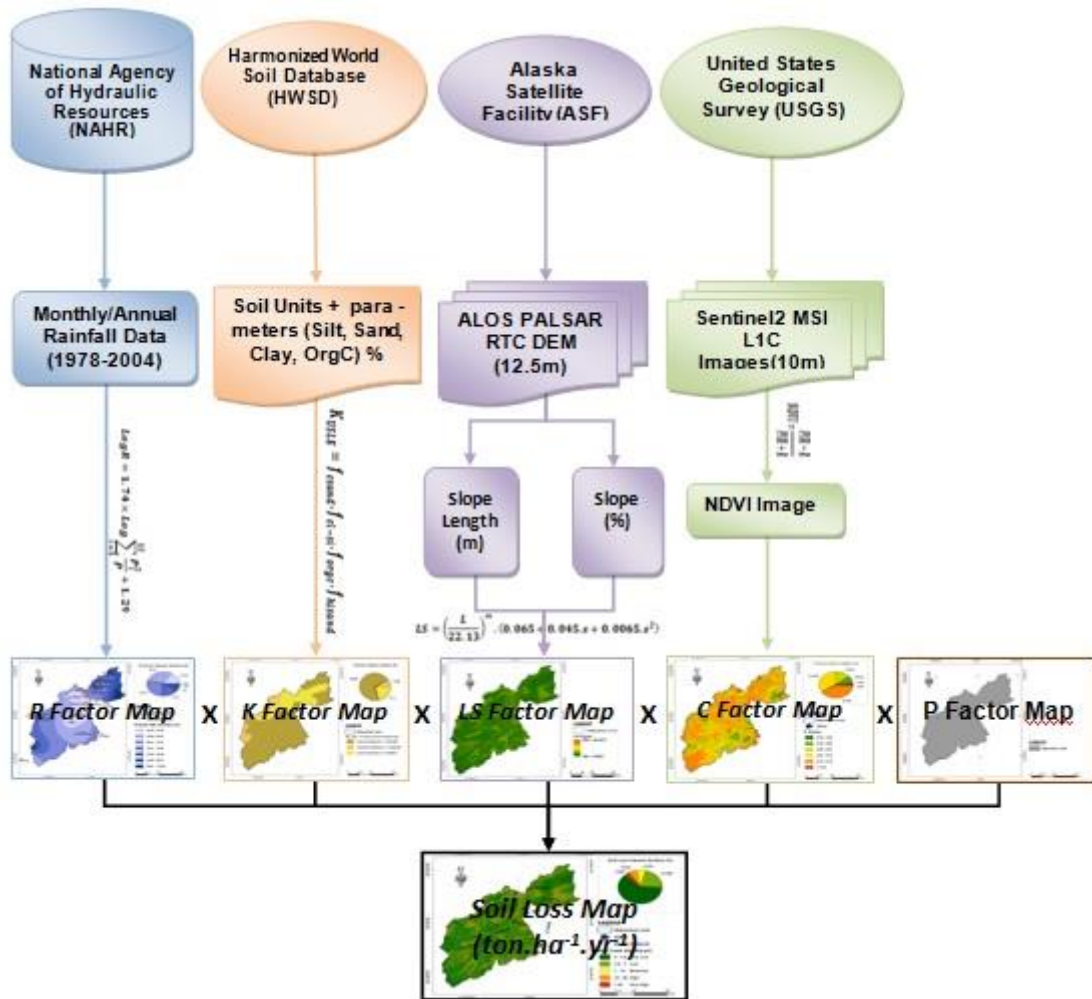


Figure 5-5: Les étapes de la méthodologie adoptée

3. Résultats et Discussions

La multiplication des couches de données des cinq facteurs du modèle RUSLE en utilisant un logiciel SIG nous a permis de calculer les pertes des sols du bassin versant de Bouhanifia et réaliser une carte spatiale du taux de pertes annuelles en ton/ha.an.

Les résultats obtenus sont présentés dans ce qui suit.

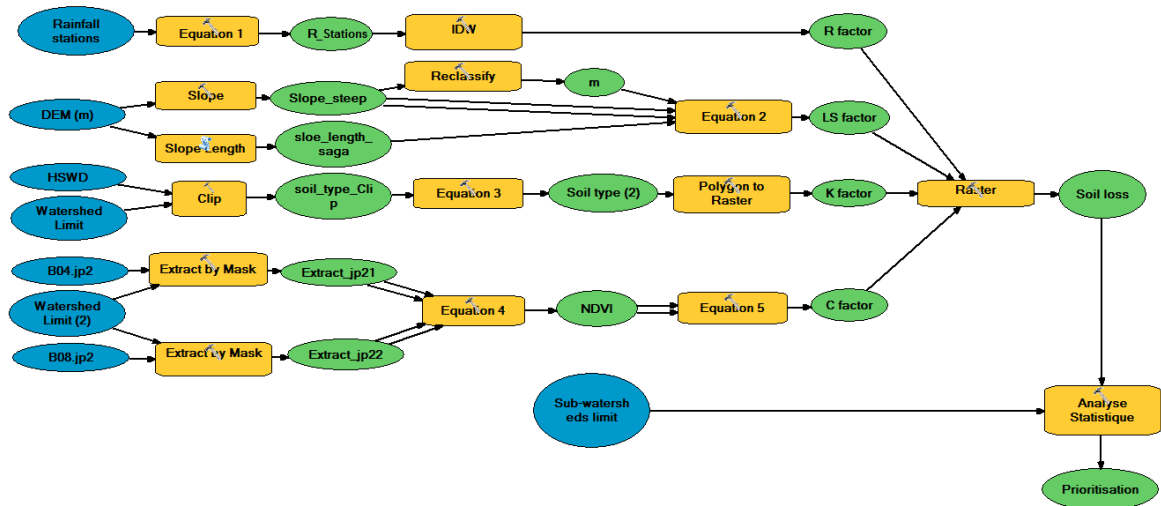


Figure 5-6 : L'automatisation du modèle RUSLE par l'outil Model Builder d'ArcGIS

3.1. Carte de l'érosivité de pluie R

Les précipitations moyennes annuelles du bassin versant de Bouhanifia varient de 193.7 à 478.9 mm correspondant respectivement aux stations de Raselma et Aouf (Tab. 5-5). L'application de l'équation 5.3 pour le calcul du facteur de l'érosivité de pluie a permis d'obtenir la valeur du facteur R pour chaque station. Ces valeurs sont extrapolées sur toute la surface du bassin versant. La carte du facteur d'érosivité des pluies R ainsi obtenue montre des valeurs variant de 52.55 à 110.64 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹ (Fig. 5-7) avec une valeur moyenne de 68.36 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹.

La valeur minimale est celle de la station de Ras Elma et la valeur maximale correspond à la station de Aouf.

La répartition spatiale des valeurs du facteur R montre que l'érosivité de pluie R augmente dans la partie nord et nord-est (stations de Aouf, Nesmoth et Ain Fares) et un peu moins au sud-ouest (station de Dhaya) et diminue dans la partie centrale du bassin versant. Plus de 55 % du bassin versant est caractérisée par un facteur R supérieur à 66 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹ (Tab. 5-6).

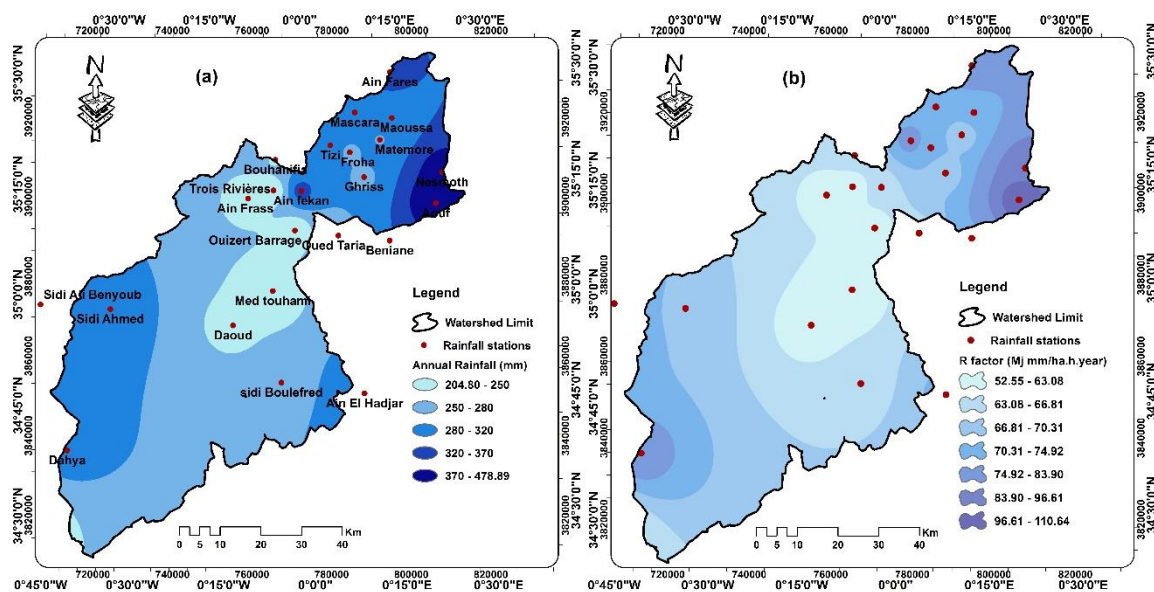


Figure 5-7: (a) La pluviométrie et (b) le facteur d'érosivité de pluie correspondant

Tableau 5-5: La pluviométrie moyenne annuelle et l'érosivité de pluie des 24 stations pluviométriques

ID	Nom station	X (m)	Y (m)	P (mm)	R (MJ.mm/ha.h.an)
1	Sidi Ahmed	204000	190000	304.1	68.96
2	Ain Frass	240100	215700	230.5	59.90
3	Dahya	191100	155200	295.8	79.05
4	Daoud	234500	184100	235.0	59.23
5	Sidi Boulefred	245800	169100	269.1	64.89
6	Med touhami	245000	192200	204.8	54.76
7	Ain El Hadjar	266500	165200	309.6	71.69
8	Quizert Barrage	251400	207000	220.6	59.00
9	Tizi	261500	227800	319.6	79.01
10	Maoussa	277300	233800	290.6	72.63
11	Ghriss	269500	219400	268.9	66.83
12	Oued Taria	262200	205100	253.6	64.59
13	Ain fekan	253610	216830	342.5	64.76
14	Matemore	274000	228500	277.6	66.36
15	Aouf	287100	211800	478.9	110.64
16	Mascara	268100	235700	317.3	73.31
17	Froha	266300	225800	269.4	70.86
18	Ain Fares	277500	245300	345.0	80.90
19	Bouhanifia	247500	225000	247.4	64.72
20	Beniane	275000	203100	320.9	74.05
21	Raselma	177700	138800	193.7	52.55
22	Nesmoth	289100	219500	418.4	96.21
23	Trois Rivières	246595	217369	225.2	59.52
24	Sidi Ali Benyoub	186550	192200	343.2	78.66

Tableau 5-6: Les classes du facteur R

Classes (MJ.mm/ha.h.an)	Surface (Km ²)	Surface (%)
52.55 - 63.08	917.66	16.379
63.08 - 66.81	1595.33	28.475
66.81 - 70.31	1613.72	28.803
70.31 - 74.92	879.75	15.703
74.92 - 83.90	434.82	7.761
83.90 - 96.61	107.81	1.924
96.61 - 110.64	53.54	0.956
Total	5602.62	100

Les valeurs du facteur R obtenues sont dans la même gamme de la carte d'érosivité du nord Algérie établie par Meddi et al. (2016) (les valeurs du facteur R varient de 37 à 100 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹). Ainsi, ces valeurs sont plus proches de celles trouvées dans plusieurs travaux dans l'ouest de l'Algérie : Neggaz et Kouri (2018) dans le bassin versant de l'Oued Abtal (40.48 à 63.85 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹), Meghraoui et al. (2017) dans les monts de Sebaa Chioukh (62.22 à 87.74 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹), Benselama et al. (2018) dans le bassin versant de l'Oued Malah (72.11 à 109.73 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹) et relativement inférieures à ceux obtenues par Kaci et al. (2017) dans le bassin versant de l'Oued Rhiou (170.352 à 219.995 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹).

3.2. Carte de l'érodibilité des sols K

La carte des sols extraite à partir de la base de données HWSD nous montre trois types de sols qui caractérisent le bassin versant de Bouhanifia: Chromic Cambisols, Calcic Cambisols et Eutric Fleuvisols (Fig. 5.8). Les valeurs correspondantes du facteur K sont ***0.033752, 0.041965 et 0.044678 respectivement.***

La distribution spatiale du facteur K (Fig. 5.9) montre que la partie nord-ouest du bassin versant de Bouhanifia est caractérisée par la valeur inférieure (avec un taux de superficie de 8.196%) et le reste du bassin est caractérisé par une valeur de K supérieure à 0.041 avec plus de 91% de la superficie du bassin (Tab. 5-7). Ces valeurs montrent la fragilité importante des sols de notre zone d'étude.

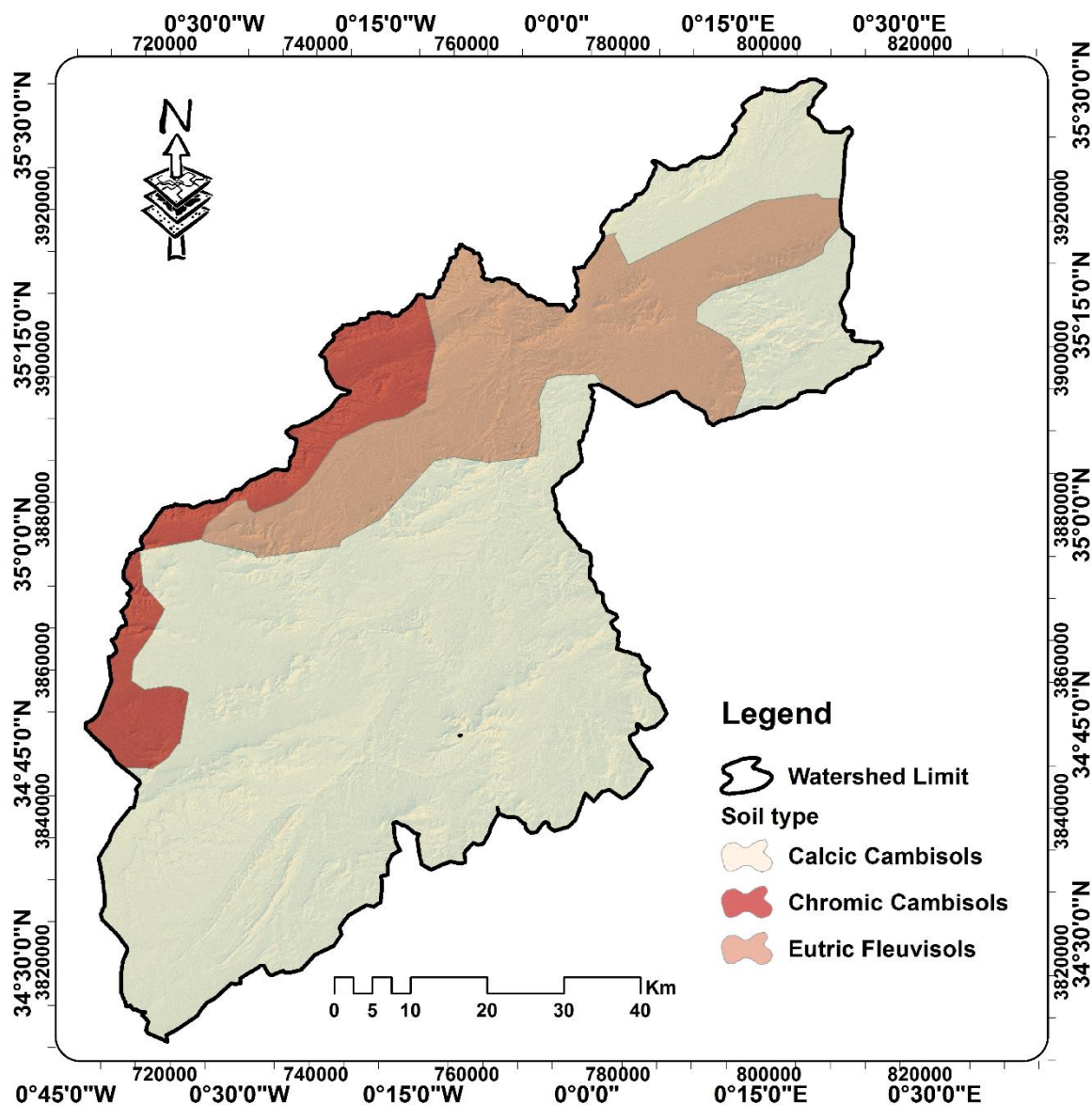


Figure 5-8: Carte des types de sols

Tableau 5-7: répartition de type de sols et le facteur K correspondant

Type de sol	K (ton.ha.h/ha.MJ.mm)	Surface (Km ²)	Surface (%)
Chromic Cambisols	0.033752	459.19	8.196
Calcic Cambisols	0.041965	3955.68	70.604
Eutric Fleuvisols	0.044678	1187.76	21.200
TOTAL		5602.62	100

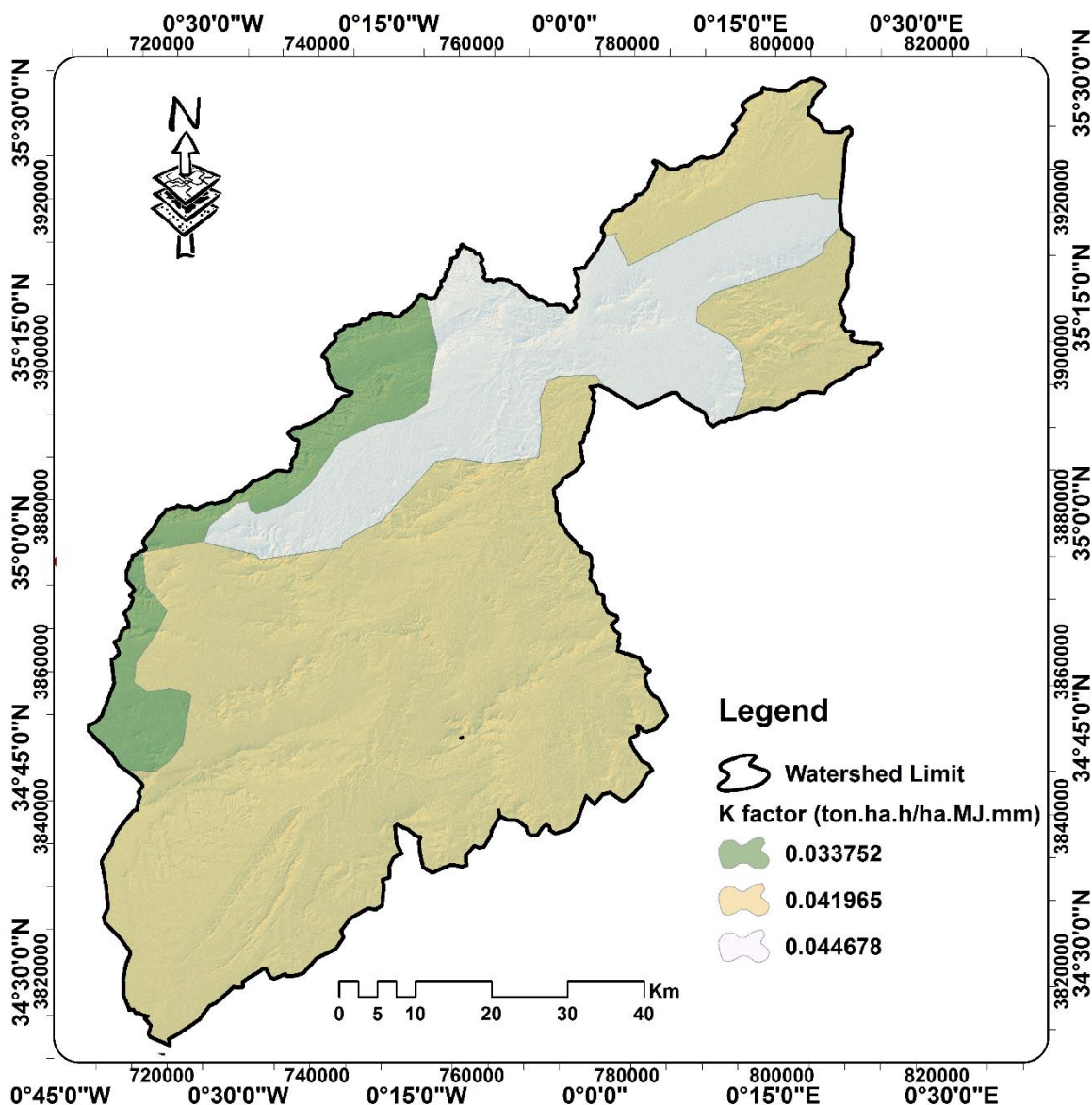


Figure 5-9: Carte de l'érodibilité du sol K

3.3. Carte du facteur LS

L'effet de la topographie s'explique par les facteurs de longueur de pente de son inclinaison. Ces deux facteurs sont combinés pour produire le facteur LS pris en compte dans le modèle RUSLE.

L'inclinaison de pente (Fig. 5-10) et sa longueur extraites du MNT ALOS PALSAR RTC ont permis de calculer (Eq. 5.10) et de générer une spatialisation du facteur LS avec une résolution de 12.5mx12.5m.

Les valeurs obtenues dans le bassin versant de Bouhanifia sont dans l'intervalle de 0.065 à 58.367 (Fig. 5-11) avec une valeur moyenne de 2,258. Les valeurs les plus élevées

se situent dans les zones très raides ($> 20\%$) et les valeurs les plus faibles caractérisent les zones à très faible pente ($<10\%$).

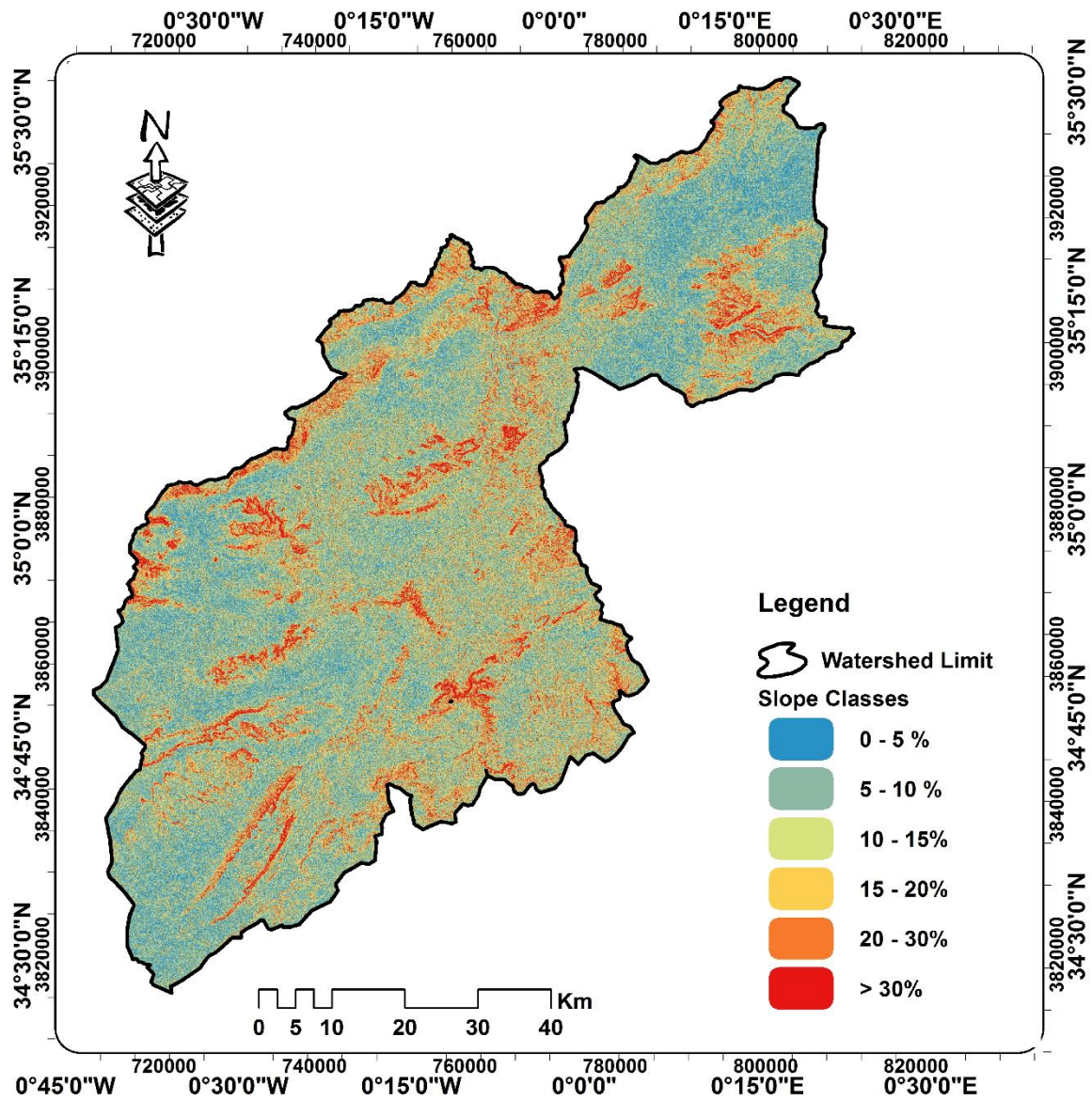


Figure 5-10: Les classes de pente du bassin de Bouhanifia

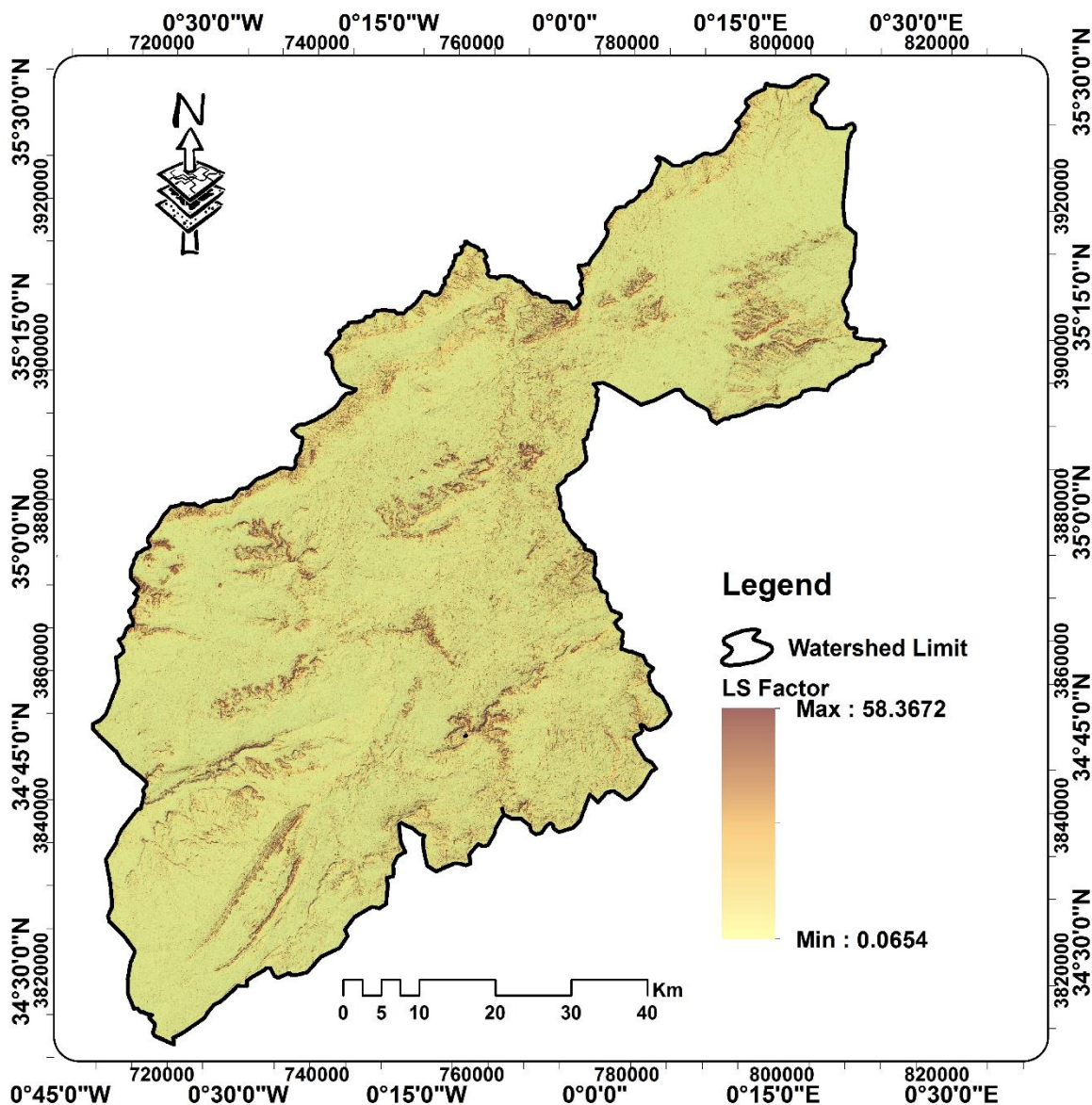


Figure 5-11: Carte du facteur LS

3.4. Carte du facteur d'occupation du sol C

Les valeurs du facteur C calculées partir du NDVI (Fig. 5-12) généré à partir de l'image satellitaire Sentinel 2 varient du 0.03 à 1. La répartition spatiale des valeurs du facteur C (Fig. 5-13) montre une domination des valeurs supérieures à 0.67 avec plus de 74% de la superficie du bassin (Tab. 5-8). Ces valeurs caractérisent des terrains nus et de parcours ce qui rend une grande partie de la zone d'étude non protégée contre l'érosion. Les valeurs de 0.48 à 0.62 caractérisent des zones de cultures avec plus de 10% de la superficie du bassin versant. Les valeurs inférieures à 0.48 avec un pourcentage inférieur à 2% de la superficie totale correspondent à des maquis et des forêts.

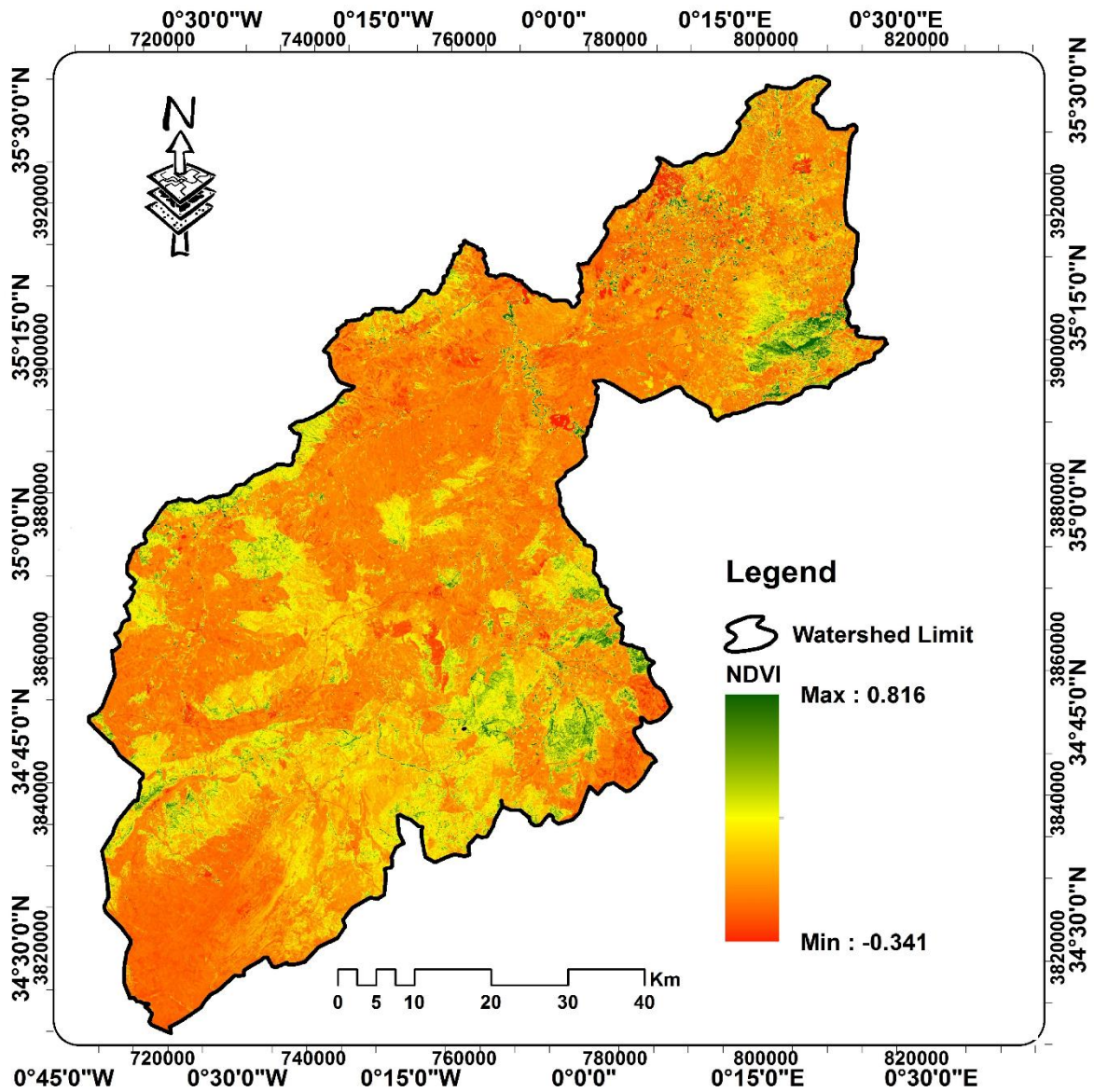


Figure 5-12 : Carte du NDVI

Tableau 5-8: Répartition des classes du facteur C

Classes	Surface (Km ²)	Surface (%)
0.03 - 0.48	58.24	1.040
0.48 - 0.62	581.28	10.375
0.62 - 0.67	766.39	13.679
0.67 - 0.72	1915.31	34.186
0.72 - 0.78	2204.95	39.356
> 0.78	76.45	1.365
TOTAL	5602.62	100

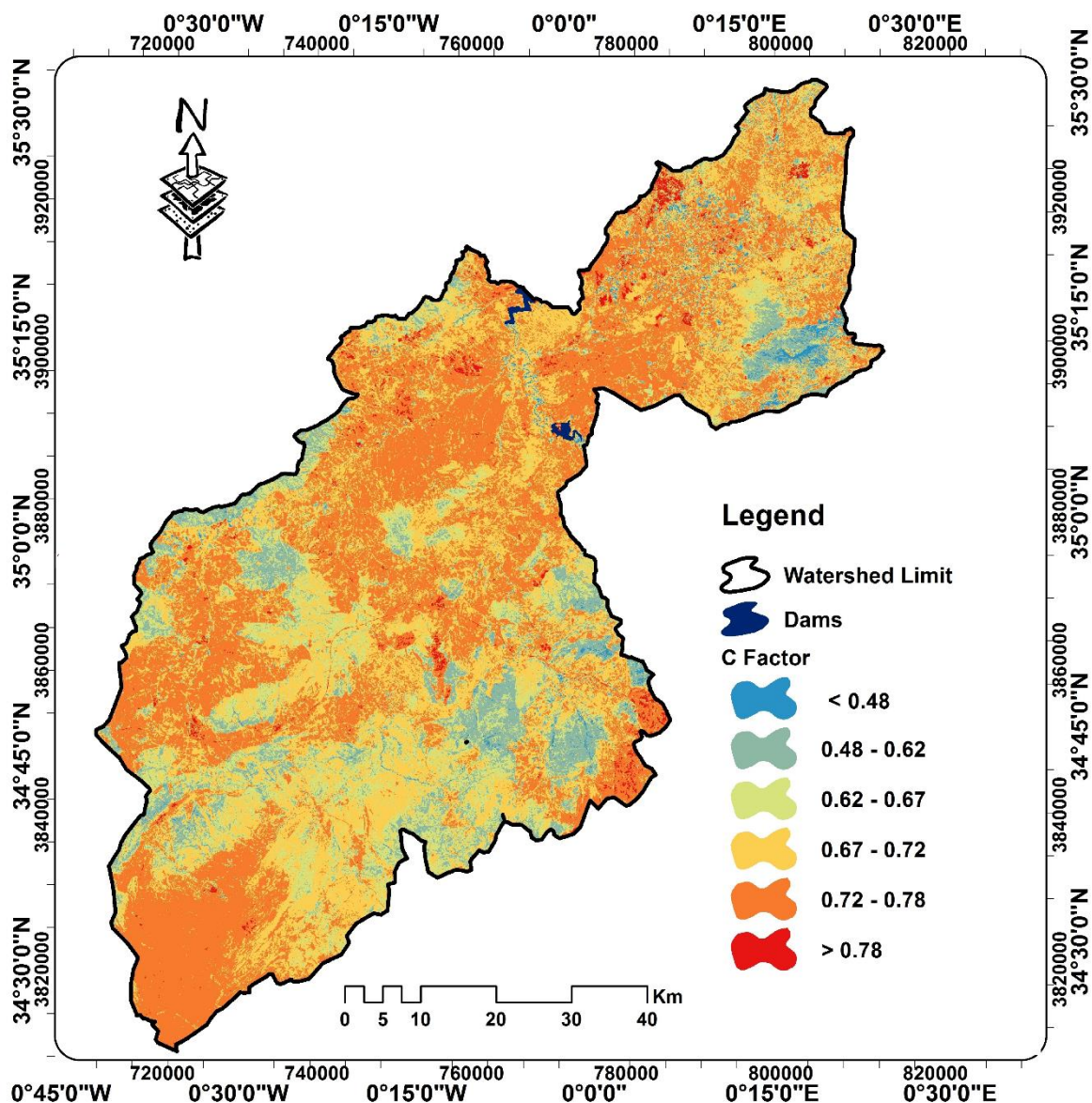


Figure 5-13: Carte du facteur C

3.5. Carte du facteur P

Le facteur P caractérise les travaux menés pour réduire l'effet de l'érosion hydrique. Dans notre zone d'étude, à l'exception de quelques endroits ponctuels aménagés sous forme de terrasses et de banquettes, il n'existe aucune pratique antiérosive. Pour cela nous avons affecté la valeur de 1 pour le facteur P entièrement au bassin versant de Bouhanifia.

3.6. Spatialisation des pertes en sols

L'élaboration des cartes des différents facteurs du modèle RUSLE nous a mené à les intégrer dans un environnement SIG pour l'estimation et la spatialisation du taux de perte en sol du bassin versant de Bouhanifia avec une résolution spatiale de 12.5x12.5m.

La carte des pertes ainsi obtenue (Fig. 5-14) montre un taux de perte annuel de 0 à plus de 187 ton.ha⁻¹.an⁻¹ avec une moyenne de 4.4 ton.ha⁻¹.an⁻¹.

La répartition spatiale des valeurs du taux de pertes annuelles du sol (Tab. 5-9) montre une dominance des classes d'érosion très faible et faible (< 7 ton.ha⁻¹.an⁻¹) avec plus de 84% de la superficie du bassin versant. Ces deux classes correspondent à des zones de faible pente. La classe modérée (de 7 à 10 ton.ha⁻¹.an⁻¹) occupent une superficie de 33477 ha équivalent à 5.97% de la superficie du bassin et caractérise des zones de relief à pente moyenne. Les deux dernières classes forte et très forte (plus de 10 ton.ha⁻¹.an⁻¹) correspondent à une portion non négligeable de 9.1% de la surface totale du bassin et elle est répartie et dispersée dans toute la zone d'étude.

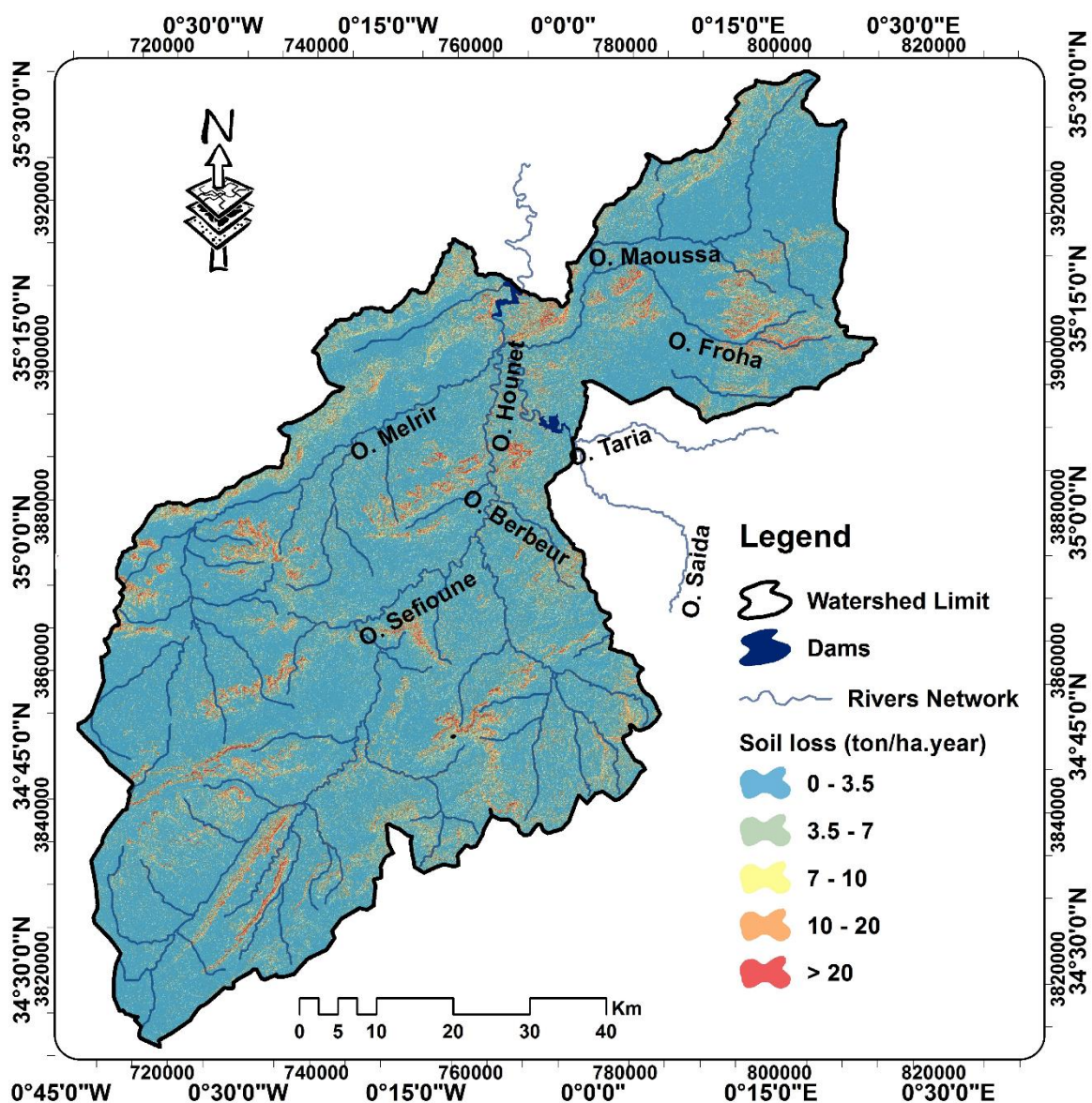


Figure 5-14: La carte des pertes en sols du bassin de Bouhanifia

Tableau 5-9 : Répartition de la superficie des classes de perte de sol

Classe de perte (ton.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Surface		Perte moyenne (ton.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Perte totale		Risque d'érosion
	Km ²	%		10 ³ .ton.an ⁻¹	%	
0 - 3.5	3565.99	63.649	1.70	607.98	24.62	Très faible
3.5 - 7	1188.21	21.208	5.01	594.81	24.09	Faible
7 - 10	334.77	5.975	9.20	308.01	12.47	Modéré
10 - 20	370.66	6.616	14.18	525.66	21.29	Elevé
> 20	142.99	2.552	30.29	433.13	17.54	Très élevé
Total	5602.62	100		2469.59	100	

Ces deux classes caractérisent les zones les plus érodées du bassin versant de Bouhanifia et se situent dans les zones à très forte pente (plus de 20%).

En fait, ces classes de pertes des sols ne contribuent pas toutes de la même manière dans le processus érosif de bassin versant de Bouhanifia. Les classes de risque élevé et très élevé, malgré sa portion de surface faible (9%) contribuent au plus de 38% de la perte annuelle totale des sols.

La perte totale de sol estimée par le modèle MUSLE dans le bassin versant de Bouhanifia est d'environ 2,46 million de ton.an⁻¹. Ces résultats sont comparés à ceux trouvés par Benstaali et Benayada (2017) avec un flux annuel de matière en suspension de 1,8x10⁶ ton.an⁻¹ et une dégradation spécifique de 343 ton.an⁻¹.km⁻² (équivalent à 3,43 ton.ha⁻¹.an⁻¹). Ces données représentent la mesure des bilans moyens de sédiments durant la période 1993-2006 à la station de jaugeage de Trois Rivières qui est la principale station de jaugeage du bassin versant de Bouhanifia. Cette station est drainée par une superficie de 5322 Km².

Des levés bathymétriques ont été réalisés dans le barrage de Bouhanifia par LSM (Laboratory Study of Maritime) Company en trois périodes 1973, 1985 et 2003. Les résultats obtenus de ces levés qui ont été collectés auprès de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (Tab. 5-10) montrent que du 1944 à 1985, le barrage de Bouhanifia a perdu 1,922 hm³ (3,6% de sa capacité) et 13,459 hm³ (28,75% de sa capacité) pour les périodes 1973-1985 et 1985-2003 respectivement (Boualem et al., 2009). La perte annuelle moyenne de capacité du barrage de Bouhanifia due à l'envasement est d'environ 0,513 hm³.an⁻¹.

Gliz (2015) a constaté que la densité des sédiments transportés à l'exutoire du bassin versant et déposés dans le barrage de Bouhanifia est d'environ 1,62 ton/m³, ce qui induit une perte moyenne de sol de 831,06 × 10³ ton.an⁻¹ et une dégradation spécifique de 1,48 ton.ha⁻¹.an⁻¹. Le rapport entre la quantité du sol érodé et celle déposée à l'exutoire du bassin donne lieu à un coefficient de délivrance de l'ordre de 33,65%.

L'analyse statistique de la contribution des différentes classes de perte de sol indique que ces classes ne contribuent pas de la même manière au processus d'érosion du bassin versant de Bouhanifia (Fig. 5-15). En fait, les classes élevées et très élevées, malgré sa petite portion de surface (9%), contribuent à plus de 38% de la perte annuelle totale de sol.

La classe modérée (7-10 ton.ha⁻¹.an⁻¹) contribue avec 11,97% de la perte totale de sol dans le bassin versant et plus de 49% pour les classes faible et très faible (<7 ton.ha⁻¹.an⁻¹). Ces données expliquent que la contribution des classes de perte en sol n'est pas proportionnelle à la surface et peut être justifiée par les différents effets des différents facteurs sur le ruissellement et l'érosion.

Tableau 5-10: Pertes de capacité du barrage de Bouhanifia (Source: Boualem et al., 2009)

Année	1973	1985	2003	Total
Capacité (hm ³)	53.487	51.565	38.106	
Perte (hm ³)	-	1.922	13.459	15.381
Perte (%)	-	3.59	28.75	
Perte Moy. (hm ³ /an)	-	0.160166	0.747722	0.513

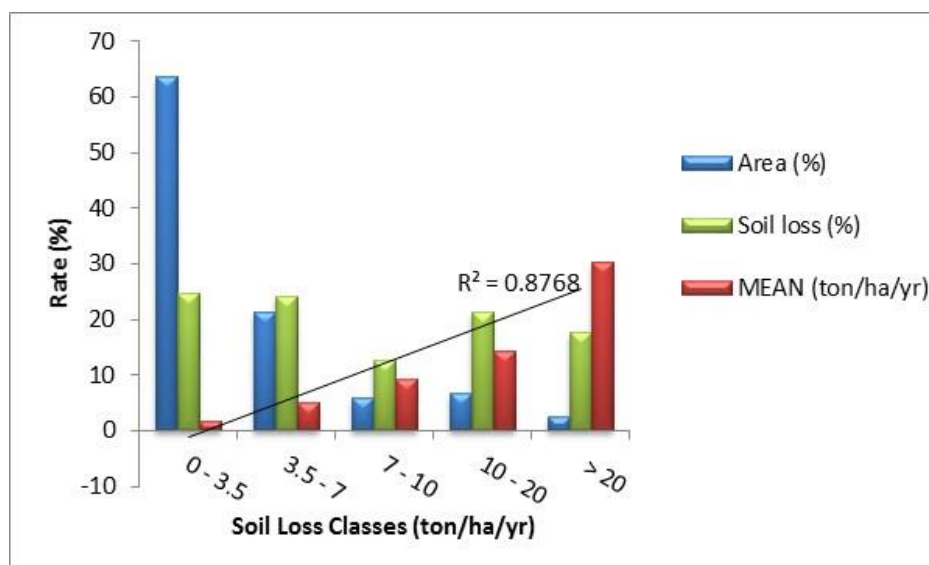


Figure 5-15: Apport des classes de perte des sols

4. Influence des facteurs MUSLE sur la perte de sol

L'impact spatial distinct des différents facteurs du modèle MUSLE conduit à une distribution spatiale non homogène des pertes de sols sur le bassin versant de Bouhanifia.

Dans le but de comprendre l'effet de chaque facteur, des variations de la perte moyenne de sol, de la proportion de superficie par rapport à la superficie totale du bassin versant et de la proportion de perte de sol par rapport à la perte totale sont effectuées pour chaque classe de facteurs.

Nous ne nous sommes intéressés qu'aux facteurs pouvant être améliorés par les pratiques de gestion, principalement les facteurs C et LS. Malgré l'effet significatif de l'érosivité des pluies (R) et du facteur d'érodibilité du sol (K) sur le processus d'érosion, ils ne sont pas pris en compte.

4.1. Influence du facteur topographique

La contribution du facteur topographique à la perte totale de sol est exposée pour comprendre son influence sur le processus d'érosion. Pour cela, nous avons analysé la variation de l'effet des classes de pente en fonction de la valeur moyenne de perte de sol calculée, de la proportion de perte de sol par rapport à la perte totale de sol et de la proportion de la superficie par rapport à la surface du bassin versant (Tab. 5-11). La classification du gradient de pente retenue dans ce contexte est celle utilisée par Toumi et al. (2013).

La figure 5-16 montre une relation linéaire entre les valeurs moyennes de perte de sol et l'inclinaison de la pente. La valeur moyenne de perte de sol augmente de 1,21 ton.ha⁻¹.an⁻¹ pour la classe de pente 0-5% à 20,55 ton.ha⁻¹.an⁻¹ pour la classe de pente supérieure à 30%. Avec un coefficient de corrélation R² de 0,79, l'effet de pente sur le taux d'érosion est considéré comme plus important. De plus, la classe de pente >20% contribue à plus de 45% de la perte totale de sol, contre moins de 23% pour la classe de pente <10%.

Tableau 5-11: La répartition des pertes des classes de pentes

Classe pente	Surface		Perte Moy. (ton.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Perte totale	
	Km ²	%		10 ³ .ton.an ⁻¹	%
0 - 5 %	1022.65	18.253	1.213	124.07	5.02
5 - 10 %	1861.25	33.221	2.129	396.35	16.05
10 - 15%	1152.52	20.571	3.649	420.56	17.03
15 - 20%	716.69	12.792	5.654	405.25	16.41
20 - 30%	552.64	9.864	9.289	513.37	20.79
> 30%	296.88	5.299	20.547	610.01	24.70
Total	5602.62	100		2469.61	100

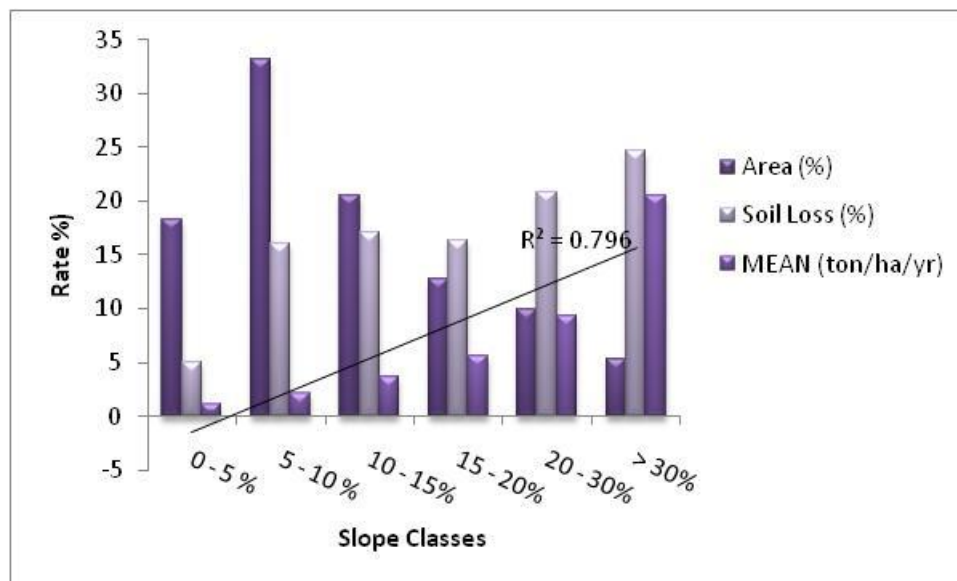


Figure 5-16: L'effet de la pente sur les pertes en sol

4.2. Influence de la couverture végétale

Pour mieux étudier l'effet de la couverture végétale sur la perte de sol, nous avons calculé la variation de la proportion de superficie, la proportion de perte de sol et les valeurs moyennes de perte de sol pour chaque classe de facteur C.

Les valeurs moyennes de perte des classes de facteurs C augmentent de 3,34 à 5,50 puis diminuent à 2,92 puis augmentent à 11,91 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (Tab. 5-12). Ces variations montrent l'influence de la végétation sur le taux d'érosion qui est relativement moins important que l'effet de la topographie. Le coefficient de corrélation obtenu avec un R^2 égal à 0,41 est dû à la diminution de la perte moyenne de la classe 0,72-0,78 (Fig. 5-17). Cette classe occupe une proportion de 39,35% de la superficie du bassin versant et contribue à la perte totale de sol avec 26,07%.

L'examen des différentes valeurs de facteurs caractérisant cette classe montre des valeurs de facteurs R et K d'environ $67,85 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ et 0,042 respectivement et une faible valeur du facteur LS d'environ 1,7.

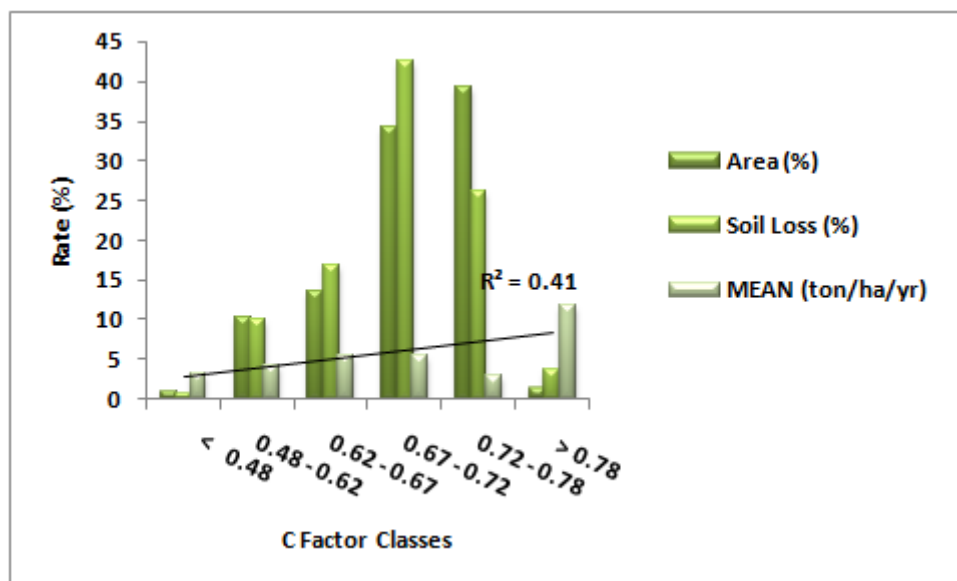


Figure 5-17: L'effet du facteur C sur les pertes en sol

Tableau 5-12: Répartition des pertes des classes du facteur C

Classe C	Surface		Perte Moy. (ton.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Perte totale	
	Km ²	%		10 ³ .ton.an ⁻¹	%
0.03- 0.48	58.24	1.040	3.34	19.46	0.79
0.48 - 0.62	581.28	10.375	4.29	249.65	10.11
0.62 - 0.67	766.39	13.679	5.39	413.16	16.73
0.67 - 0.72	1915.31	34.186	5.50	1052.55	42.62
0.72 - 0.78	2204.95	39.356	2.92	643.83	26.07
> 0.78	76.45	1.365	11.91	91.06	3.69
TOTAL	5602.62	100		2469.69	100

4.3. Contribution à la perte de sol des sous-bassins versants et priorité d'intervention

En plus de l'analyse de l'impact du couvert végétal et des pentes sur le processus érosif, nous avons effectué l'apport des 09 sous-bassins versants qui constituent le bassin de Bouhanifia à la perte totale des pertes en sol.

Pour chacun des 9 sous-bassins versants, on a calculé la valeur moyenne de la perte de sol, la proportion de perte de sol par rapport à la perte totale et le pourcentage de superficie de chaque classe de perte de sol. Les paramètres calculés montrent que la perte annuelle de sol générée par les 9 sous-bassins versants varie de 78.06×10^3 ton.an⁻¹ à $529,09 \times 10^3$ ton.an⁻¹ correspondant respectivement aux sous-bassins versants d'Oued Mezoua et Oued Fekane (Tab. 5-13).

Tableau 5-13: Superficie, perte totale et perte moyenne de sol des 9 sous-bassins versants

Sous bassin	Proportion des classes de perte (%)					Surface		Perte Moy. (ton/ha.an)	Perte total	
	0-3.5	3.5-7	7-10	10-20	> 20	Km ²	%		10 ³ ton/an	%
O. Fekane	20.67	21.64	21.86	22.04	22.57	1183.16	21.118	4.472	529.11	21.42
O. Sefioun	8.86	7.84	6.82	6.29	5.56	460.98	8.228	3.864	178.13	7.21
O. Berbor	9.96	11.94	12.99	12.95	11.37	605.59	10.809	4.807	291.09	11.79
O. Louza	14.73	11.73	10.89	10.98	13.73	761.68	13.595	4.009	305.36	12.36
O. Hounet	4.00	5.40	5.94	6.73	6.92	260.52	4.650	5.437	141.65	5.74
O. Melrir	12.48	12.69	12.96	12.84	12.49	702.29	12.535	4.461	313.27	12.68
O. Sahouet	2.16	2.85	3.27	3.57	3.91	140.51	2.508	5.555	78.06	3.16
O. Mezoua	23.42	21.42	19.83	18.38	16.49	1250.95	22.328	4.001	500.49	20.26
O. El Hammam	3.70	4.47	5.44	6.20	6.97	236.93	4.229	5.598	132.63	5.37
TOTAL						5602.62	100	-	2469.76	100

La figure 5-18 montre que les sous-bassins versants d'Oued Fekane et d'Oued Mezoua contribuent à plus de 42% de la perte totale de sol du bassin versant du trou, qui sont classés comme prioritaires. Les sous-bassins versants Oued Melrir, Oued Louza et Oued berbor sont classés en priorité de niveau moyen avec une proportion de perte de sol de 12,68%, 12,36% et 11,79% respectivement. Les autres sous-bassins versants (Oued Sefioun, Oued Hounet, Oued El Hammam et Oued Sahouet) sont en faible priorité.

Selon ces analyses, une cartographie de niveau de priorité d'intervention pour appliquer des pratiques de conservation adéquates aux sous-bassins versants est établie (Fig. 5-18). Cela serait très utile pour une meilleure connaissance de la contribution de chaque sous-bassin et pour orienter la mise en œuvre des pratiques de soutien par niveau de priorité en tenant compte des conditions spécifiques du site.

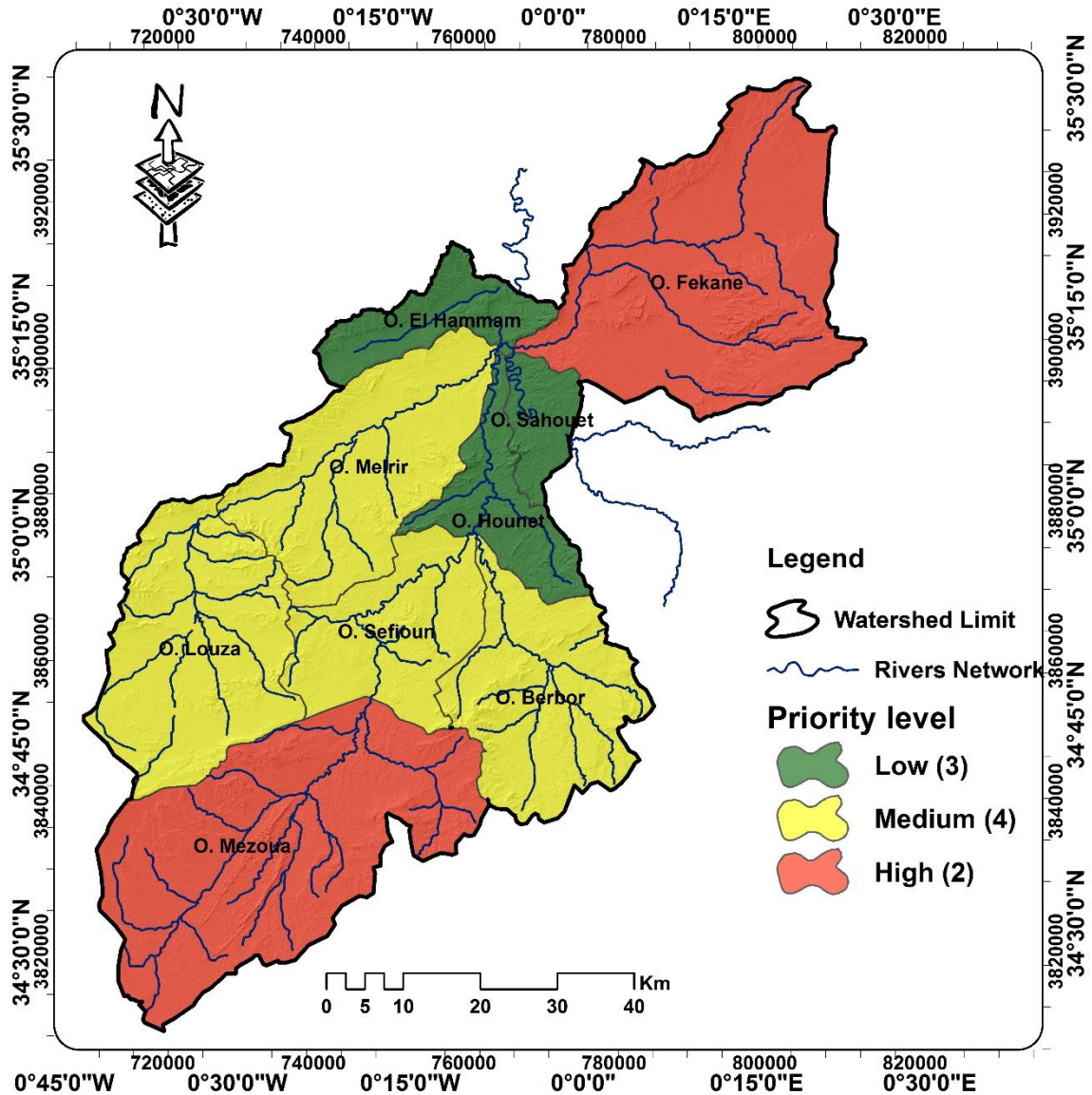


Figure 5-18: Carte du niveau de priorité d'intervention des sous-bassins versants

4.4. Impact des pratiques antiérosives sur l'érosion des sols

Les pratiques et les méthodes de contrôle de l'érosion, exprimées dans le modèle RUSLE par le facteur P, jouent un rôle très efficace dans la réduction des pertes en sol. En effet, le choix succinct d'une pratique est très essentiel pour une meilleure gestion durable du sol.

La sélection d'une pratique de conservation et donc de la valeur du facteur P correspondant dépend du type de la couverture du sol et de la topographie (Fang et al., 2019). Sans aucunes informations précises sur la couverture terrestre, plusieurs études telles que Morgan (2005) et Panagos et al. (2015) ont proposé une méthode alternative pour estimer les valeurs du facteur P en fonction des valeurs de la pente.

Afin de montrer l'impact de ces pratiques sur le comportement du phénomène érosif et la dynamique de la perte en sol, un scénario a été réalisé afin d'estimer les valeurs du facteur P dans le bassin versant de Bouhanifia en utilisant la méthode proposée par Panagos et al. (2015) qui est basée sur l'inclinaison de la. Cette méthode est utilisée dans plusieurs travaux tels que Toubal et al. (2018), Benavidez et al. (2018) et Ozsahin et Eroglu (2019). Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau 5-14.

En appliquant les valeurs estimées du facteur P (Fig. 5-19) pour estimer le taux d'érosion dans le bassin versant de Bouhanifia, le taux annuel moyen de perte de sol est diminué de 4,4 à 3,4 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, ce qui correspond à une réduction de l'ordre de 22,27% de la perte de sol. La carte de perte de sol qui en résulte (Fig. 5-20.b) est comparée à la précédente (Fig. 5-20.a). L'analyse de la superficie des différentes classes de perte de sol sans et sous les mesures de pratiques de support est également examinée. En effet, l'inclusion des valeurs estimées du facteur P a réduit le rapport de surface des classes de perte de sol de 3,5-7, 7-10 et > 10 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ de 7,44%, 1,61% et 1,25% et une augmentation remarquable du rapport de surface de la classe de 0 à 3,5 de 10,32% (Tab. 5-14). Ces résultats montrent l'application efficace de pratiques de conservation et de soutien qui peuvent réduire considérablement la perte de sol due à l'érosion.

La combinaison de diverses pratiques est plus efficace qu'une seule pratique pour contrôler l'érosion dans les sols hautement érodables (Blanco-Canqui et Lal, 2008).

Tableau 5-14 : Les valeurs du facteur P estimées à partir du gradient de la pente (source: Panagos et al., 2015)

Pente (%)	P
9 - 12	0.6
12 - 16	0.7
16 - 20	0.8
20 - 25	0.9
> 25	0.95

Tableau 5-15: Dynamique des pertes en sol avant et après les pratiques antiérosives

Classes ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$)	Sans pratiques		Avec pratiques		Différence	
	Surface (Km^2)	Surface (%)	Surface (Km^2)	Surface (%)	Surface (Km^2)	Surface (%)
0 - 3.5	3565.99	63.649	4144.42	73.974	578.44	10.325
3.5 - 7	1188.21	21.208	771.13	13.764	-417.09	-7.444
7 - 10	334.77	5.975	244.25	4.360	-90.52	-1.616
10 - 20	370.66	6.616	316.38	5.647	-54.28	-0.969
> 20	142.99	2.552	126.38	2.256	-16.61	-0.297
Total	5602.62	100	5602.62	100		

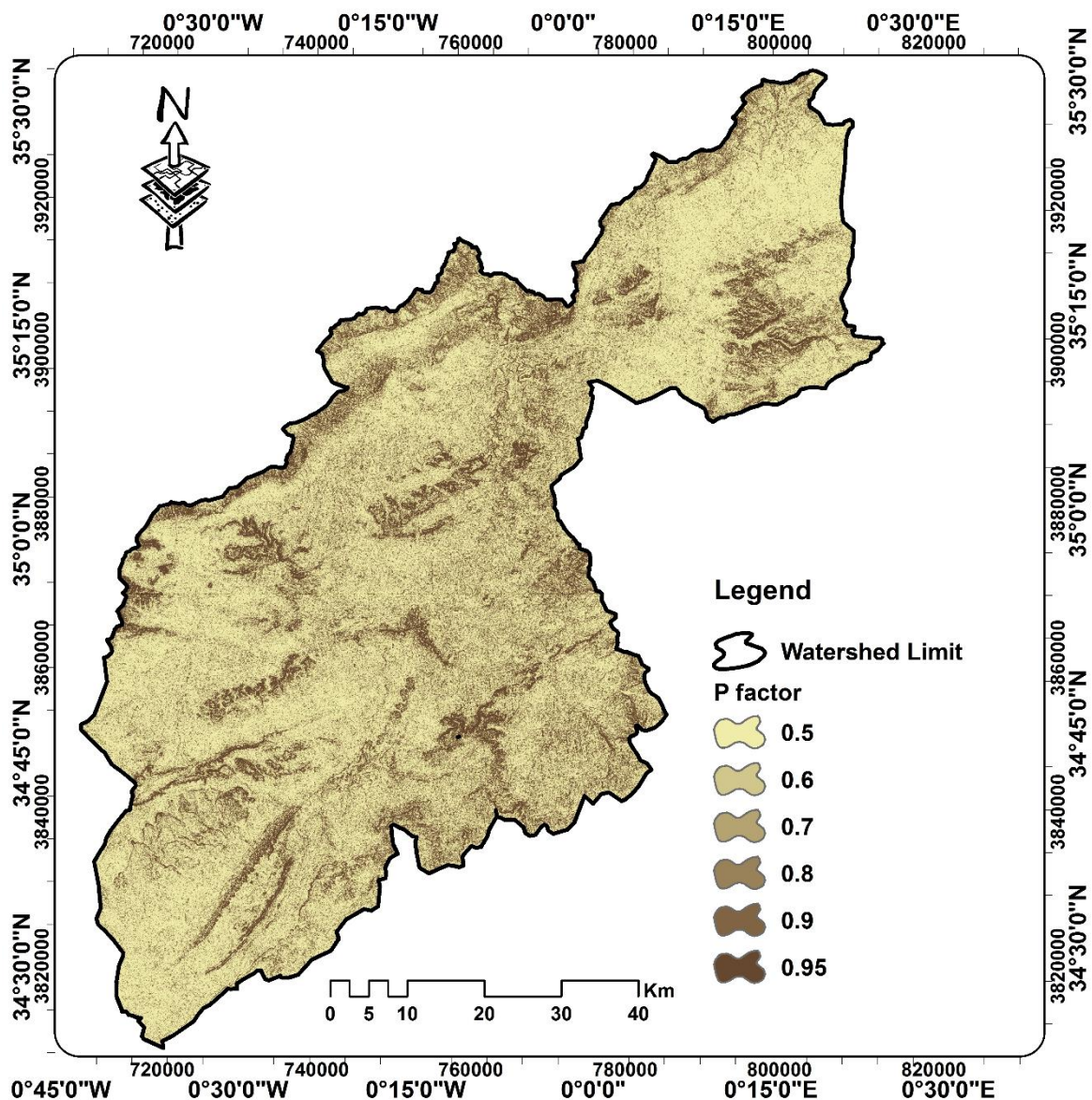


Figure 5-19: La carte du facteur P estimé à partir des pentes

5. Conclusion

Le barrage de bouhanifia dans l'ouest de l'Algérie est soumis à un taux d'envasement très élevé après celui de Fergoug en raison du taux de sédimentation et d'érosion des sols c. L'étude et l'analyse des facteurs à l'origine de ce phénomène d'érosion deviennent une nécessité pour une planification efficace de la gestion et du développement du bassin versant qui draine le barrage de Bouhanifia afin de lutter contre ce problème. L'objectif principal de cette étude est l'évaluation quantitative du taux annuel de perte de sol dans le bassin versant de Bouhanifia en associant les facteurs du modèle RUSLE au SIG en bénéficiant de ses puissants outils d'analyse spatiale et d'édition.

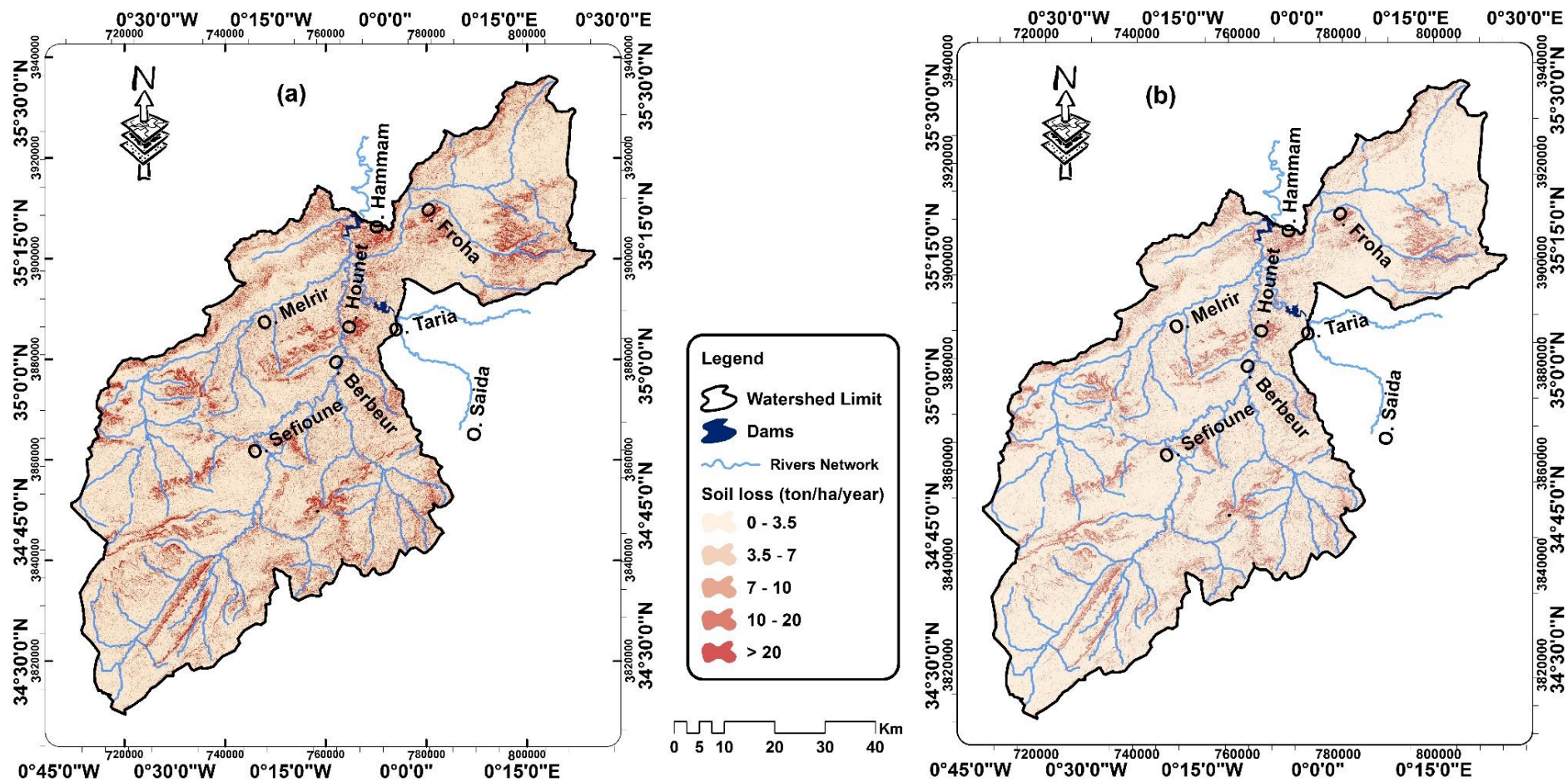


Figure 5-20: La carte de pertes des sols (a) sans pratiques (b) avec pratiques antiérosives

La disponibilité et l'utilisation de données de télédétection à très haute résolution spatiale (MNT de 12.5x12,5 m et images satellites SENTINEL 2 de 10mx10m) nous ont permis de dresser une carte synthétique de la perte de sol à une échelle très intéressante de 12,5mx12,5 m. Les taux annuels estimatifs de perte de sol dans le bassin versant de Bouhanifia varient de 0 à plus de 187 ton.ha⁻¹.an⁻¹ avec une valeur moyenne de 4,4 ton.ha⁻¹.an⁻¹. La carte de distribution spatiale de la gravité de l'érosion des sols obtenue montre que les classes élevées et très élevées (10-20 et > 20 ton.ha⁻¹.an⁻¹) représentent 9,1% de la superficie du bassin versant et contribuent à plus de 38% de la perte totale du sol. La classe modérée (7-10 ton.ha⁻¹.an⁻¹) et les classes basses et très basses (3-7 et 0-3 ton.ha⁻¹.an⁻¹) contribuent à 11,97% et plus de 49% à la perte totale de sol respectivement.

L'analyse spatiale de l'influence de la pente et du facteur C sur la production de sédiments par processus érosif a montré que le facteur topographique a un effet plus important que le facteur de couverture végétale (R² de 0,78 et 0,41 respectivement). Une analyse des caractéristiques des 9 sous-bassins versants formant le bassin versant de Bouhanifia a également été réalisée et une carte des priorités de gestion des sous-bassins a été établie. Cette carte a montré que 2 sous-bassins versants sont classés en priorité de premier niveau et nécessitent de toute urgence une gestion efficace.

La simulation d'un scénario a été réalisée en modélisant l'application de pratiques de support exprimées par des valeurs de facteur P obtenues en fonction du gradient de pente. Ce scénario a démontré le rôle important des pratiques de conservation et de soutien pour réduire la perte de sol.

A travers cette étude, nous notons la contribution effective du SIG et de la télédétection dans l'application du modèle RUSLE pour l'estimation de la perte annuelle de sol par érosion dans un bassin versant à l'échelle d'un pixel. La carte établie nous a informés de la vulnérabilité à l'érosion hydrique des sols et peut être une solution très utile pour les décideurs pour une meilleure planification et priorisation des travaux de gestion et de conservation des sols

**Chapitre 6 : Évaluation du risque
d'incendie de forêt et de la
dégradation des espèces forestières à
l'aide du SIG et de la télédétection
dans la forêt de Gharrous**

1. Introduction

Les écosystèmes forestiers sont la source naturelle la plus importante de notre environnement (Hasheminasab et al., 2017). Ils jouent un rôle majeur dans l'équilibre écologique et la préservation des espèces faunistiques et floristiques. Ces dernières années, les écosystèmes forestiers du bassin méditerranéen ont connu une dégradation remarquable due aux incendies qui continuent de détruire les zones forestières d'une année à l'autre. Ces incendies sont la principale cause de destruction des forêts méditerranéennes (Vélez, 1999).

L'Algérie n'échappe pas à ce problème. Il est considéré comme un pays très affecté par ce phénomène (Belgherbi et al., 2018), dont plus de 80% de leurs causes sont de nature anthropique (Meddour-Sahar et al., 2014). Chaque année, environ 36000 ha sont détruits à cause des incendies (Arfa et al., 2009) où plus de 13414 ha ont été enregistrés seulement en 2017 par la Direction Générale des Forêts (DGF) (Benguerai et al., 2019).

Dans la partie ouest de l'Algérie, le massif forestier représente environ 29% du patrimoine forestier algérien (DGF, 2018). De tous les problèmes de la région, les incendies restent le facteur le plus dévastateur (Khader et al., 2009).

Le climat méditerranéen caractérisé par un été extrêmement chaud et l'expansion des activités humaines telles que le surpâturage et le défrichement ont amplifié la situation.

Pour faire face à cette situation alarmante, la lutte et la prévention des incendies semblent être le moyen le plus efficace. Celles-ci ne peuvent être réalisées sans une spatialisation du risque des incendies de forêt (RFF) et la délimitation des zones les plus vulnérables aux feux. L'évolution des techniques géospatiales telles que les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection a effectivement amélioré la résolution de ce type de problème.

Dans ce contexte, ce travail vise à évaluer le risque d'incendies de forêt à l'aide des outils de la géomatiques (SIG et Télédétection). L'approche consiste en une spatialisation de RFF en appliquant un modèle intégrant différents facteurs caractérisant la topographie, la combustibilité et les activités humaines. Ces facteurs sont introduits dans un environnement SIG sous forme de couches thématiques pour produire une carte synthétique du risque d'incendie qui reflète les zones forestières en fonction de leur niveau de sensibilité au feu. L'étude a été effectuée dans la forêt de Gharrous située au sud-est de la wilaya de Mascara dans l'ouest de l'Algérie.

2. Présentation de la zone d'étude

La forêt de Gharrous est située dans le bassin versant de l'Oued Taria au nord-ouest de l'Algérie et fait partie des monts de Saida. Elle est située géographiquement entre les longitudes 0° 26' 20'' et 0° 33' 32'' Est et entre les latitudes 35° 4' 8'' et 35° 8' 42'' Nord.

Elle se caractérise par une altitude allant de 711 à 1245 m avec une superficie d'environ 5912 ha qui s'étend sur le territoire de trois wilayas Mascara, Saida et Tiaret (Fig. 6-1). Les altitudes de plus 900m sont les plus dominantes avec plus de 64% de la superficie de la forêt devant moins de 35% avec des altitudes inférieures à 900m (Fig. 6-2.a). Par ailleurs, la zone d'étude est caractérisée par un gradient de pente supérieur à 20 et 41.55% avec un gradient de 10 à 20% (Fig. 6-2.b). Ces conditions topographiques constituent un environnement idéal pour le déclenchement et la propagation des feux.

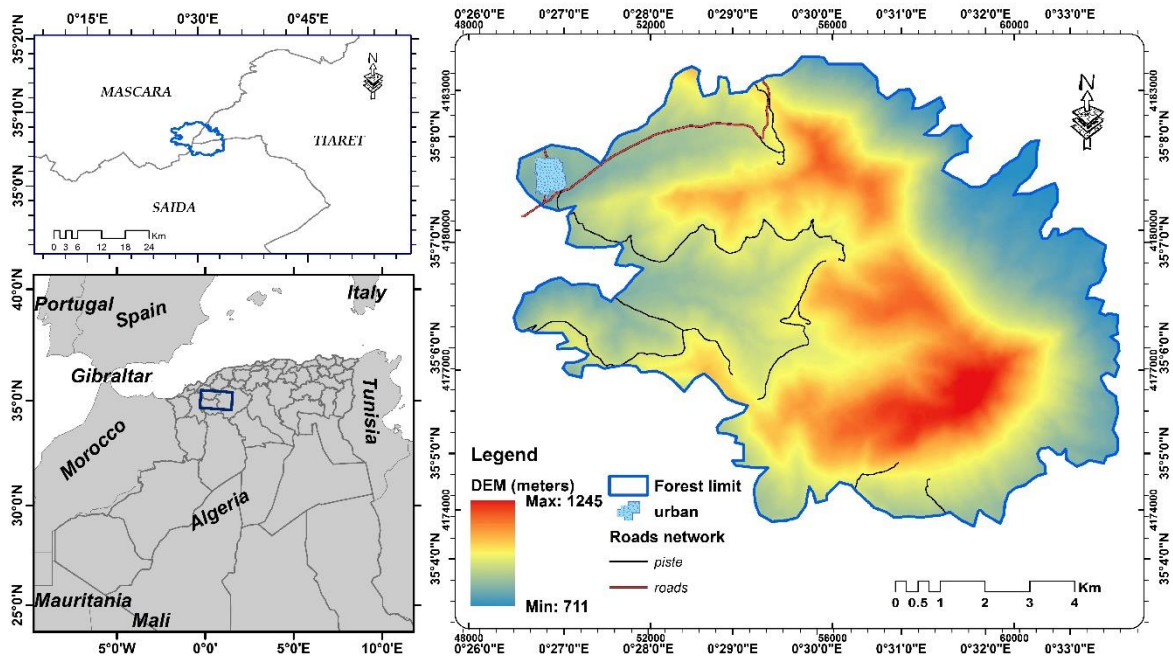


Figure 6-1 : Localisation géographique de la forêt de Gharrous

Tableau 6-1: La répartition de surface des classes d'altitudes de la forêt de Gharrous

Altitude (m)	Surface	
	ha	%
<800	497.53	8.41%
800-900	1601.22	27.08%
900-1000	1916.91	32.42%
1000-1100	1267.04	21.43%
>1100	630.30	10.66%
Total	5912.78	100.00%

Chapitre 6 : Évaluation du risque d'incendie de forêt et de la dégradation des espèces forestières à l'aide du SIG et de la télédétection, Cas de la forêt de Gharrous

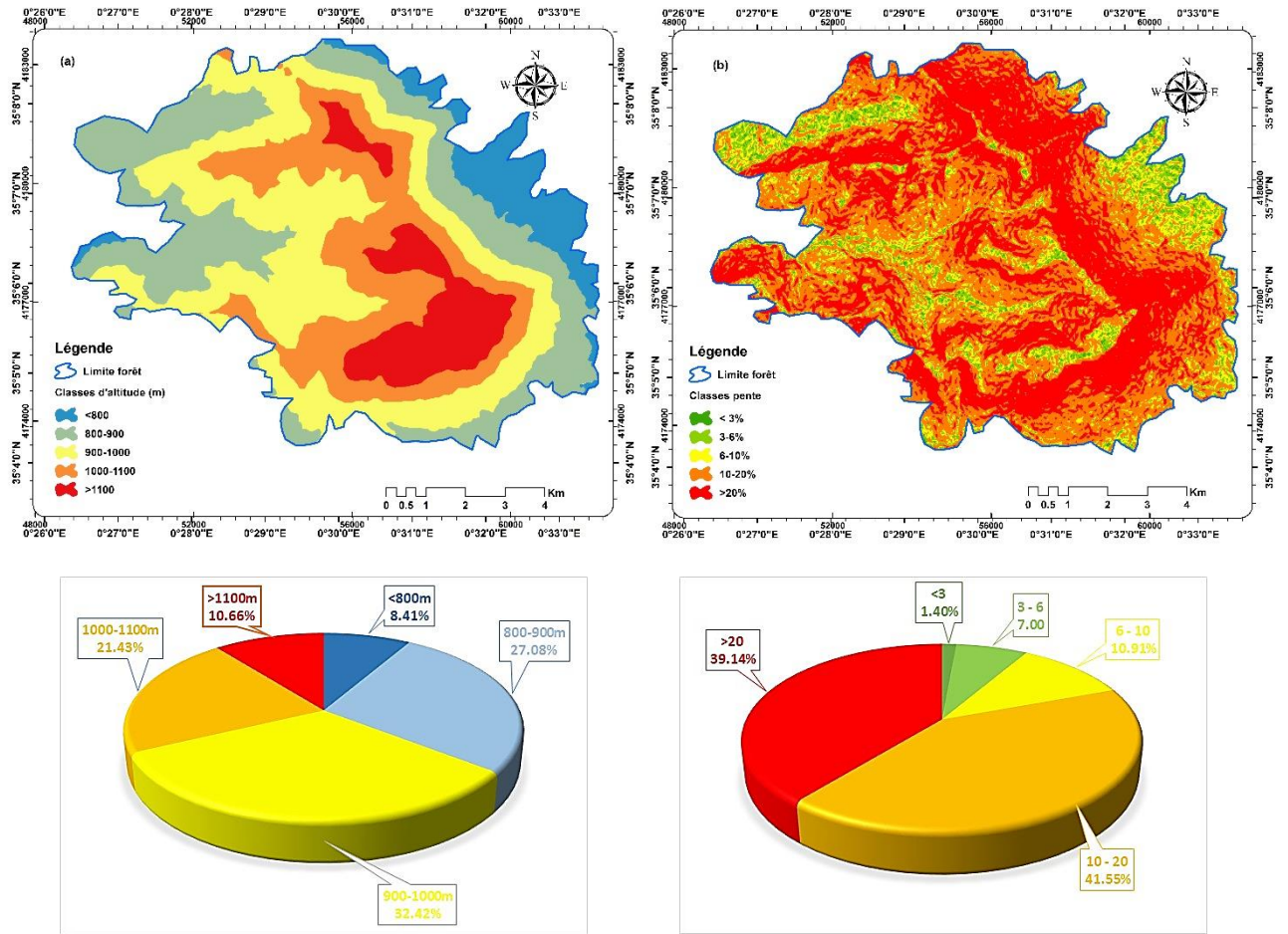


Figure 6-2: (a) Les classes d'altitudes et sa répartition spatiale et (b) la carte des pentes

La forêt de Gharrous appartient à l'étage bioclimatique semi-aride avec deux périodes importantes : froide de novembre à avril et chaude et sèche de mai à octobre. Elle se caractérise par une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 478 mm et une température moyenne de 17.6 °C (Station de Aouf) (Fig. 6-3).

La couverture forestière est principalement dominée par le Pin d'Alep et modérément par les espèces Pistachier Lentisque, Thuya de Barbarie et le Calicotome épineux.

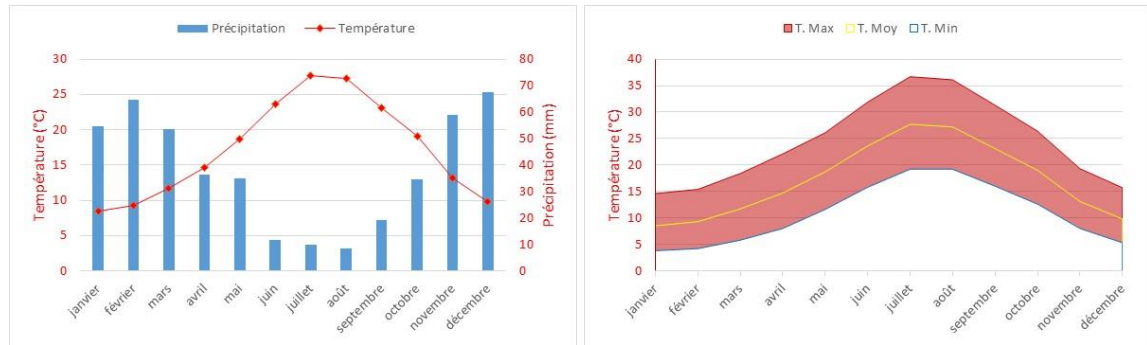


Figure 6-3: Digramme ombrothermique et les variations des températures à la station de Aouf

3. Données utilisées

Afin de réaliser ce travail, plusieurs sources de données ont été utilisées notamment :

- Modèle Numérique de Terrain (MNT) concerne les données d'altimétrie issue du produit ALOS Palsar Radiometric Terrain Corrected (RTC) avec une résolution spatiale de 12,5 m. Ce MNT a été utilisé pour dériver des paramètres caractérisant la topographie de la zone d'étude (pente et exposition).
- Image satellitaire issue du capteur Sentinel 2 MSI (Multi Spectral Imager). Elles ont été utilisées pour extraire des informations utiles sur le type de combustible du couvert forestier en exploitant la réflectance de surface.
- Données de l'historique des incendies survenus dans la forêt de Gharrous depuis plusieurs années. Ces données sont collectées auprès de la Conservation des Forêts de Mascara et le district de Aouf chargée de la gestion du patrimoine forestier de notre zone d'étude (Tab. 6-2).
- Le réseau routier et les agglomérations obtenus par numérisation des images haute résolution de Google Earth.
- La délimitation des zones incendiées de 2010 à 2018 extraite sous forme de couche vectorielle à partir des images de Google Earth.

Le tableau 6-3 décrit les caractéristiques de ces données.

Tableau 6-2: L'historique des incendies de la forêt de Gharrous (source: Conservation des Forêts de Mascara)

Date	Zone	Espèces incendiées
22/07/2010	Djebel Lakhdar	Pin d'Alep, Pistachier lentisque, Thuya
10/10/2013	Djebel Lakhdar	Pin d'Alep, Pistachier lentisque, Strates herbacées
13/08/2016	Makamette	Pin d'Alep, Strates herbacées
31/07/2018	Djebel Henaifia	Thuya, Pistachier lentisque, Strates herbacées

Tableau 6-3: Caractéristiques et sources des données utilisées

Données	Format	Caractéristiques	Source
Images satellitaires	Raster (GeoTiff)	SENTINEL 2 MSI L1C TOA Reflectance Product Résolution Spatiale: 10/20 m Résolution Spectrale: 13 bands Projection : UTM/WGS84 30N Date d'acquisition : 2019/05/23	United States Geological Survey Global Visualization Viewer (GloVis) (https://glovis.usgs.gov/app?fullscreen=0)
MNT	Raster (GeoTiff)	ASF Radiometric Terrain Corrected High Resolution ALOS PALSAR Résolution Spatiale: 12.5m Projection: UTM/WGS84 30N	Dataset: ASF DAAC (https://vertex-retired.daac.asf.alaska.edu/)
Routes / Agglomérations	Vecteur (Shp)	Format: Polyligne/Polygone Projection: UTM/WGS84 30N	Google Earth Pro
Limites des incendies	Vecteur (Shp)	Format: Polygone Projection: UTM/WGS84 30N	Google Earth Pro

4. Modélisation du risque d'incendie

Pour spatialiser et cartographier le Risque de Feux de Forêts, il doit être modélisé et évalué. Plusieurs chercheurs ont proposé différents modèles d'évaluation du RFF tels que Dagorne et al. (1994), Mariel (1995), Xu et al. (2006), Hasheminasab et al. (2017) et Sakellariou et al. (2019). Ces modèles diffèrent par leurs paramètres d'entrée et les conditions dans lesquelles ils ont été appliqués.

Dans cette recherche, le modèle proposé par Sakellariou et al. (2019) a été adopté. Il prend en compte 02 différents types de facteurs impliqués dans le processus d'incendie : les facteurs naturels (type de combustible, pente et exposition) et les facteurs anthropiques dépendants des activités humaines (distance aux routes et proximité des agglomérations). Ainsi, le RFF peut être évaluée à l'aide de la formule suivante :

$$RFF = 4.5 \times F + 1.5 \times (S + A) + 1.5 \times R + T \quad 6.1$$

Où

RFF: Risque de Feux de Forêts,

F: Type de combustible (Fuel)

S: Facteur de pente (Slope)

A: Facteur de l'exposition (Aspect)

R: Facteur lié au distance aux routes

T: Facteur lié à la proximité des agglomérations

Chacun de ces facteurs est pondéré en fonction de son influence sur le déclenchement et la propagation du feu (Gettouche et al., 2011).

4.1. Végétation et type de combustible

Guettouche et al. (2011) note que parmi les facteurs qui influencent fortement les incendies de forêt, le type de combustible et la phytomasse sont considérés comme un facteur important dans la propagation du feu. Lorsqu'ils interfèrent avec le facteur climatique, elle peut créer des conditions favorables à l'éclosion de feux de forêt (Assali et al., 2016).

La structure spatiale du combustible, le type d'espèces dominantes et leur densité sont les principaux critères impliqués dans l'allumage du feu (Belhadj-Aissa et al., 2003). Plus la végétation est haute, sèche, dense et continue, plus le feu sera violent et difficile à maîtriser (PPRIF, 2003).

Plusieurs chercheurs tels que Saatchi et al. (2007), Arroyo et al. (2008), Arellano-Pérez et al. (2018) et Filipponi (2019) montrent le rôle de la télédétection comme outil efficace pour estimer le type de combustible forestier.

A cet effet, des données de télédétection à haute résolution spatiale ont été utilisées pour caractériser le type de combustible de la zone d'étude. Elles consistent en une image multispectrale acquise le 23/05/2019 par le capteur Sentinel 2 MSI avec une haute résolution spatiale de 10m. Il s'agit d'un produit Sentinel 2 L1C qui correspond à une image de réflectance au sommet de l'atmosphère. Afin d'obtenir la réflectance au-dessous de l'atmosphère, une correction atmosphérique est nécessaire. Cette action a été réalisée à l'aide du prototype Sen2Cor qui est un algorithme développé par l'ESA fournisseur de l'application SNAP pour transformer les données L1C en données L2A qui correspond à la réflectance au sol (Uwe, 2016).

La cartographie du type de combustible du couvert forestier de notre zone d'étude a été effectuée par la classification de l'indice de végétation ajusté au sol ou Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) dérivé de l'image Sentinel 2 en utilisant les bandes rouge et proche infrarouge selon l'équation suivante :

$$SAVI = \frac{PIR-R}{PIR+R+L} \times (1 + L) \quad 6.2$$

Où:

PIR: Bande de réflectance en proche infrarouge

R: Bande de réflectance en rouge

L: paramètres d'ajustement égal à 0,5

Les différents traitements de l'image Sentinel 2 ont été effectués avec le logiciel opensource SNAP développé et distribué par l'ESA.

4.2. Facteurs topographiques

Les facteurs topographiques caractérisent l'effet des paramètres topographiques tels que la pente et l'exposition sur la propagation du feu. Ils ont une relation significative avec l'ensoleillement et le comportement du vent (Setiawan et al., 2004). Ils sont considérés comme des facteurs à effet importants sur la propagation des flammes des feux lors d'un incendie.

L'effet de la pente peut s'expliquer par son inclinaison et sa direction. Selon Dong et al. (2005), le risque d'incendie augmente dans les pentes les plus abruptes et diminue dans les pentes douces. De plus, le feu se propage plus rapidement dans les zones de direction vers le haut et lentement dans le sens inverse vers le bas (Suryabhagavan et al., 2016). La vitesse de propagation double généralement sur une pente de 10 degrés et quadruple sur une pente de 20 degrés (Trabaud, 1991).

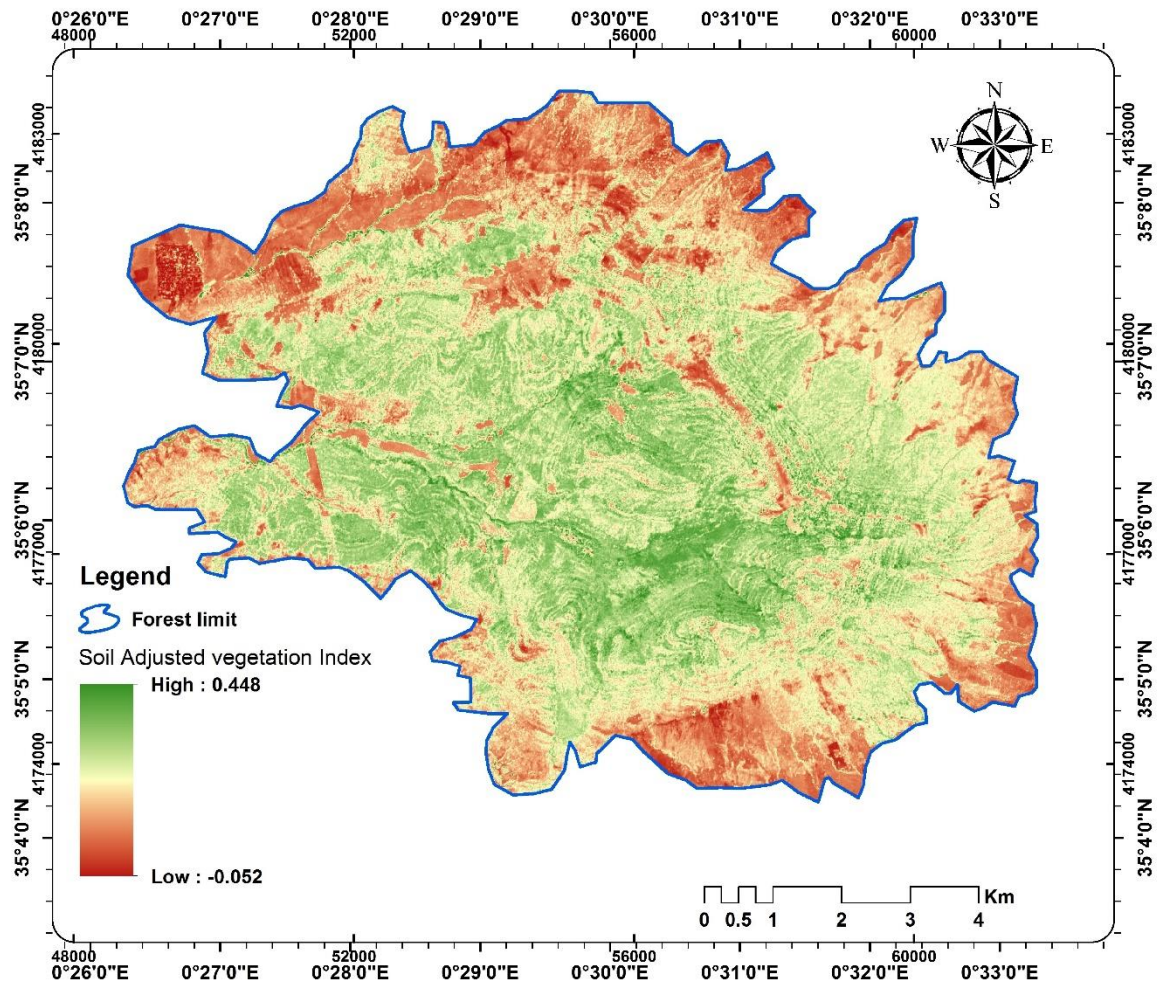


Figure 6-4: La carte de l'indice de végétation SAVI

L'influence de l'exposition peut changer selon la localisation géographique de la zone d'étude (Talbi et al., 2018). La propagation du feu est indirectement affectée par l'exposition en raison de son rôle sur le conditionnement de la végétation, la durée d'ensoleillement et l'influence du vent. Généralement, les pentes exposées au sud présentent les conditions les plus favorables pour un allumage rapide et pour la propagation des flammes (Prasad et al., 2008).

Les paramètres de pente et de l'exposition ont été extraits à partir du MNT avec une résolution spatiale de 12,5 mx 12,5 m.

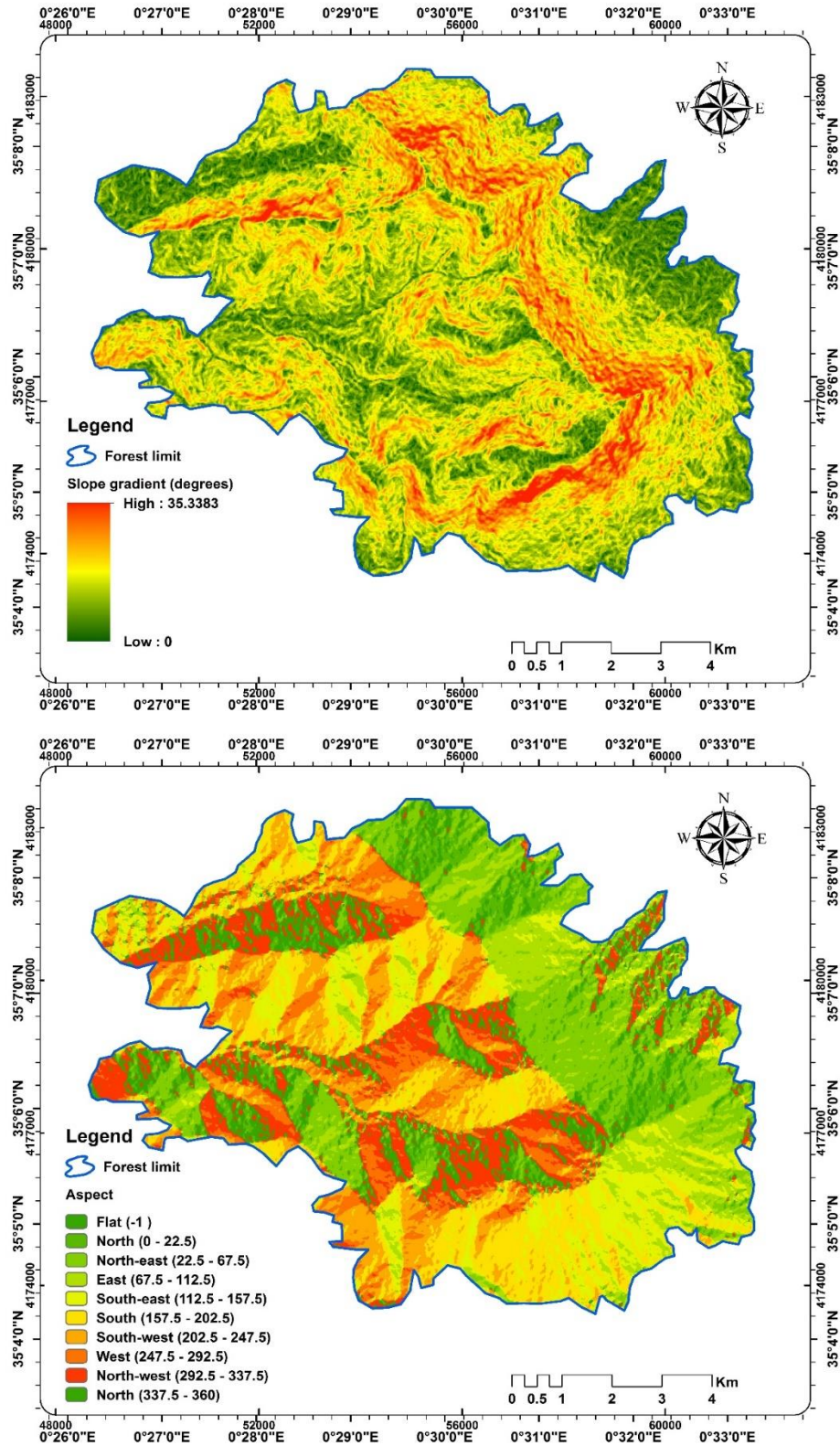


Figure 6-5 : La carte des (a) pentes et de (b) l'exposition

4.3. Facteur des activités humaines

Les activités humaines reflètent l'influence anthropique sur la fréquence des incendies de forêt. Elles se sont exprimées comme le résultat de plusieurs facteurs tels que la distance aux routes et la proximité des agglomérations et des habitations.

Dans la plupart des cas, les incendies de forêts sont essentiellement dus aux activités humaines intenses (Adab et al., 2012). La densité des routes permettant aux gens de se rendre ou d'être à l'intérieur de la zone forestière est considérée comme un paramètre potentiel pour l'allumage du feu (Jaiswal et al., 2005). De plus, la présence de peuplements humains à proximité ou à l'intérieur de la forêt augmente la capacité de déclencher des incendies et rend les zones forestières plus vulnérables.

Dans ce travail, pour évaluer l'impact des activités humaines sur le risque d'incendie, les routes et les agglomérations situées à l'intérieur ou aux alentours de la zone d'étude sont numérisées à partir des images à très haute résolution de Google Earth Pro. Les couches obtenues ont été utilisées pour calculer la distance aux routes et de la proximité des agglomérations en tant que distance euclidienne avec la fonction Euclidean Distance de l'outil Spatial Analyst de l'environnement ArcGIS.

4.5. Classification et pondération des facteurs de risque d'incendie

Les différentes étapes de la modélisation du risque de feux de forêts suivies dans cette étude sont automatisées en utilisant l'outil Model Builder du logiciel SIG ArcGIS. Ses étapes sont présentées dans la figure 6-6.

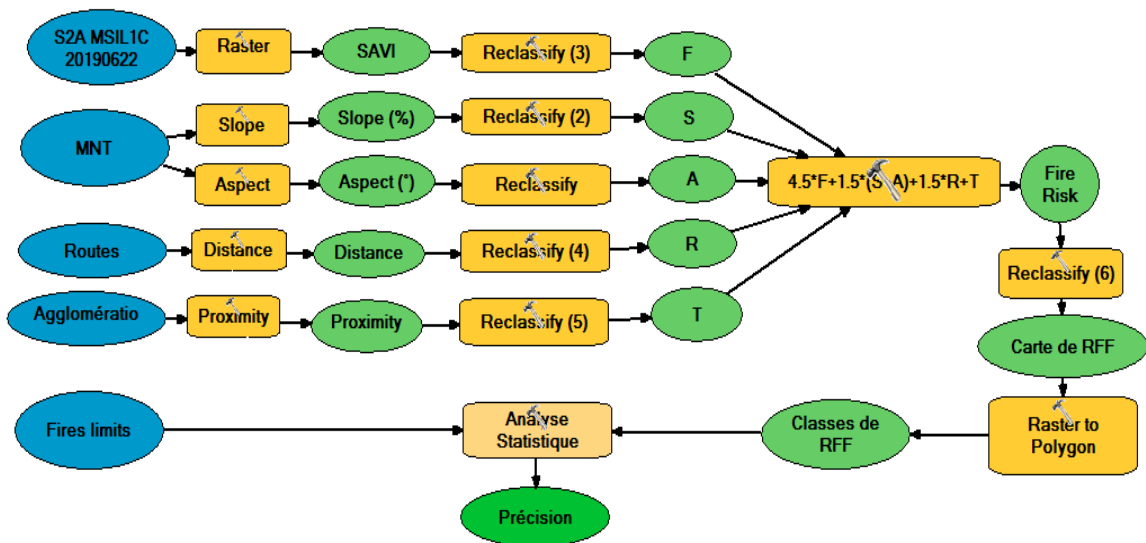


Figure 6-6: Les étapes d'automatisation du modèle utilisé par le Model Builder d'ArcGIS

Après la création des couches des cinq facteurs utilisés dans le modèle, elles ont été rééchantillonnées à la même résolution de 10 m. Chaque facteur a été classé en plusieurs classes avec un poids spécifique de 1 à 10 et le niveau de risque d'incendie correspondant : très faible, faible, modéré, élevé et très élevé. En conséquence, les valeurs du risque à obtenir varient de 0 à 100. L'attribution des différents poids a été effectuée sur la base des seuils décrits dans le tableau 6-4.

Tableau 6-4: Classification et pondération des différents paramètres

Type combustible	Risque	Poids			
No or very little fuel	Very low	1			
Little fuel	Low	3			
Surface fire-Torching	Moderate	5			
Crown fire	High	7			
Full crown fire	Very high	9			
Pente (degrés)	Risque	Poids	Exposition	Risque	Poids
0 - 3	Very low	2	Smooth ground	Close to nil	1
3 - 5	Low	3	North	Extremely low	2
5 - 10	Moderate	5	North east	low	3
10 - 15	High	7	North west	Very low	4
15 - 35	Very high	9	East	Below mean	5
> 35	Extremely high	10	South east	Moderate	6
			West	Higher than mean	7
			South west	High	8
			South	Very high	10
				Extremely high	
				high	
Distance aux routes (m)	Risque	Poids	Proximité agglomérations (m)	Risque	Poids
>400	Very low	1	>4000	Very low	1
300 - 400	Low	3	3000-4000	Low	3
200 - 300	Moderate	5	2000-3000	Moderate	5
100 - 200	High	7	1000-2000	High	7
<100	Very high	9	<1000	Very high	9

5. Résultats et discussion

Les outils de numérisation et d'analyse spatiale du logiciel SIG ArcGIS nous ont permis l'élaboration de différentes cartes des risques liées aux facteurs pris en compte par le modèle utilisé pour l'évaluation du RFF.

Les différentes cartes des facteurs de la végétation, de la topographie et à la présence humaine sont présentées dans ce qui suit.

5.1. Carte de combustibilité

La carte du type de combustible de la zone d'étude a été obtenue à partir d'une estimation utilisant la couche SAVI dérivée de l'image Sentinel 2. La carte a été classée en cinq classes pondérées en fonction de leur niveau de risque d'incendie (Fig. 6-7).

Les valeurs de l'indice SAVI dérivées varient de -0,052 à 0,448. Les valeurs les plus faibles correspondent au sol nu et à la zone urbaine où les valeurs les plus élevées représentent une forêt totalement couverte. La répartition spatiale du type de combustible obtenu montre que près de 40% de la zone d'étude est caractérisée par un risque élevé et très élevé situé généralement dans la partie centrale de la forêt et correspond à une couverture fermée principalement de Pin d'Alep (Tab. 6-5).

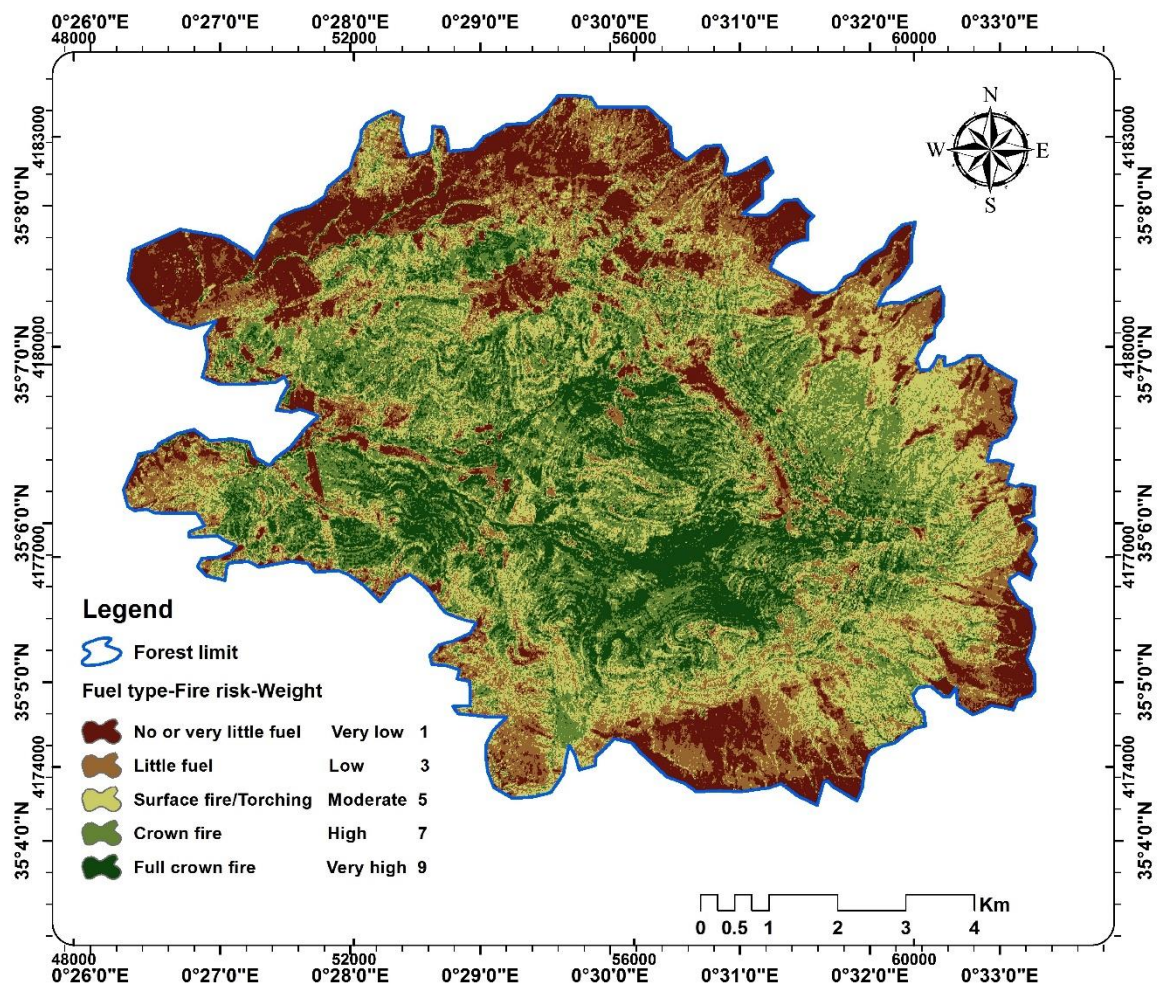


Figure 6-7: Carte de risque de feux lié à la végétation

Tableau 6-5: La répartition de surface du risque lié à la combustibilité

Type combustible	Risque	Surface (ha)	Surface (%)
Pas/Très peu de combustible	Très faible	993.85	16.81
Peu de combustible	Faible	1143.68	19.34
Feux de surface	Modéré	1415.13	23.93
Feux de couronne peu dense	Elevé	1520.05	25.71
Feux de couronne très dense	Très élevé	840.08	14.21
Total		5912.78	100

Les zones de niveau de risque modéré occupent 24% de la superficie de la forêt et sont formées d'un mélange d'espèces de Pistachier lentisque (*Pistacia lentiscus*), Thuya de Barbary (*Tetraclinis articulata*) et du Calicotome épineux (*Calicotome spinosa*) avec une couverture de densité modérée. Les niveaux de risque faibles et très faibles correspondent respectivement aux terres de parcours et agricoles et aux sols nus avec un taux de superficie inférieur à 36.15%.

5.2. Carte de risque liée aux facteurs topographiques

L'extraction de la pente et de l'exposition à partir du MNT nous a permis d'établir des cartes numériques de ces paramètres (Fig. 6-5, Fig. 6-6). La morphologie du terrain avec des pentes abruptes (> 10 degrés) représente 50% de la zone d'étude totale contre 15,2% pour les pentes faibles (Tab. 6-6). Par conséquent, des niveaux de risque d'incendie élevés, très élevés et extrêmement élevés basés sur la pente dominant notre zone d'étude. Les zones les plus abruptes qui sont exposées à un risque d'incendie élevé sont situées au nord et à l'est.

Tableau 6-6: La répartition de surface de risque de feux selon la pente

Pente (degrés)	Risque	Surface (ha)	Surface (%)
0 - 3	Très faible	365.52	6.18
3 - 5	Faible	533.10	9.02
5 - 10	Modéré	1823.27	30.84
10 - 15	Elevé	1901.73	32.16
15 - 35	Très élevé	1052.63	17.80
> 35	Extrêmement élevé	236.54	4.00
Total		5912.78	100

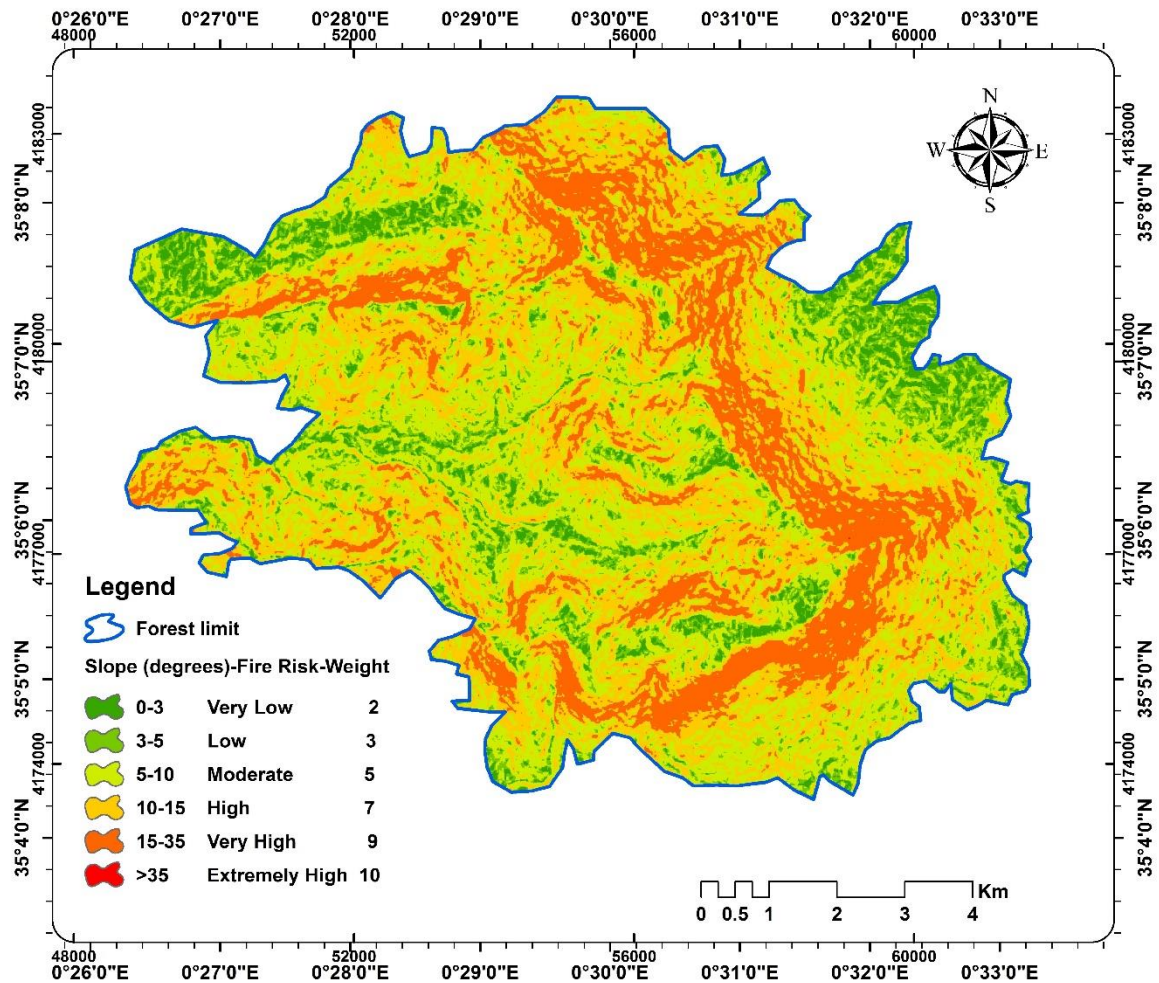


Figure 6-8 : Carte de risque de feux lié à la pente

Les zones exposées au Sud et à l'Ouest correspondant à des niveaux de risque élevés (pondération risque de feux > 6) occupent une superficie de 2751.17 ha ce qui équivaut à 46,30% de la zone d'étude totale. Ils correspondent à des régions situées au nord, au nord-est et au sud-ouest (Fig. 6-9). Le reste se caractérise par des niveaux de risque d'incendie modéré et faible correspondant à moins de 54% de la zone d'étude (Tab. 6-7). L'effet combiné de la pente et de l'exposition peut fournir des conditions très favorables à la survenance d'un incendie et à l'accélération de la vitesse de propagation des flammes des feux.

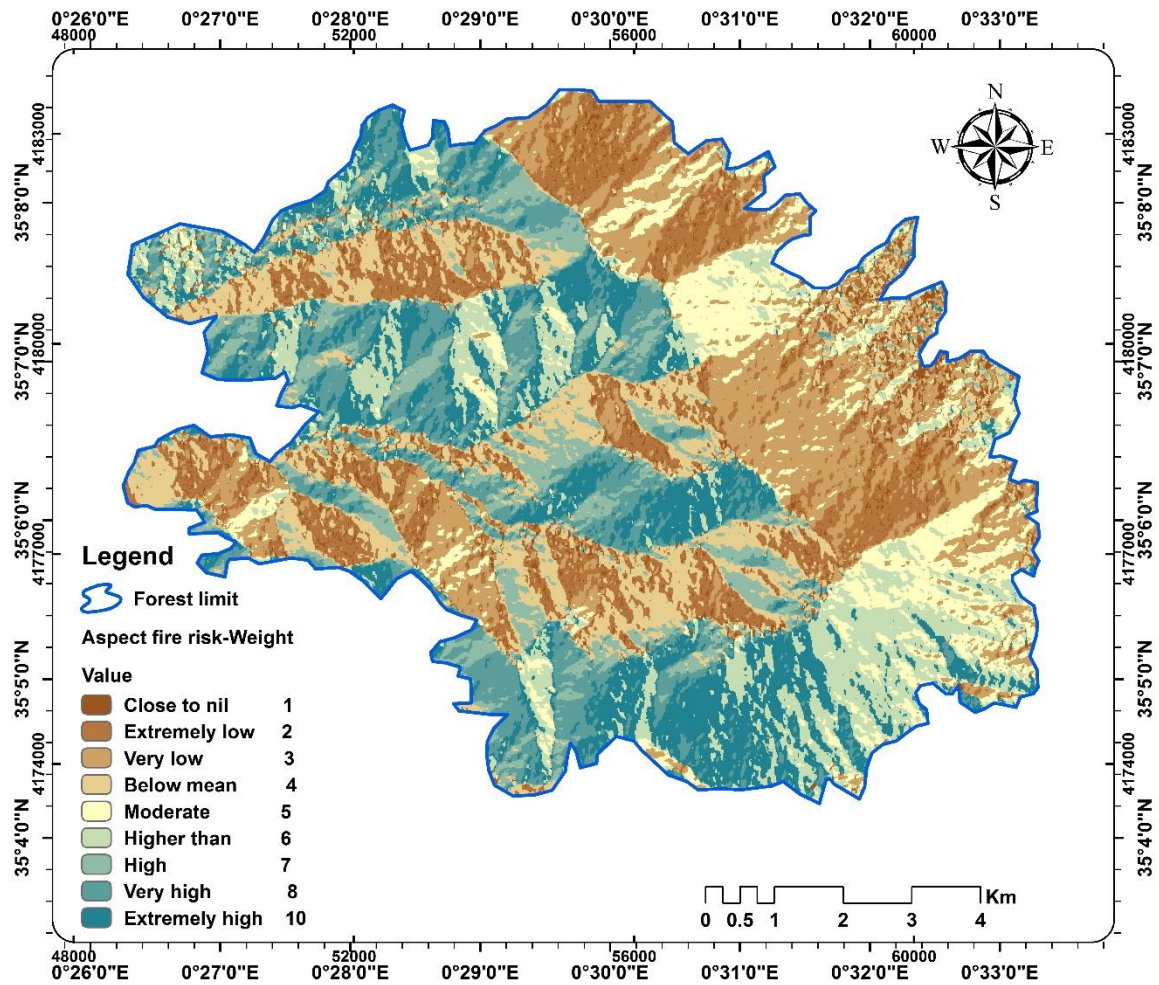


Figure 6-9 : Carte de risque de feux lié à l'exposition

Tableau 6-7: Les surfaces des risques liés à l'exposition

Exposition	Risque	Surface (ha)	Surface (%)
Terrain plat	Nul	178.52	3.02
Nord	Extrêmement faible	848.00	14.34
Nord est	Très faible	871.08	14.73
Nord-ouest	Moins que modéré	698.56	11.81
Est	Modéré	595.02	10.06
Sud est	Plus que modéré	687.38	11.63
Ouest	Elevé	523.19	8.85
Sud-ouest	Très élevé	690.59	11.68
Sud	Extrêmement élevé	850.02	14.38
Total		5912.78	100

5.3. Cartes de proximité des routes et des agglomérations

Les routes et les sentiers facilitent l'accès à l'empreinte dans la zone forestière. En outre, les zones proches des habitations peuvent avoir intentionnellement des activités humaines qui provoquent des incendies de forêt.

Le réseau routier et l'emplacement des agglomérations de la zone d'étude ont été utilisés pour évaluer le risque de feux lié aux activités humaines. A l'aide de la fonction de distance euclidienne de la boîte à outils Spatial Analyst du logiciel ArcGIS nous avons établi les cartes résultantes illustrées par les figures 6-10 et 6-11.

L'analyse spatiale de la répartition du risque lié à la proximité aux réseaux routier montre que 19% de la surface de la zone d'étude est exposée à un risque élevé et très élevé suite aux différents routes et pistes qui pénètrent dans la zone forestière. Les régions à risque modéré et faible correspondent à une portion de 8.35% et 72.58% respectivement (Tab. 6-8).

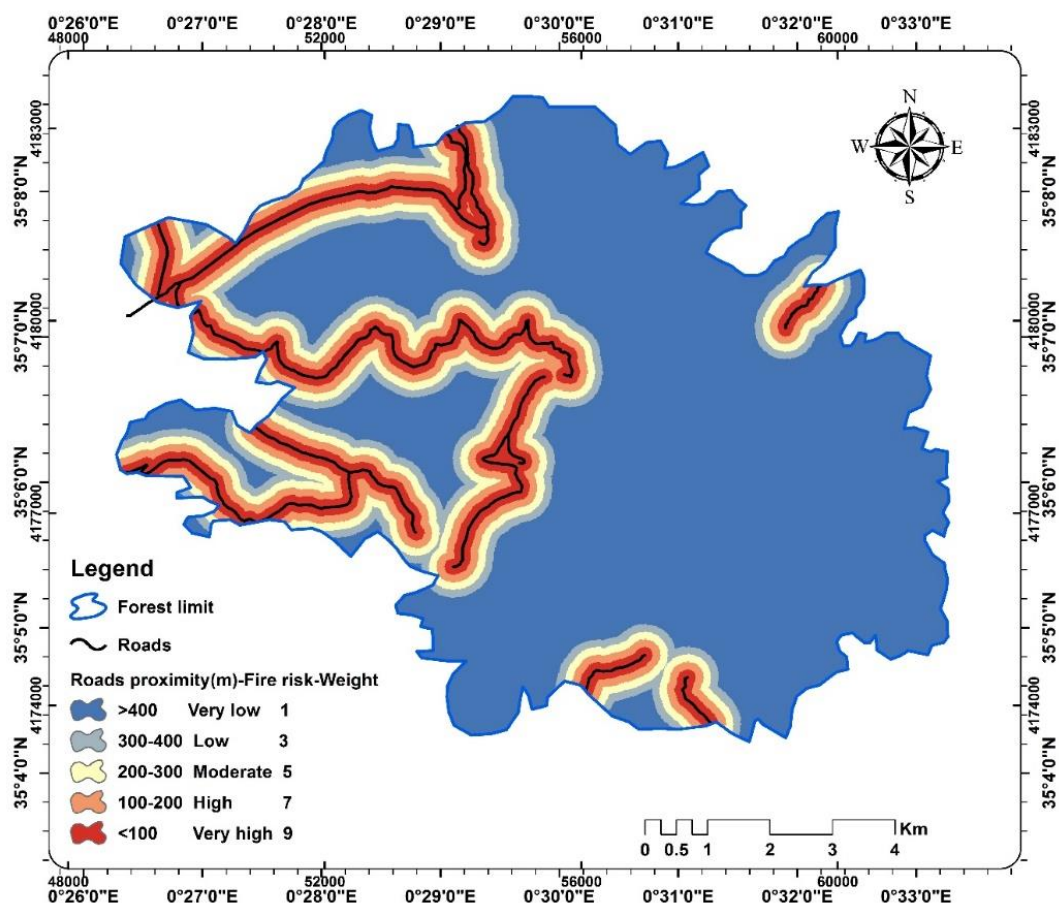


Figure 6-10: Carte de risque de feux liée aux routes

Tableau 6-8: Répartition spatiale des risques liés à la distance aux routes

Distance aux routes (m)	Risque	Surface (ha)	Surface (%)
>400	Très faible	3836.28	64.88
300-400	Faible	455.52	7.70
200-300	Modéré	493.88	8.35
100-200	Elevé	525.28	8.88
<100	Très élevé	601.83	10.18
Total		5912.78	100

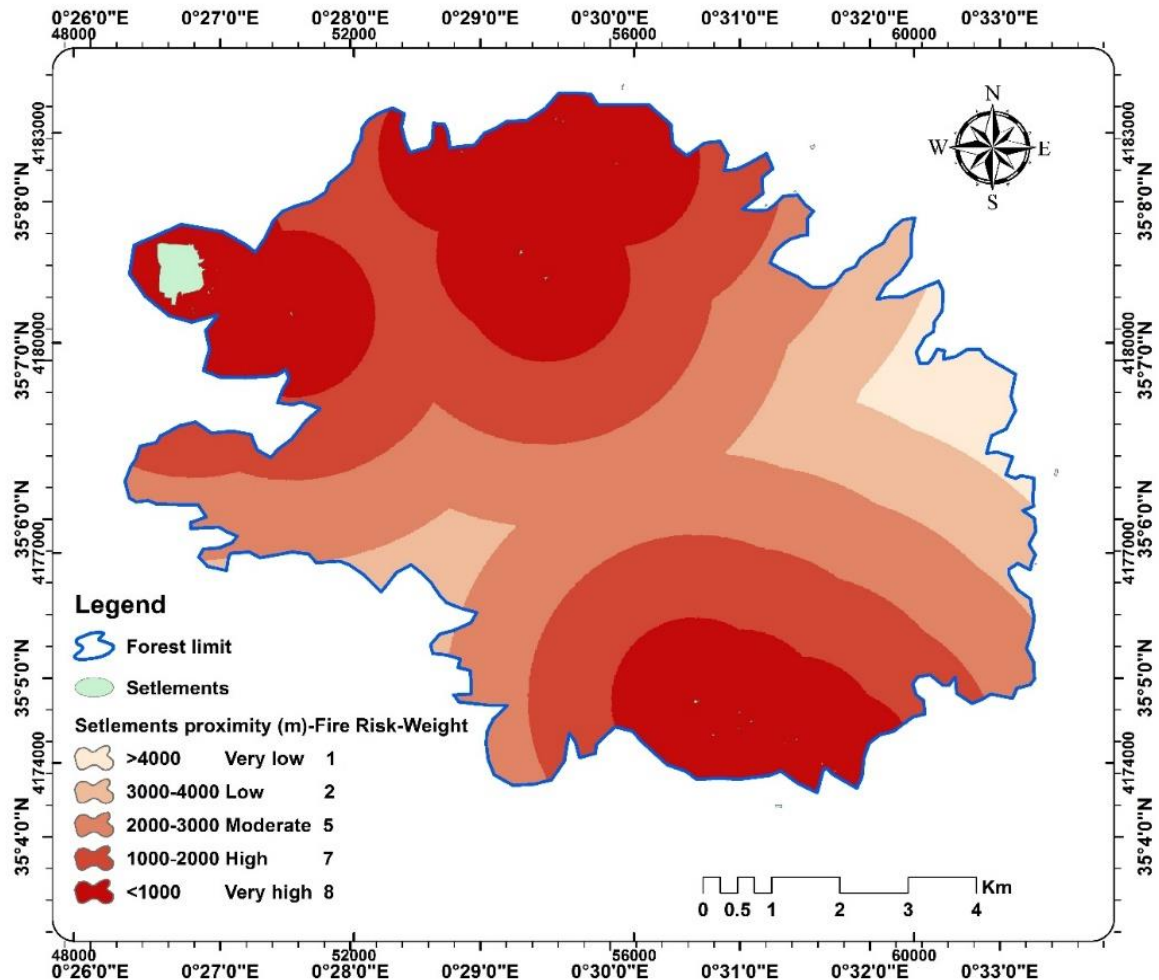


Figure 6-11: Carte de risque de feux liée aux agglomérations

La carte du risque des feux de forêts lié à la proximité aux agglomérations de la zone d'étude ainsi établie démontre que la classe la plus répandue est celle à risque élevé et très élevé avec plus de 57% et une superficie de 3379.62 ha. La classe à risque modéré correspond à 28.03% de la superficie de la zone d'étude. D'autre part, les régions à risque faible et très faible ne représentent que moins de 15% (Tab. 6-9). Le risque le plus élevé lié aux agglomérations se situe dans les régions est, nord et sud où se localise des habitats ruraux et des fermes à l'intérieur de la zone forestière.

Tableau 6-9: La superficie du risque de feux lié à la proximité aux agglomérations

Proximité des agglomérations (m)	Risque	surface (ha)	surface (%)
>4000	Très faible	198.80	3.36
3000-4000	Faible	676.78	11.45
2000-3000	Modéré	1657.58	28.03
1000-2000	Elevé	1686.98	28.53
<1000	Très élevé	1692.64	28.63
Total		5912.78	100

5.4. Carte du risque d'incendie de forêt

Sur la base de l'application de l'équation 6.1, l'évaluation de RFF a été effectuée en multipliant le facteur de type de combustible végétal, les facteurs topographiques et les facteurs anthropiques avec les associés. Ces facteurs ont été introduits dans le logiciel ArcGIS sous forme de couches raster avec une résolution de 12.5m pour calculer les valeurs du RFF. Ce dernier est classé pour produire une carte synthétique du RFF à cinq niveaux.

Les valeurs du risque de la forêt de Gharrous se varient entre 8.5 et 92.6 correspondants respectivement aux zones avec des niveaux de risque très faible et très élevés (Fig. 6-12). Les niveaux de risque élevé et très élevé occupent plus de 43% de la superficie forestière totale suivi par le niveau de risque modéré avec 41,36%. Les niveaux de risque faible et très faible avec un pourcentage inférieur à 16% (Tab. 6-10).

Il est à noter que les zones les plus vulnérables aux feux de forêts sont situées en particulier dans la partie centrale du massif forestier, les endroits avec des cimes fermées et à proximité des pistes et sentiers pédestres. Ces résultats peuvent être expliqués par la dominante de l'espèce Pin d'Alep qui a une grande sensibilité au risque d'incendie en raison de sa haute inflammabilité et de sa combustibilité (selon Alexandrian et Rigolot (1992), le Pin d'Alep est noté par une valeur élevée égale à 8 pour le degré de combustibilité). De plus, les conditions topographiques les plus raides, l'accessibilité plus facile aux zones boisées et les activités agricoles (incendies démarrés par des apiculteurs, incendies de résidus agricoles) à l'intérieur renforcent ce risque.

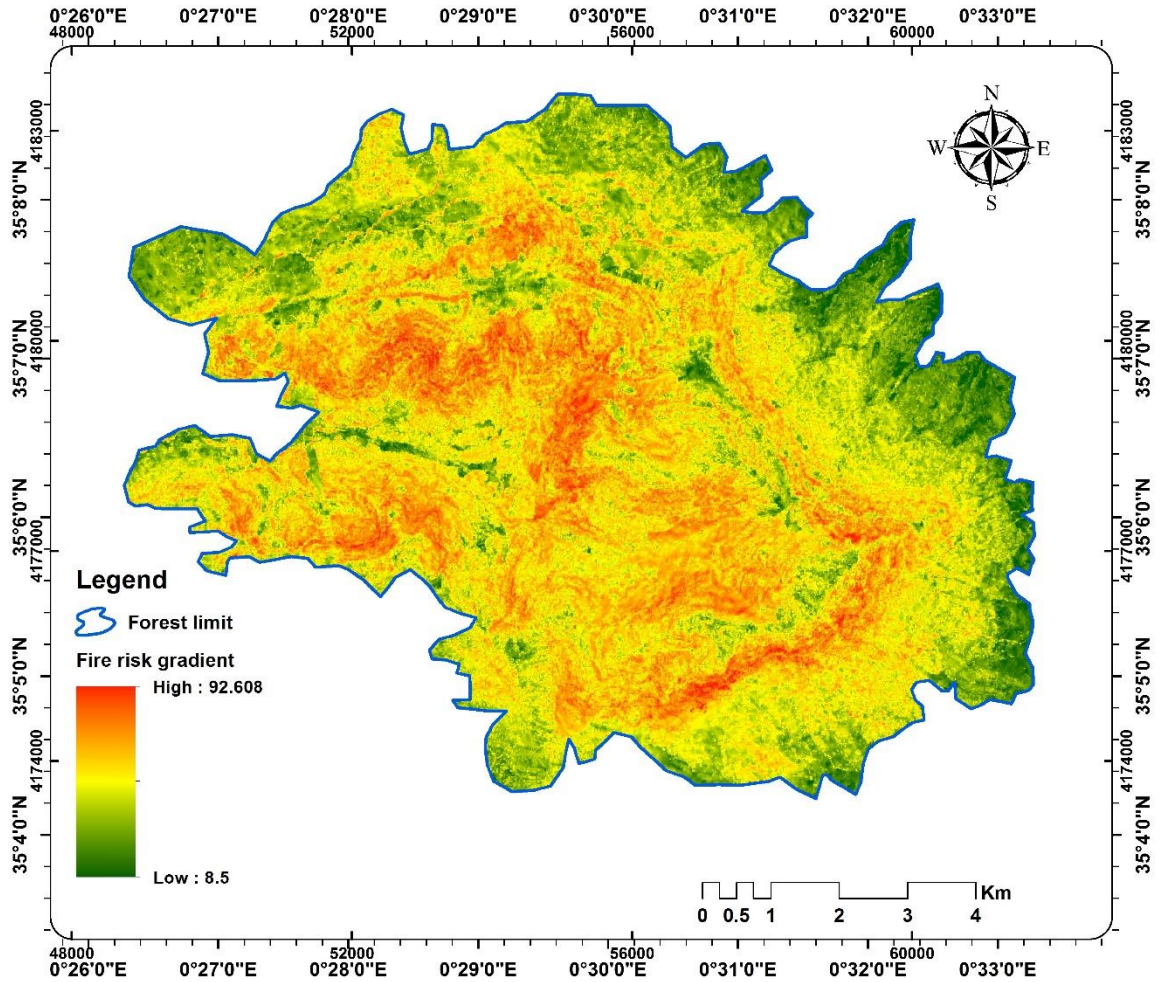


Figure 6-12: Gradient de risque de feux de forêts de Gharrouss

Tableau 6-10: Les classes de risque et la superficie correspondante

Classe de risque	Risque	Surface (ha)	Surface (%)
0-20	Très faible	41.75	0.71
20-40	Faible	870.53	14.72
40-60	Modéré	2445.72	41.36
60-80	Elevé	2273.47	38.45
>80	Très élevé	281.31	4.76
Total		5912.78	100

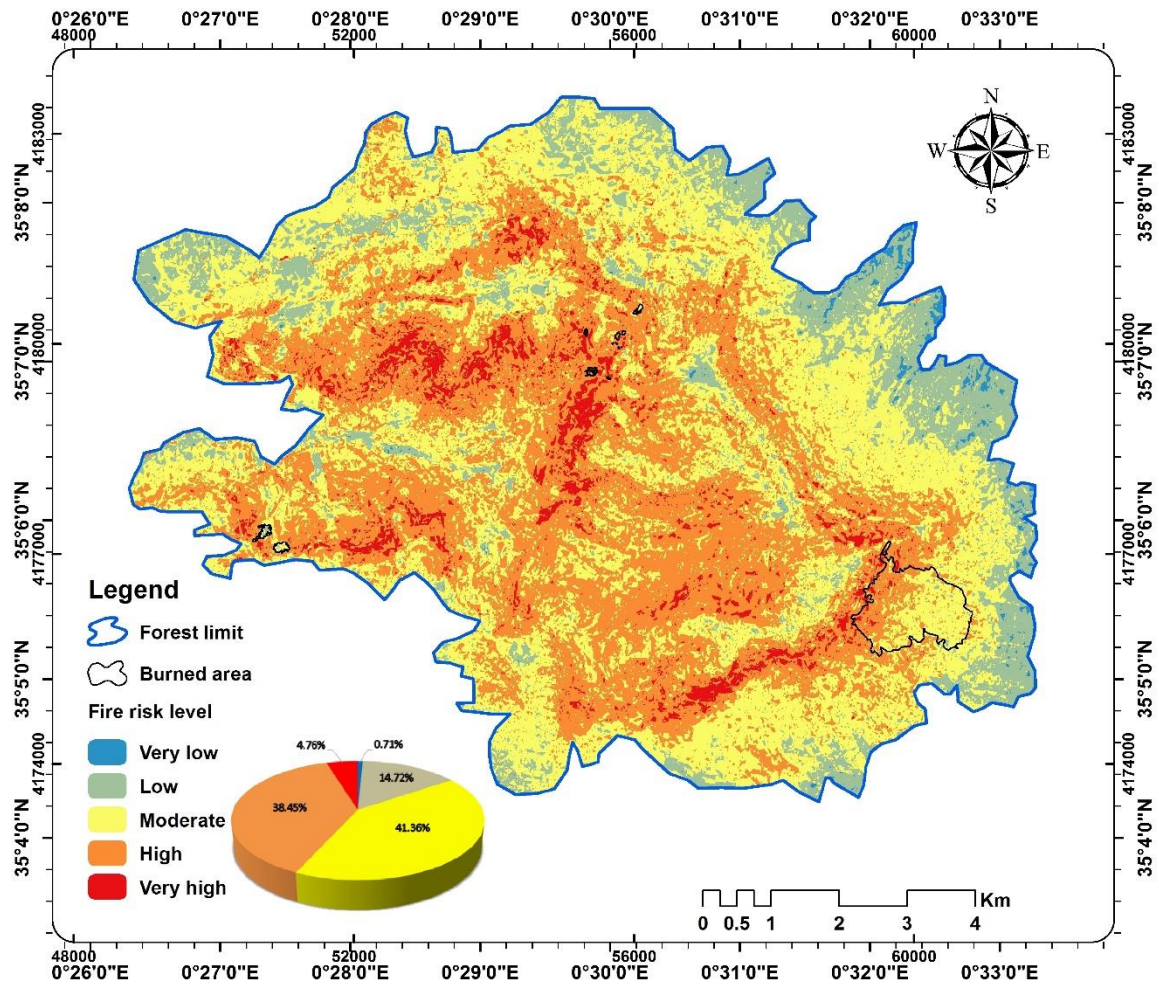


Figure 6-13: Les classes du risque de feux de la forêt de Gharrouss

5.5. Validation de la modélisation du RFF

La validation des résultats obtenus est une tâche primordiale pour l'évaluation du modèle choisi. Pour ce faire, une comparaison a été effectuée entre la carte synthétique du RFF et l'historique des incendies apparus du 2010 au 2018. Une superposition entre la carte du RFF et la délimitation des zones brûlées a eu lieu dans notre zone d'étude. Les zones incendiées sont localisées et numérisées à partir des images de Google Earth (Fig. 6-14).

En utilisant les analyses statistiques zonales fournies par ArcGIS (fonction de **Tabulate Intersection** de la boîte à outils **Analysis tools** du logiciel ArcGIS). La superficie en ha de chaque classe de risque pour les différentes limites de la superficie brûlée a été calculée (Tab. 6-11).



Figure 6-14: Délimitation des feux de forêts de Gharrouss à partir des images Google Earth

Les résultats de validation obtenus de l'analyse spatiale indiquent que les niveaux de risque modéré, élevé et très élevés dominent les zones incendiées avec un taux de 35,31%, 46,23% et 12,40% respectivement. Notant que l'incendie de 2010 seul a affecté plus de 105 ha de la forêt de Gharrouss.

Cette analyse révèle le degré de sensibilité à aux feux dans la forêt de Gharrouss qui devrait être pris sérieusement par les gestionnaires et les décideurs. La carte du RFF issue de l'application du présent modèle montre que la méthode est utile pour localiser spatialement des zones qui peuvent être très vulnérables aux incendies de forêt et propose un plan d'intervention pour lutter contre ce danger.

Tableau 6-11: Superficie des niveaux de FFR dans les zones brûlées dans la forêt de Gharrous

Année incendies	Risque	Surface (ha)	Surface (%)
2010	Faible	1.80	1.70
	Modéré	58.96	55.57
	Elevé	42.07	39.65
	Très élevé	3.26	3.08
2013	Modéré	0.22	19.99
	Elevé	0.68	62.70
	Très élevé	0.19	17.31
2016	Modéré	0.03	2.37
	Elevé	0.85	68.42
	Très élevé	0.36	29.21
2018	Faible	0.92	22.57
	Modéré	2.57	63.29
	Elevé	0.57	14.13
Total	Faible	2.72	6.07
	Modéré	61.78	35.31
	Elevé	44.18	46.23
	Très élevé	3.82	12.40

6. Conclusion

Les incendies de forêt représentent un problème très grave qui continue de détruire et de dégrader l'écosystème environnemental dans l'ouest de l'Algérie. Un diagnostic fiable et efficace des incendies de forêt devient indispensable dans la proposition d'un plan de gestion forestière approprié. Ainsi, l'évaluation et la cartographie de la zone vulnérable aux incendies de forêt sont inévitables, principalement pour prévenir et combattre les incendies.

Dans ce travail, une approche appliquant un modèle FFR est effectuée. Ce modèle prend en compte cinq facteurs considérés comme responsables de l'allumage des feux de forêt. Des outils géomatiques tels que le SIG et la télédétection ont été utilisés pour extraire et constituer une couche thématique pour chaque facteur et pour produire une carte FFR synthétique. La carte résultante a montré une sensibilité élevée de la forêt de Gharrous avec plus de 43% de la zone en zones à haut et très haut risque.

L'évaluation et la spatialisation du RFF peuvent aider les aménagistes forestiers à se faire une idée de la répartition spatiale des zones vulnérables aux incendies. Tout au long de cette étude, nous notons la contribution effective des SIG et de la télédétection pour fournir une solution très utile aux décideurs pour une meilleure planification et priorisation des travaux de gestion et de conservation des forêts.

**Chapitre 7 : Cartographie et Suivi de la
dynamique des zones humides par
télédétection spatiale, Cas de la
Merdja de Sidi Abed**

1. Introduction

En Algérie, l'eau est une ressource de plus en plus précieuse dont elle subit une surexploitation devant un accès à des disponibilités limitées. Ainsi, les sécheresses excessives qu'il subissait l'Algérie et les besoins en eau qui a été doublé sous la pression de la croissance démographique et l'urbanisation continue ont contribué à une dégradation progressive des ressources superficielles (Nichane et Khelil, 2014).

A l'instar de plusieurs pays de l'Afrique, l'Algérie par son climat méditerranéen semi-aride à aride, est classé parmi les pays les plus touchés par le stress hydrique et dans la catégorie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques inférieures au seuil de rareté définie par la Banque Mondiale à 1000 m³/habitant/an (PNUD, 2009). Cette disponibilité a passé de 1500 m³ en 1962 à 720 m³ en 1990 et a continué à diminuer de 680 m³ en 1995, 630 m³ en 1998 (Nichane et Khellil, 2015), 478 m³ en 2000 et 440 m³ en 2005 (FAO, 2005). En plus, environ 420 millions m³/an quittent l'Algérie dont 320 millions m³/an d'eau de surface vers la Tunisie, en particulier 168 millions m³/an à travers le bassin de Medjerda, et 100 millions m³/an d'eau souterraine aussi vers la Tunisie (FAO, 2015)

Une grande disparité caractérise les régions Est du nord Algérie des régions Ouest. Alors que la partie Est du pays est caractérisée par son contexte montagneux et un climat plus humide selon Remini (2010), la partie l'Ouest souffrent d'aridité sévère. A ces conditions climatiques défavorables s'ajoutent la forte pression démographique et l'état des infrastructures hydrauliques. Cette situation a significativement affecté l'état des ressources en eaux superficielles de cette partie du pays. Ces ressources subissent une dégradation massive tant quantitative que qualitative.

Parmi les principaux problèmes environnementaux que souffre l'Algérie occidentale, l'érosion est le plus destructif. Grace à ces conséquences directes sur les ouvrages hydrauliques par le phénomène d'érosion, plusieurs barrages sont en état inquiétants. Plusieurs effets néfastes peuvent être causés par ce phénomène allant de la réduction de la capacité de stockage du barrage, la dégradation de la qualité de l'eau et l'obturation des organes de vidange et les canaux d'irrigation (Toumi et Remini, 2011).

Le barrage de Merdja Sidi Abed situé à l'extrême est de la wilaya de Relizane déplore un état d'envasement impressionnant dans un laps de temps assez court. Or plus, une pollution importante des eaux du barrage a été signalé par Seklaoui-Oukid (2016) qui a classé le barrage comme le plus pollué parmi les barrages du bassin de Chélif.

Le recours à la télédétection s'avère très utile pour le suivi spatio-temporel de la dynamique de la retenue du barrage de Merdja Sidi Abed. Cette section présente une étude exploitant les capacités de l'imagerie satellitaire haute résolution à fournir des informations pertinentes pour caractériser l'état de ce barrage.

2. Télédétection pour la cartographie et la surveillance des zones humides

La cartographie des eaux de surface d'un bassin versant constitue un élément clé pour étudier et modéliser leurs rôles dans tout système hydrologique. Cependant, l'extraction rapide et précise de ses surfaces est un défi majeur en raison de la variété spatiale des objets de la surface terrestres. Cela nécessite des observations répétitives à la fois dans l'espace et dans le temps. Plus l'observation est répétée plus elle sera fiable et riche d'informations.

La nécessité d'étudier et de suivre des surfaces d'eau entières conduit à considérer la télédétection comme un outil de base (Carbonneau et Piégay, 2012). Ces dernières années, plusieurs études ont utilisé les données de télédétection pour le domaine de recherche sur les étendus d'eau superficiels tels que la cartographie, le cycle de carbone et la dynamique hydrologique (Kaplan et al., 2019).

Plusieurs types de données de télédétection spatiale, aérienne ou au sol ont été utilisés incluant :

- ✓ Les capteurs radar actifs et passifs (interférométrie, radar à ouverture synthétique ou SAR)
- ✓ Les capteurs multi ou hyperspectrales (imagerie visible et infrarouge)
- ✓ Les données Laser/Lidar
- ✓ Les images fournies par les drones

De nombreuses techniques sont désormais développées utilisant les produits dérivés des images satellitaires qui peuvent fournir des informations non décelables per l'œil humain. Les indices spectraux ou pseudo-canaux sont en très grande utilité pour caractériser les états de surfaces terrestres et notamment les étendus d'eaux. Ces indices sont basés sur une combinaison arithmétique entre deux ou plusieurs bandes spectrales. Dans cet axe, on peut mettre en évidence :

- Les indices de végétation :
- Les indices du sol
- Les indices de l'eau

2.1. Les indices de végétation

Les indices de végétation sont calculés par des expressions sous forme soit de formules simples de différence ou de ratio, soit de formules plus complexes. Ils tiennent compte de la signature spectrale de la végétation qui a une forte réflectance dans le Proche Infra Rouge (PIR) et une absorption dans le Rouge utilisant le contraste entre ces deux bandes spectrales (Fig. 7-1).

Les indices de végétation sont très utilisés pour suivre la dynamique de la végétation et pour estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux, comme l'indice de surface foliaire, le stress hydrique, la biomasse...

Le tableau suivant présente quelques indices de végétation usuels en télédétection.

Tableau 7-1: Quelques indices spectraux de végétation

Nom indice	Abréviation	Formule
Ratio Vegetation Index	<i>RVI</i>	$\frac{PIR}{R}$
Differenced Vegetation index	<i>DVI</i>	$PIR - R$
Normalized Difference Vegetation Index	<i>NDVI</i>	$\frac{PIR - R}{PIR + R}$
Soil Adjusted Vegetation Index	<i>SAVI</i>	$\frac{PIR - R}{PIR + R + L} (1 + L)$
Atmospherically Resistant Vegetation Index	<i>ARVI</i>	$\frac{PIR - B}{PIR + B}$
Enhanced Vegetation Index	<i>EVI</i>	$G \frac{PIR - R}{PIR + C_1 R + C_2 B + L}$

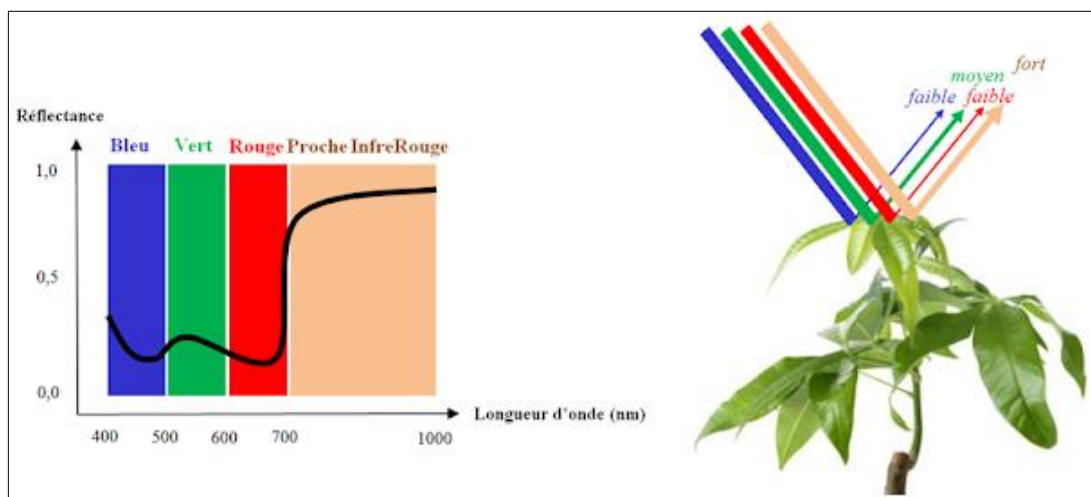


Figure 7-1: La signature spectrale d'une végétation verte (Source : site ESRI)

2.2. Les indices du sol

Comme pour la végétation, il existe des indices spectraux caractérisant l'état de la surface du sol. Ils permettent de distinguer la surface du sol des autres surfaces. Ces indices sont calculés généralement prenant en compte la signature spectrale des sols qui reflètent en grand partie le rayonnement électromagnétique dans le domaine du Rouge. Quelques indices du sol sont listés dans le tableau 7-2.

Tableau 7-2: Liste de quelques indices spectraux du sol

Nom indice	Abréviation	Formule
Brightness Index	<i>BI</i>	$\sqrt{R^2 + PIR^2}$
Redness Index	<i>RI</i>	$\frac{R^2}{B \times V^3}$
Color Index	<i>CI</i>	$\frac{R - V}{R + V}$
Bare Soil Index	<i>BSI</i>	$\frac{(MIR + R) - (PIR + B)}{(MIR + R) + (PIR + B)}$

2.3. Les indices de l'eau

De même que les deux types d'indices présentés précédemment, les indices spectraux de l'eau sont développés pour étudier les caractéristiques des étendus superficiels en eau. Ils sont utilisés comme des indicateurs sur l'état des surfaces en eau en combinant des bandes spectrales dans le visible que dans l'infrarouge.

En exploitant l'information spectrale fournie par imagerie satellitaire, divers renseignements sur les plans d'eau peuvent être extraits à savoir la profondeur, la turbidité, la couleur, la température ainsi que les limites sol/eau.

Plusieurs indices ont été proposés par les chercheurs dans ce cadre. Ces indices mettent en œuvre les bandes d'absorption de l'eau dans le Moyen Infrarouge (MIR) qui sont fortement corrélées avec les caractéristiques de l'eau (Kaplan et al., 2019) (Fig. 7-2). Parmi les indices de l'eau les plus utilisés, on peut citer : Normalized Difference Water Index (NDWI), Modified NDWI (MNDWI), Simple Ratio Water Index (SRWI) et Normalized Difference Turbidity Index (NDTI). Le tableau 7-3 résume les formules utilisées pour calculer ces indices.

3. Présentation du barrage de Merdja Sidi Abed

3.1. Localisation géographique du retenu du barrage

Le barrage de Merdja Sidi Abed est situé à l'ouest de l'Algérie dans la wilaya de Relizane en extrême limite de la wilaya avec celle de Chlef. Il se localise entre la ville de l'Oued-Rhiou à l'ouest et la ville de Bou kadir à l'est en bordure de l'autoroute Est-Ouest et de la route nationale 04 (Fig. 7-3).

Tableau 7-3: Les indices spectraux caractérisant l'eau

Nom indice	Abréviation	Formule
Normalized Difference Water Index	NDWI	$\frac{V - PIR}{V + PIR}$
Modified Normalized Difference Water Index	MNDWI	$\frac{V - MIR}{V + MIR}$
Water Ratio Index	WRI	$\frac{V + R}{PIR + MIR}$
Normalized Difference Turbidity Index	NDTI	$\frac{R - V}{R + V}$

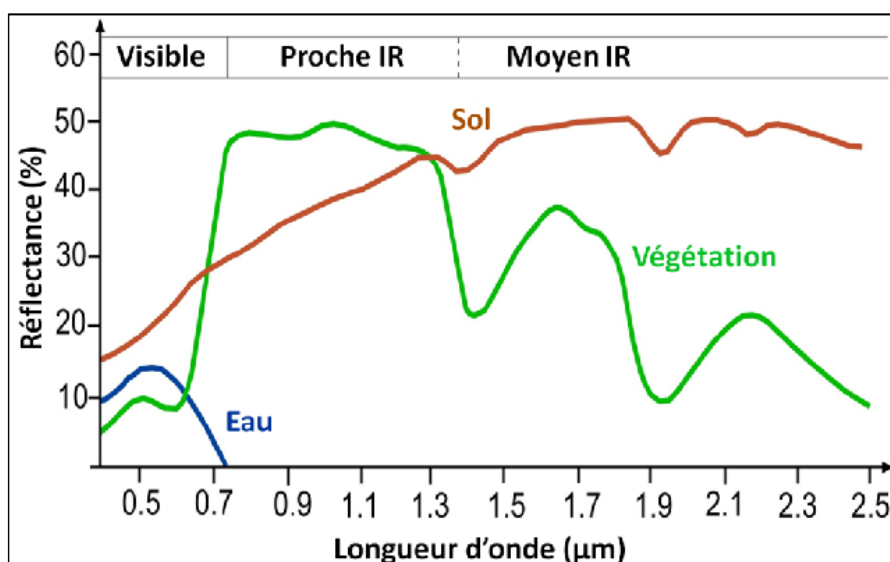


Figure 7-2: La signature spectrale de l'eau vis à vis les sols et la végétation

Le barrage se trouve dans la plaine d'Oued Chélif et est alimenté à partir de deux sources : un canal gravitaire et une station de pompage équipée de 04 pompes d'une capacité chacune de 1,75 m³/s qui pompent les eaux à partir d'un canal appelé tronc commun alimenté par le Chélif au niveau du barrage de Boukadir situé en amont du site de la Merdja.

3.2. Etat du barrage de Merdja Sidi Abed

Le barrage de Merdja Sidi Abed permet d'irriguer la plaine du Bas Chélif en dérivant les eaux circulant dans le canal (tronc commun) par gravitation. Selon l'ANBT, le volume régularisé est de 45 Hm³ par an.

Le barrage a été mis en service en 1984 avec une capacité initiale de stockage de l'ordre de 54.90 Hm³. Les principales caractéristiques de la retenue sont présentées dans le tableau 7-4.

Tableau 7-4: Caractéristiques du barrage Merdja Sidi Abed et de son bassin versant

Date de mise en service	1984
Superficie du bassin versant	101 Km ²
Apport moyen interannuel du bassin versant	40 Hm ³ (PNE) contre 3.38 Hm ³ estimé par l'ABH
La capacité initiale du barrage	54.90 Hm ³
Volume régularisé	40 Hm ³ /an
Apport réel au barrage	24.21 Hm ³ (période 1990 - 2001)

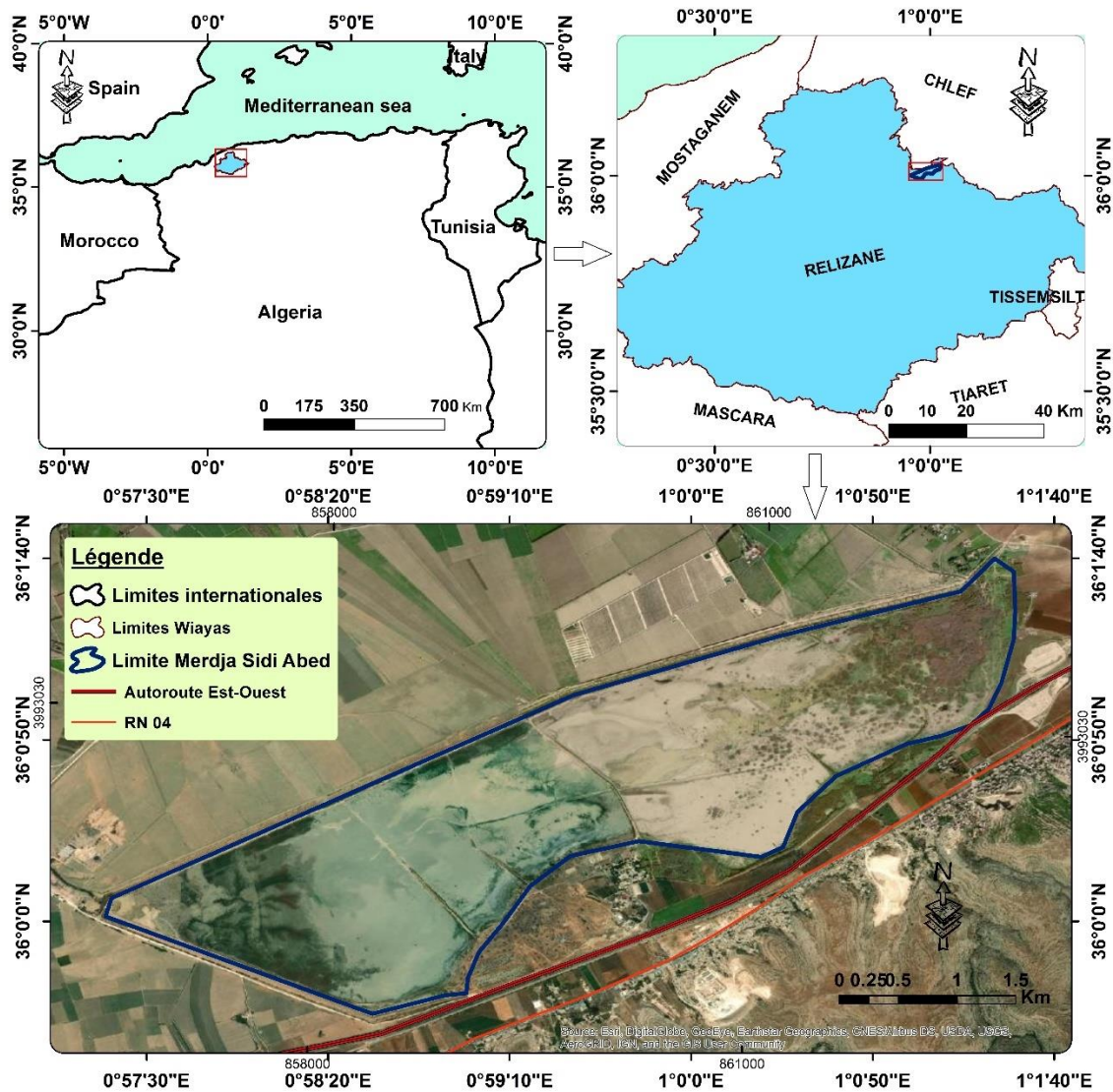


Figure 7-3: Localisation géographique du barrage de Merdja Sidi Abed

Le barrage de Merdja Sidi Abed à proprement parler est constitué pour sa plus grande partie par une digue artificielle entourant une large plaine au nord, à l'ouest et au sud (Seklaoui-Oukid, 2016). L'oued Chélif qui passe au nord alimente la retenue du barrage par pompage.

Après sa mise en eau, le barrage a fait des lâchés périodiques du 1987 à 1999 pour irriguer du périmètre du Bas Cheliff d'une superficie moyenne irriguée de 1616 ha avec un volume moyen de l'ordre de 15 Hm³/an. A cela s'ajoutent les lâchés pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Oran durant la période (1988-1993) d'un volume moyen de 11,42 Hm³.

L'exploitation du barrage a été interrompue en 1999 grâce à l'envasement et de tarissement de la retenue. Cet ouvrage a été programmé dans le cadre de désenvasement

dont le volume de sédiment à draguer est de 5 millions de m³. Pour cela, l'ANBT a lancé des opérations de dragage en 2004 afin de pouvoir reprendre l'exploitation du barrage.

Les levés bathymétriques lancés par l'ANBT en 2004 permettent de surveiller le taux d'envasement du barrage et de mesurer le volume de la réserve en eau de la retenue.

Les résultats des mesures effectuées sont présentés dans le tableau ci-dessous.

D'après les chiffres du tableau 7-2, le taux de perte moyenne annuelle entre 1984 (mise en eau) et 2004 est de l'ordre de 346 500 m³/an avec une perte totale en capacité de stockage de 6.93 Hm³. Par conséquent, durant cette période le barrage a subi un taux d'envasement de l'ordre de 12.62%.

Selon les déclarations des gestionnaires du barrage, en addition au problème d'envasement dû à la forte érosion, il est à signaler le problème de l'assèchement situé en amont du barrage et plus exactement dans la wilaya de Chlef, où sont pompées les eaux destinées à la retenue et la sécheresse persistante qui affecte la région depuis plusieurs années. Le grand potentiel évaporatif qu'a connu la région avec les canicules de plus haut niveau a aggravé l'état du barrage où l'accumulation de la vase a dépassé toutes les normes et a grandement réduit ses capacités de stockage en eaux.

Il est à noter que la qualité des eaux de ce barrage est très dégradée. Avec des teneurs très élevées des paramètres physico-chimiques, matières organiques et matières azotées. Cette pollution est due principalement aux apports directs de l'oued qui pénètrent sans auto-filtration dans le bassin du barrage (Seklaoui-Oukid, 2016).

Tableau 7-5: Evolution de la perte de capacité de la retenue du barrage de Merdja Sidi Abed (Source : ANBT, 2004)

Année	1984	1996	2004
Capacité à la RN (hm ³)	54.90	48.08	47.97
Perte par rapport à la capacité initiale (hm ³)	–	6.82	6.93
Perte par rapport à la capacité initiale (%)	–	12.42	12.62

4. Données et méthodes

Ce travail consiste en un suivi et une cartographie de la dynamique interannuelle de la retenue du barrage de Merdja Sidi Abed dans la wilaya de Relizane durant la période 2014-2020. La méthode permet d'investiguer le changement spatiotemporel de la surface d'eau du barrage en se basant sur le calcul des indices spectraux dérivés des données de télédétection optique pour extraire et délimiter l'évolution de l'étendue d'eau. Devant l'insuffisance des données historiques, cette méthode peut être très bénéfique pour les gestionnaires en termes d'inventaire et de prévision des ressources en eau.

Par conséquent, nous utilisons dans cette étude des images satellitaires issues de deux capteurs multi spectraux ceux de Landsat 7 ETM+ et Sentinel 2 MSI. Ces images sont fournies par la plateforme Google Earth Engine (GEE), basée sur le Cloud, permettant la visualisation et l'analyse des données géospatiales. Le travail est réalisé en deux phases :

- La première, couvre la sélection et le traitement des données spatiales en utilisant la plateforme de GEE. Cette plateforme donne accès à des images satellites à haute résolution et à des capacités d'analyse à l'échelle planétaire pour permettre aux chercheurs une éventuelle détection de changement, de cartographie et de quantification des différences observées à la surface de la Terre. Pour notre cas, nous avons limité nos données à celles de Landsat et Sentinel 2 durant la période de 2014 à 2020. Cette étape se fait entièrement en ligne sans aucun besoin de téléchargement de données ou d'installation de logiciel. Tous se fait dans le Cloud.
- La seconde, correspondant au travail hors ligne avec des logiciels de traitements d'images satellitaires et des SIG. A ce stade, les données traitées et analysées dans GEE seront exportées et transférées à un compte Google Drive puis stockées dans un support physique (Disque dur ou autre) pour pouvoir les utilisées pour la cartographie et l'étude du changement de l'étendu de notre site d'étude.

Les différentes étapes de la démarche méthodologique suivie dans ce travail sont illustrées dans le diagramme de la figure 7-4.

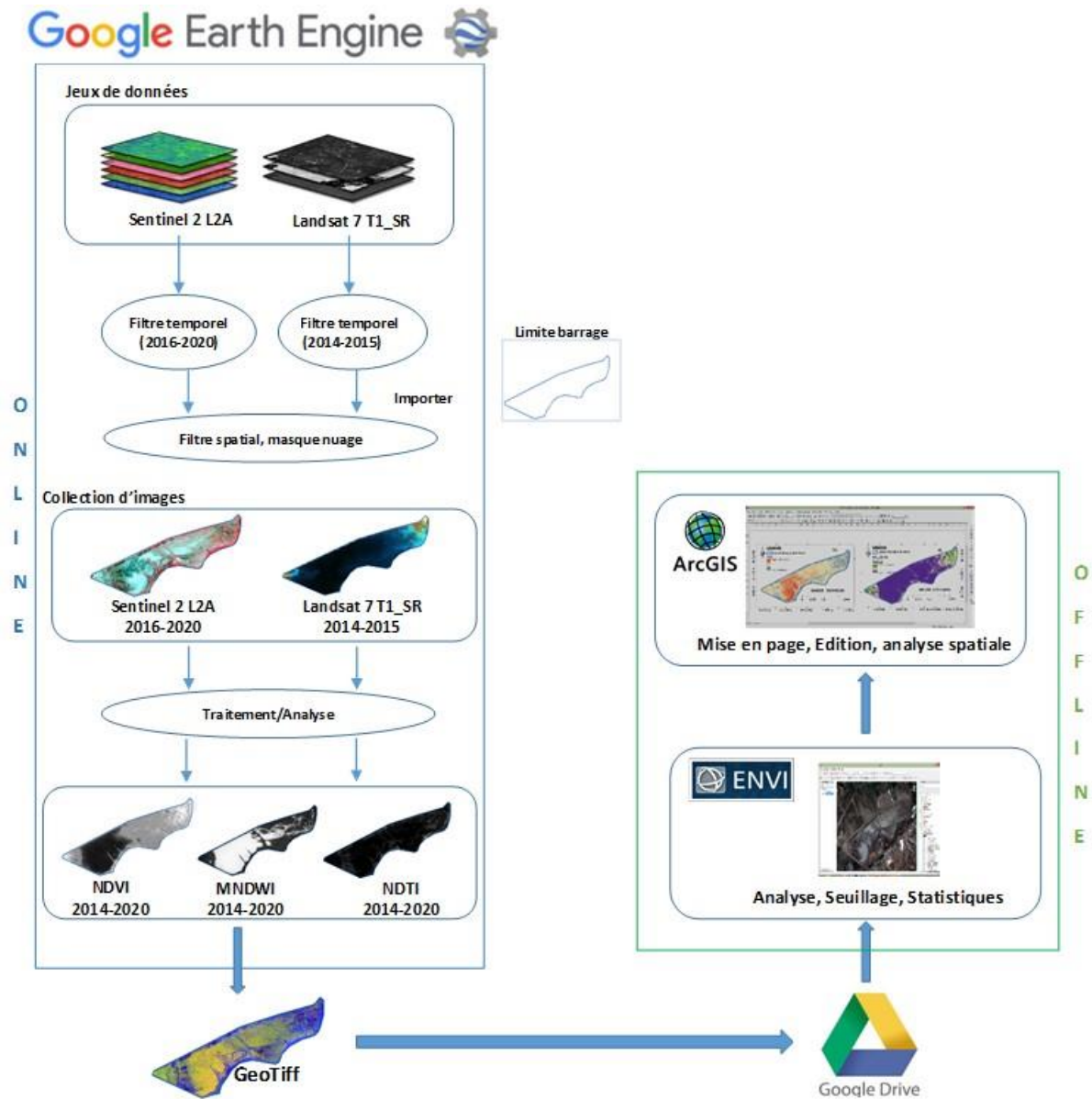


Figure 7-4: Diagramme des étapes de la méthodologie adoptée

4.1. Sélection des données dans GEE

En premier lieu, les images satellitaires à utiliser dans ce travail ont été sélectionnées en utilisant la plateforme de GEE. Depuis quelques années, Google a développé le service nommé GEE sous forme une plateforme qui permet d'accéder à un catalogue de pétaoctet de données géospatiales prêtes à être utilisées d'une manière assez simple (Gorelick et al., 2017).

La plateforme est accédée via un navigateur web et permet d'intégrer nos propres données et de télécharger les résultats obtenus afin de les traiter par la suite après avoir les exportées. Cette tâche nécessite un compte Google pour la saisie d'un code en

Javascript par l'utilisateur qui s'exécute sur les serveurs de Google. Les éléments de l'interface de la plateforme se présentent dans la figure 7-5.

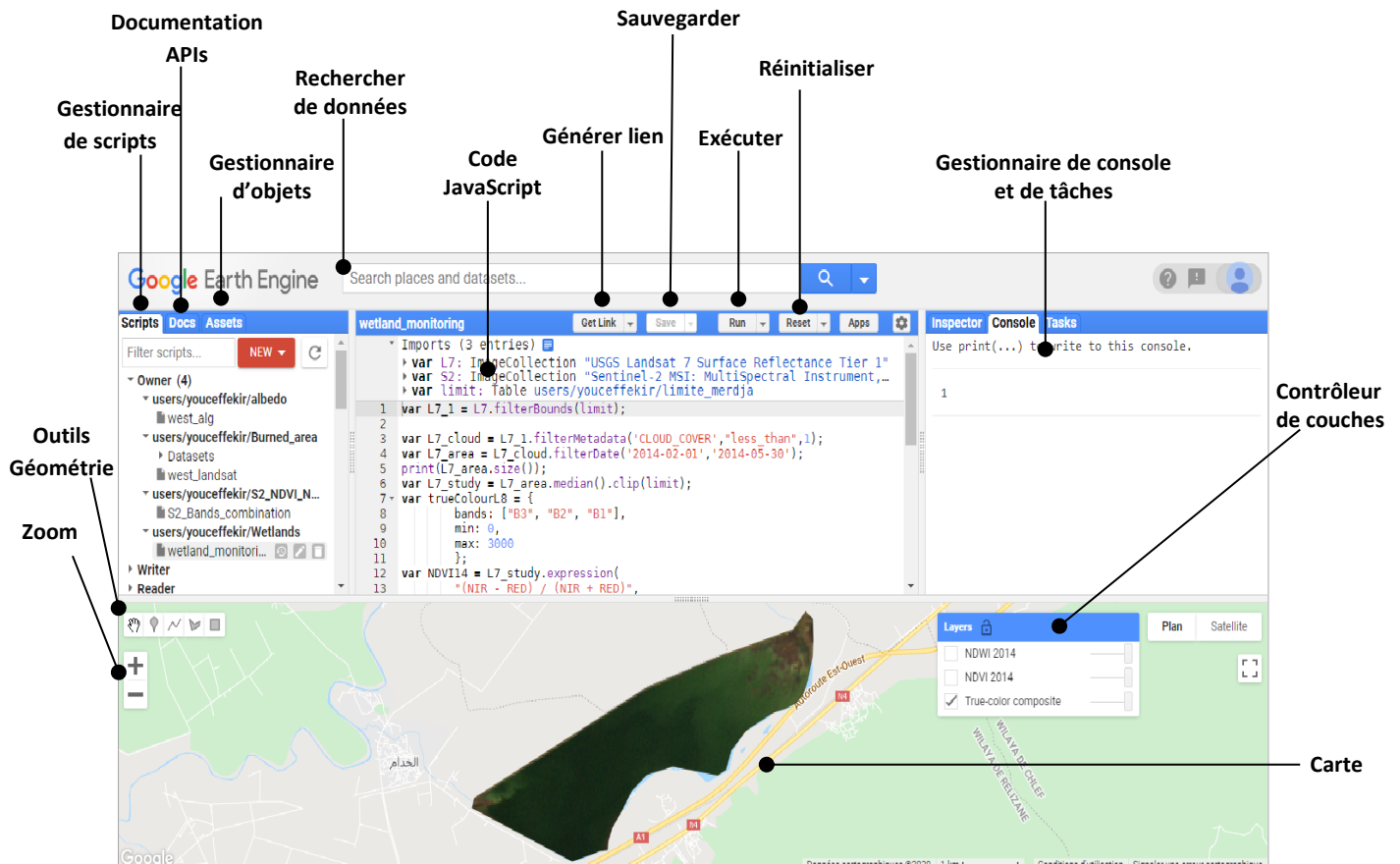


Figure 7-5: L'interface de la plateforme de GEE

Les principaux outils de l'interface illustrée ci-dessus sont :

- Rechercher de données : c'est un outil qui permet à l'utilisateur de rechercher les collections de données disponibles par GEE. Il suffit de saisir un ou plusieurs mots clés de recherche et le service vous suggèrera des résultats.
- Gestionnaire de Script : cet outil est utilisé pour créer un dossier où les scripts seront sauvegarder. On peut même renommer ou supprimer un dossier où sauvegarder plusieurs scripts dans le même dossier.
- Documentation APIs : il sert à consulter une documentation sur les fonctions des APIs utilisées dans les scripts écrits par l'utilisateur à travers des exemples.
- Gestionnaire d'objets : cet outil est très utile dans la mesure où l'utilisateur peut importer des objets vectoriels (Shapefile, CSV, Json) ou raster (Tif, GeoTiff) pour un éventuel traitement.
- Un espace réservé pour éditer le code JavaScript.

- Des outils pour sauvegarder, exécuter ou réinitialiser les codes JavaScript écrit.
- Un outil pour pouvoir générer un lien http du code développé pour pouvoir le partager et l'exécuter par d'autres utilisateurs.
- Un conteneur pour afficher la carte ainsi que les couches générées.
- Des outils de géométrie (dessin des objets ponctuels, linéaires ou polygonaux), de zoom et déplacement et de contrôle des couches à afficher.

Le service de GEE fournit un ensemble de données sous forme de catalogues de données que peuvent être accédées et intégrées aux applications. Ces catalogues correspondent à un historique de 40 ans d'imagerie satellitaire pour tout le globe terrestre (Kumar et Mutanga, 2018). En plus des images satellitaires, des informations sur l'occupation du sol et des données climatiques et météorologiques sont éventuellement disponibles. Une description de quelques collections de données fournies par GEE est présentée dans le tableau 7-3.

Tableau 7-6: Liste de quelques données satellitaires disponibles dans GEE (Source : Kumar et Mutanga, 2018)

Collection	Description	Disponibilité de données	Résolution (m)	Répétitivité	Fournisseur
Landsat 5 MSS	Tier 1 et 2 (raw)	1 Mars 1984–31 Janvier	30, 60	16 jours	USGS
Landsat 5 TM	Tier 1 et 2 (Raw, TOA et Réflectance au sol);	1 Janvier 1984–5 Mai 2012	30	16 jours	USGS
Landsat 7	Tier 1 et 2 (Real time, Raw, TOA et Réflectance au sol);	1 Janvier 1999–présent	15, 30	16 jours	USGS
Landsat 8	Tier 1 et 2 (Real time, Raw, TOA et Réflectance au sol);	11 Avril 2013–présent	15, 30	16 jours	USGS
Sentinel-1 SAR GRD	C-band SAR Ground Range Detected	3 Octobre 2014–présent	10	3 jours	Union Européen /ESA/Copernicus
Sentinel-2 MSI	Instrument Multi Spectral, Niveau L1C Niveau L2A	23 Juin 2015–present 28 Mars 2017–présent	10-20-60	5 jours	Union Européen /ESA/Copernicus
MODIS (Aqua and Terra)	Plusieurs bandes, indices et composites	24 Février 2000–présent	250, 500, 1000	1 jour	NASA LP DAAC / USGS EROS Center

Dans cette étude, nous avons utilisé

- Des images de Landsat 7 Tier 1 qui correspondent aux données de réflectance au sol avec une résolution spatiale de 30m pour les années 2014 et 2015.
- Des images de Sentinel 2 MSI L1C correspondant aux données de réflectance au sommet de l'atmosphère avec une résolution de 10 et 20 m pour les années du 2016 à 2020.

4.2. Les données Landsat 7 Tier 1 Réflectance au sol

Les données Landsat que nous avons utilisé dans ce travail est un produit issu du capteur multispectral Landsat 7 ETM+. Elles concernent des images orthorectifiées de type Tier 1 qui correspondent à la réflectance au sol corrigée des effets de l'atmosphère et disposent d'une résolution spatiale de 30 m. Notre sélection porte sur les images acquises entre 2014 et 2015.

Le capteur ETM+ acquiert des images avec 04 bandes en visible-infrarouge, 02 en moyen infrarouge et 01 en infrarouge thermique avec une couverture de 170 km x 183 Km. Les caractéristiques techniques de ces données sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7-7: Les caractéristiques des images de Landsat 7 (Source : Catalogue de données GEE)

Nom	Unité	Longueur d'onde	Description
B1		0.45-0.52 μm	Bande 1 : bleu
B2		0.52-0.60 μm	Bande 2 : vert
B3		0.63-0.69 μm	Bande 3 : rouge
B4		0.77-0.90 μm	Bande 4: proche infrarouge
B5		1.55-1.75 μm	Bande 5: moyen infrarouge 1
B6	Kelvin	10.40-12.50 μm	Bande 6 : température de brillance
B7		2.08-2.35 μm	Bande 7 : moyen infrarouge 2

4.3. Les données Sentinel 2 L1C

La mission Sentinel-2 se compose de deux satellites identiques : Sentinel-2A, lancé le 23 juin 2015, et Sentinel-2B, lancé en 2017 avec une répétitivité de l'ordre de cinq jours. Ils embarquent chacun un instrument multispectral (MSI) qui produit des images avec une fauchée de 290 km avec une acquisition en 13 bandes spectrales et une haute résolution spatiale de 10, 20 et 60 m (ESA,2015).

Avec la haute résolution spatiale, la richesse spectrale (4 bandes visibles, 6 bandes PIR et 3 bandes MIR) et le temps de revisite assez court, les données Sentinel 2 deviennent un outil très intéressant pour le suivi des états de surface terrestre. En effet, elles ont été très utiles à plusieurs études du sol, mers et océans et de l'atmosphère.

Le tableau 7-8 présente les différentes caractéristiques des images Sentinel 2.

Tableau 7-8: Les propriétés des images Sentinel 2 MSI (Source : Catalogue de données GEE)

Nom	Résolution	Longueur d'onde	Description
B1	60 m	443.9nm (S2A) / 442.3nm (S2B)	Aérosols
B2	10 m	496.6nm (S2A) / 492.1nm (S2B)	Bleu
B3	10 m	560nm (S2A) / 559nm (S2B)	Vert
B4	10 m	664.5nm (S2A) / 665nm (S2B)	Rouge
B5	20 m	703.9nm (S2A) / 703.8nm (S2B)	Red Edge 1
B6	20 m	740.2nm (S2A) / 739.1nm (S2B)	Red Edge 2
B7	20 m	782.5nm (S2A) / 779.7nm (S2B)	Red Edge 3
B8	10 m	835.1nm (S2A) / 833nm (S2B)	PIR
B8A	20 m	864.8nm (S2A) / 864nm (S2B)	Red Edge 4
B9	60 m	945nm (S2A) / 943.2nm (S2B)	Vapeur d'eau
B10	60 m	1373.5nm (S2A) / 1376.9nm (S2B)	Cirrus
B11	20 m	1613.7nm (S2A) / 1610.4nm (S2B)	MIR 1
B12	20 m	2202.4nm (S2A) / 2185.7nm (S2B)	MIR 2

4.4. Traitements de données

Afin de cartographier et suivre la dynamique de la retenue du barrage de Merdja Sidi Abed, une série de traitements sont nécessaires. Ces traitements s'exécutent selon deux niveaux :

- ✓ Premièrement, on procède à la recherche de jeux de données spatiales avec GEE, leur sélection, leur filtrage et leur découpage selon notre zone d'étude puis à leur traitement en vue d'obtenir les résultats et les exportés. Cette étape se fait entièrement **en ligne** ce qui nécessite une connexion à internet.
- ✓ Deuxièmement, les résultats obtenus et exportés dans la phase précédente sont ensuite récupérés et analysés avec des logiciels ENVI et ArcGIS où les étapes se fait **hors ligne**.

4.4.1. Choix des images dans GEE

Les traitements effectués dans la plateforme de GEE nécessitent l'écriture d'un code en JavaScript dans son éditeur de code. Cela ne requiert d'un compte Google pour s'authentifier au service et un prérequis en programmation et permet d'éviter le téléchargement d'un gros volume de données et un temps d'exécution très rapides. Le

déroulement des tâches incluses dans cette partie est expliqué à travers du code JavaScript utilisé par ordre d'exécution :

- La sélection des collections de données de Landsat 7 et Sentinel 2 :

```
var L7 = ee.ImageCollection(« LANDSAT/LE07/C01/T1_SR »),  
var S2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2"),
```

- L'importation de la limite du barrage en format vectoriel dans la plateforme de GEE :

```
var limit = ee.FeatureCollection("users/youceffekir/limite_merdja");
```

- Le filtrage des images qui couvrent l'étendue géographique de la zone d'étude :

```
var L7_1 = L7.filterBounds(limit);  
var S2_1 = S2.filterBounds(limit);
```

- La sélection des images avec une couverture nuageuse minimale :

```
var L7_cloud = L7_1.filterMetadata('CLOUD_COVER', "less_than", 1);  
var S2_cloud = S2_1.filterMetadata('CLOUD_COVERAGE_ASSESSMENT', "less_than", 1);
```

- Le filtrage temporel des images selon la série des dates. Par exemple la sélection des images de Landsat 2014 et Sentinel 2016 :

```
var L7_area = L7_cloud.filterDate('2014-03-01', '2014-03-20');  
var S2_area = S2_cloud.filterDate('2016-03-19', '2016-03-22');
```

- Le découpage des images selon la limite de la retenue du barrage :

```
var L7_study = L7_area.clip(limit);  
var S2_study = S2_area.clip(limit);
```

4.4.2. Calcul des indices spectraux dans GEE

La méthode que nous avons adoptée pour suivre la dynamique de notre zone d'étude s'appuie sur l'utilisation des indices spectraux pour délimiter et extraire la surface d'eau. Cette opération se répète pour toute la série des années de 2014 à 2020.

Le choix judicieux des indices adéquats est une tâche très importante. En effet, plusieurs facteurs doivent être pris en considération en particulier l'interaction des objets de l'interface sol-eau-végétation. Plusieurs indices spectraux existent dans la littérature et qui ont été utilisés pour caractériser l'état de la surface terrestre. Vue l'interférence du sol, de l'eau et de la végétation constatée au barrage de Merdja Sidi Abed, nous avons opté trois indices : l'indice de végétation NDVI, l'indice de l'eau MNDWI et l'indice du sol BSI.

- ✓ **NDVI**: c'est l'indice spectral de végétation le plus connu et le plus utilisé. Il met en évidence la présence d'un couvert végétal en fonction d'une différence normalisée entre les réflectances dans les bandes de Rouge et PIR en utilisant la formule suivante :

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} = \frac{B4_{L7}-B3_{L7}}{B4_{L7}+B3_{L7}} = \frac{B8_{S2}-B4_{S2}}{B8_{S2}+B4_{S2}} \quad 7.1$$

Où L7 : Landsat 7 et S2 : Sentinel 2.

Ainsi, les valeurs du NDVI sont dans l'intervalle [-1,1] où les valeurs supérieures correspondent à une densité élevée de végétation, et où les valeurs nulles ou négatives indiquent l'absence de végétation. Cependant, Alenso et al. (2016) a considéré que l'indice est suffisant pour distinguer la végétation des autres objets.

Le NDVI de notre zone d'étude est calculé du 2014 à 2020 par les images fournies par GEE en utilisant les scripts suivants :

```
var NDVI2014 = L7_study.normalizedDifference(['B4', 'B3']);
var NDVI2016 = S2_study.normalizedDifference(['B8', 'B4']);
```

- ✓ **MNDWI**: l'indice de l'eau MNDWI est calculé de même que le NDVI sauf qu'il utilise les bandes Verte et MIR au lieu de PIR et Rouge et par conséquent il aura des valeurs comprises entre -1 et 1. Il est parmi les indices les plus utilisés pour caractériser les surfaces d'eau libre grâce à la sensibilité de la bande MIR à l'eau et la minimisation des effets du sol (Xia et al, 2019). La formule utilisée pour calculer les valeurs du MNDWI est comme suit :

$$MNDWI = \frac{V-MIR}{V+MIR} = \frac{B2_{L7}-B5_{L7}}{B2_{L7}+B5_{L7}} = \frac{B3_{S2}-B11_{S2}}{B3_{S2}+B11_{S2}} \quad 7.2$$

Avec L7 : Landsat 7 et S2 : Sentinel 2.

Les surfaces d'eau sont caractérisées par valeurs de MDNWI positives et les valeurs négatives correspondent à l'absence de l'eau. Comme le NDVI, le MNDWI est calculé du 2014 à 2020 dans la plateforme de GEE en utilisant les scripts suivants :

```
var MNDWI2014 = L7_study.normalizedDifference(['B2', 'B5']);
var MNDWI2016 = S2_study.normalizedDifference(['B3', 'B11']);
```

- ✓ **BSI**: l'indice du sol nu (Bare Soil Index) est indice très utile pour déceler les sols nus des autres classes d'occupation. C'est une combinaison de quatre bandes

spectrales à savoir MIR, Rouge, PIR et Bleue sous forme une différence normalisée exprimée par l'équation suivante :

$$BSI = \frac{(MIR+R)-(PIR+B)}{(MIR+R)+(PIR+B)} = \frac{(B5_{L7}+B3_{L7})-(B4_{L7}+B1_{L7})}{(B5_{L7}+B3_{L7})+(B4_{L7}+B1_{L7})} = \frac{(B11_{S2}+B4_{S2})-(B8_{S2}+B2_{S2})}{(B11_{S2}+B4_{S2})+(B8_{S2}+B2_{S2})} \quad 7.3$$

Où L7 : Landsat 7 et S2 : Sentinel2.

Les bandes spectrales MIR et Rouge sont utilisées pour caractériser la composition minérale du sol, tandis que les bandes spectrales Bleue et PIR sont utilisées pour décrire la végétation (Rasul et al., 2018). Les scripts utilisés pour calculer les valeurs de BSI sont listés ci-dessous :

```
var BSI2014 = L7_study.expression(
  '((mir+red) - (pir+blue)) / ((mir+red) + (pir+blue))',
  {
    mir: L7_study.select('B5'),
    red: L7_study.select('B3'),
    pir: L7_study.select('B4'),
    blue: L7_study.select('B1')
  });
var BSI2016 = S2_study.expression(
  '((mir+red) - (pir+blue)) / ((mir+red) + (pir+blue))',
  {
    mir: S2_study.select('B11'),
    red: S2_study.select('B4'),
    pir: S2_study.select('B8'),
    blue: S2_study.select('B2')
  });
```

Après avoir créé les différentes images des trois indices décrits précédemment, on procède à l'affichage de ces images dans la carte de GEE. Cela se fait par un simple ajout sous formes de couches raster superposables à la couche de base qui sera centrée au centre du barrage avec un certain niveau de zoom. Le code qui permet d'effectuer cette tâche est le suivant :

```
Map.addLayer(NDVI2020, {min: -1, max: 1}, "NDVI_2020_merdja");
Map.addLayer(NDVI2019, {min: -1, max: 1}, "NDVI_2019_merdja");
Map.addLayer(NDVI2018, {min: -1, max: 1}, "NDVI_2018_merdja");
Map.addLayer(MNDWI2019, {min: -1, max: 1}, "MNDWI_2019_merdja");
Map.addLayer(MNDWI2018, {min: -1, max: 1}, "MNDWI_2018_merdja");
Map.setCenter(0.9996, 36.007, 12);
```

Pour procéder aux traitements ultérieurs avec les logiciels ENVI et ArcGIS, les images des indices spectraux ainsi obtenus dans la plateforme de GEE doivent être exportées en format GeoTiff vers notre compte Google Drive. Par la suite, elles seront téléchargées et stockées dans un support physique. Le code JavaScript qui permet d'exécuter cette opération est le suivant :

```
Export.image.toDrive({  
  image: NDWI2018,  
  description: 'NDWI 2018 Merdja GeoTiff',  
  scale: 30,  
  region: geometry,  
  fileFormat: 'GeoTIFF'  
});
```

Toutes les opérations précédemment décrites peuvent être exécutées à travers GEE via le lien suivant :

<https://code.earthengine.google.com/7e01746ceb5c0b69f037bc47c56ce784?hideCode=true>

Un extrait du code source des scripts JavaScript développés par les APIs de GEE à ce stade est listé en annexe.

4.4.3. Extraction de la surface d'eau et évaluation de la précision

Les images des indices spectraux (NDVI, MNDWI et BSI) créées auparavant dans la plateforme de GEE sont téléchargées intégralement pour étudier et analyser la dynamique spatio-temporelle de la retenue du barrage de Merdja Sidi Abed. Pour comprendre cette dynamique, une analyse visuelle et statistique de ces images a été effectuée en premier temps, puis une extraction de la surface d'eau de la retenue pour toute la série temporelle est opérée (2014 à 2020).

Des compositions colorées fausses couleurs (PIR, Rouge, Vert) ont été réalisées afin d'interpréter visuellement les variations des caractéristiques des différents objets pour toutes les scènes.

Pour extraire la surface d'eau, nous avons basé sur les variations des valeurs des indices spectraux ainsi choisis. Nous avons procédé à une extraction pour chacune des images des trois indices pour chaque année. La méthode que nous avons retenue repose sur une classification binaire ou binarisation en deux classes **eau** et **non-eau**.

En étudiant l'histogramme bimodal des images de NDVI, MNDWI et BSI, un seuil doit être défini pour pouvoir séparer les objets en deux classes distinctes (Fig. 7-6). En prenant en compte le comportement de l'eau le long du spectre électromagnétique et les valeurs correspondantes pour chaque indice, le choix d'un tel seuil n'est pas assez simple. En effet, parmi les méthodes utilisées permettant de déterminer un seuil optimal pour binariser une image, l'algorithme d'Otsu est largement utilisé en télédétection.

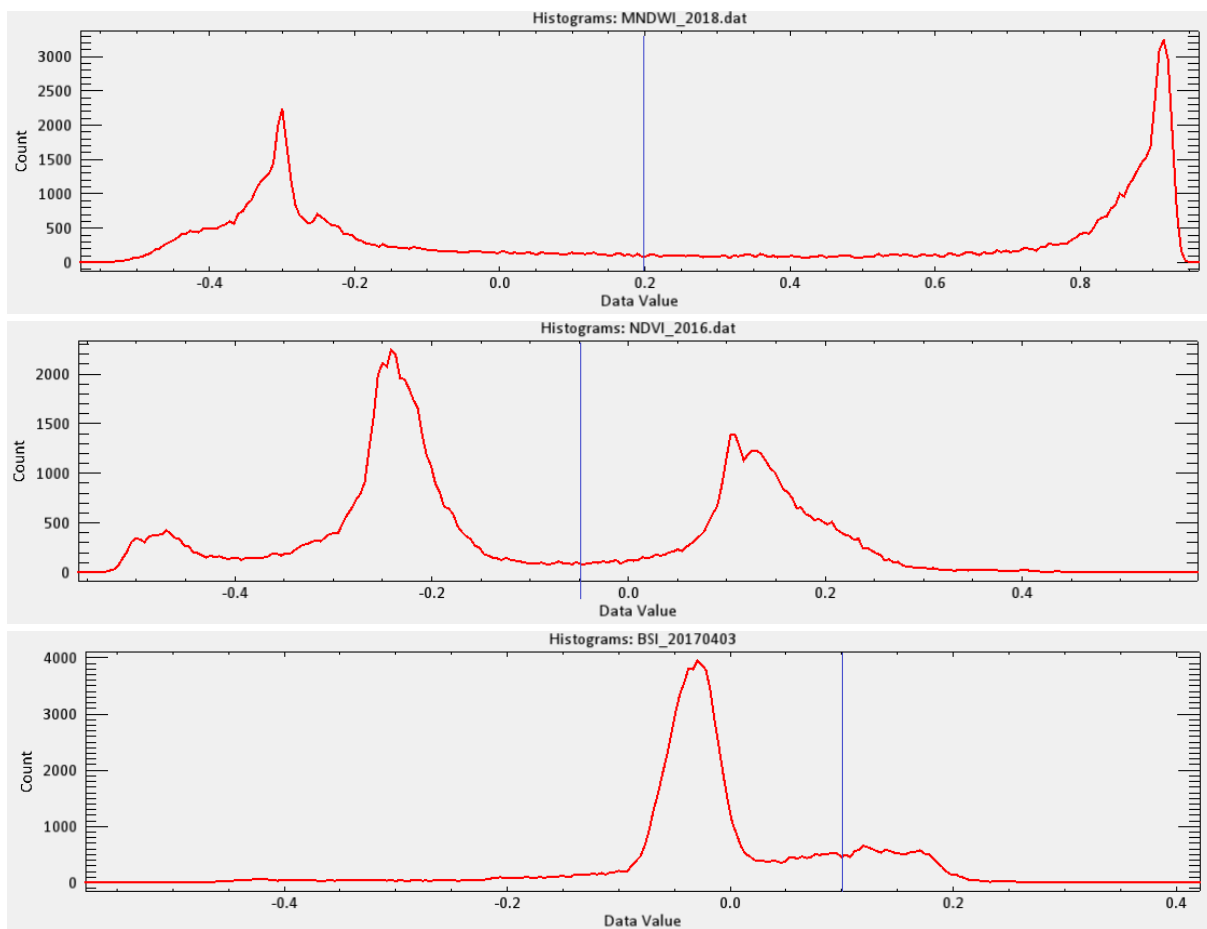


Figure 7-6: L'histogramme bimodal des indices NDVI, MNDWI et BSI

La méthode Otsu suppose que l'image contient deux classes de pixels suivant un histogramme bimodal. Elle calcule un seuil optimum séparant les deux classes pour que leur variance interclasse soit maximale (Buma et al., 2018). Cette fonction est disponible dans les fonctions des traitements raster du logiciel ArcGIS.

La validation des images binaires ainsi obtenus, correspondant aux classes Eau/Non-eau, est une tâche nécessaire et indispensable. En l'absence de données de terrains sur les superficies de l'étendue d'eau, la délimitation de la surface d'eau digitalisée à partir des images de Google Earth ont été considérées comme référence. Une numérisation manuelle a été faite à des dates proches des images utilisées pour réduire l'effet des variations spatiotemporelles de la surface d'eau.

L'étude de la performance de NDVI, MNDWI et BSI à extraire la surface d'eau se fait par l'évaluation de la précision des résultats obtenus à travers le calcul de 03 paramètres :

- Précision de réalisateur ou *Producer Accuracy* (PA) :

$$PA = \frac{\text{Superficie des zones bien classées par l'indice}}{\text{superficie de l'eau de référence}} \quad 7.4$$

- Précision de l'Utilisateur ou *User Accuracy* (UA):

$$UA = \frac{\text{superficie des zones bien classées par l'indice}}{\text{superficie des zones classées eau par l'indice}} \quad 7.5$$

- Précision Globale ou *Overall Accuracy* (OA) :

$$OA = \frac{\text{Superficie des zones bien classées positives et négatives}}{\text{Superficie totale de la zone d'étude}} \quad 7.6$$

5. Résultats et discussion

L'analyse des résultats obtenus de la série temporelle des images (2014 – 2020) ainsi que les indices spectraux calculés (NDVI, MNDWI et BSI) est présentée ci-dessous.

5.1. Analyse des compositions fausse couleur

Afin de voir les changements de la surface d'eau de la retenue de Merdja Sidi Abed, nous avons produit des images fausses couleurs par une composition RVB utilisant les bandes PIR, Rouge et Verte. L'interprétation visuelle des images de 2014 à 2020 (Fig. 7-7) met en évidence la dynamique inter-annuelle importante de la retenue du barrage où la surface en eau peut être facilement reconnue par son fort contraste avec les objets environnants.

En effet, cette dynamique est caractérisée durant cette période par trois niveaux remarquables :

- ✓ 2014-2015 : durant ces deux années, le niveau de la retenue est presque dans le même niveau. La surface d'eau apparaît par une couleur Bleu foncé et occupe la majorité de la retenue. On constate également une eau peu profonde et turbide (couleur bleu ciel ou cyan) dans la rive nord-est du barrage.

- ✓ 2016-2018 : c'est à partir de 2016 que la surface se rétrécit significativement presque à la moitié. La partie centrale de la retenue reste un peu profond avec une dynamique de recul du nord-est au sud-ouest. En 2017 et 2018, une forte turbidité caractérise la surface d'eau (couleur mixte de cyan et verte) qui peut être expliquée par l'abaissement du niveau d'eau et l'accumulation des vases dans le bassin de la retenue. Nous signalons aussi l'apparence claire d'un couvert végétal dans la partie nord-est (couleur rouge) et en exutoire du bassin.

- ✓ 2019-2020 : c'est en ces deux années que le barrage est parvenu à un état très alarmante. Il apparut clairement que la retenue est presque asséchée surtout en 2020 où un fort contraste caractérise le bassin.

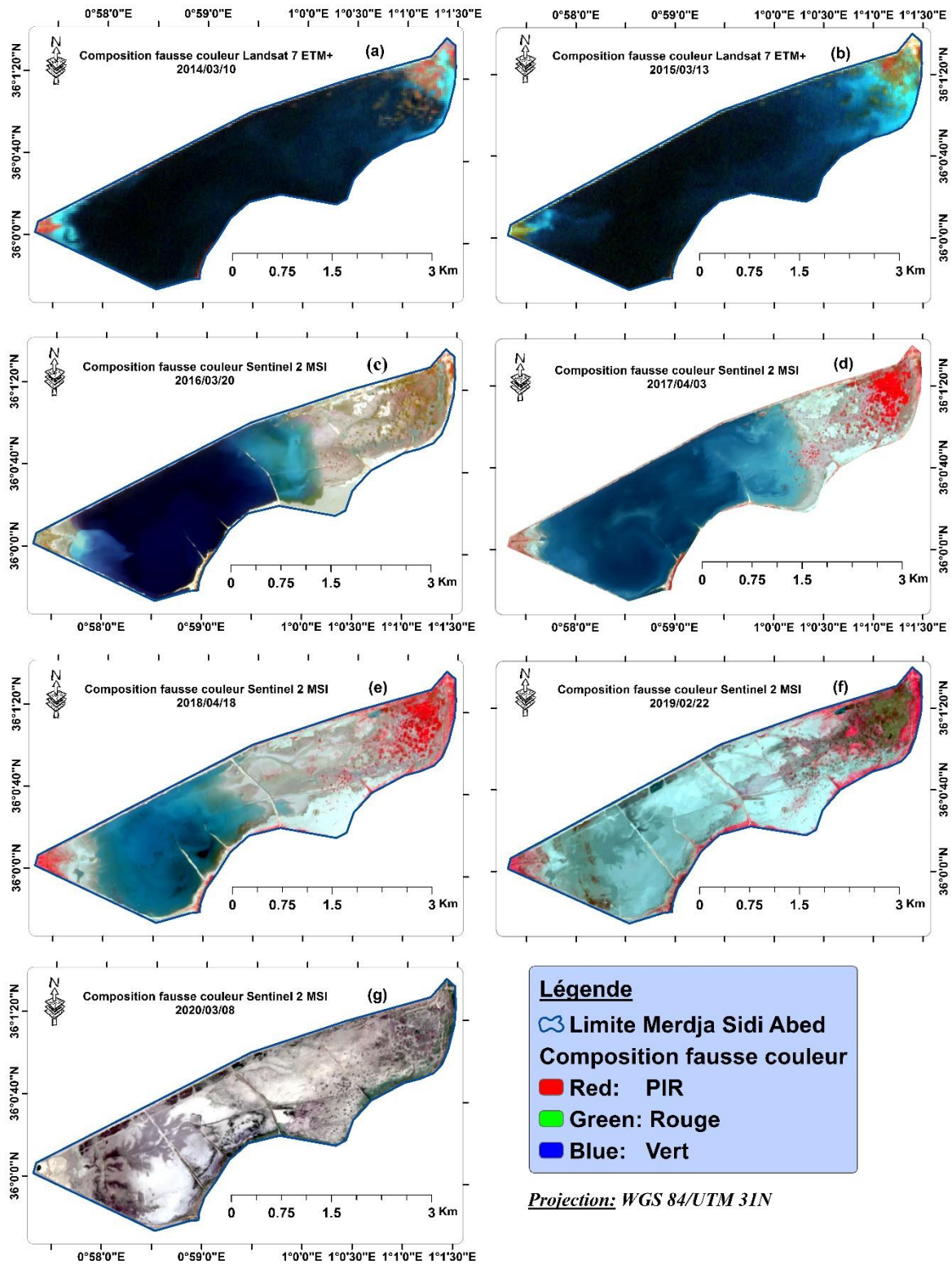


Figure 7-7: Compositions fausse couleur : (a) 2014/03/10, (b) 2015/03/13, (c) 2016/03/20, (d) 2017/04/03, (e) 2018/04/18, (f) 2019/02/22 et (g) 2020/03/08

5.2. Cartes de NDVI

Le NDVI prend ses valeurs dans l'intervalle de -1 à 1. L'eau est caractérisée par des valeurs négatives de cet indice ce qui est nettement décelables dans les images ci-dessous. Par ailleurs, le NDVI met l'accent sur la présence du couvert végétal caractérisé par des valeurs positives.

L'évolution spatio-temporelle des valeurs du NDVI du 2014 à 2020 confirme en partie la constatation signalée par l'interprétation des images couleurs. En fait, un fort contraste entre la surface d'eau et les autres objets caractérise les images de NDVI de 2014-2015. Ce contraste se diminue de 2016 à 2020 avec un recul de la surface d'eau et une progression de la végétation (Fig. 7-9).

L'analyse statistique des valeurs du NDVI de la série des images (Fig. 7-8) montre une augmentation de la valeur moyenne qui passe de -0.21 en 2014 à 0.25 en 2020. Cela est expliqué par la diminution des eaux (qui ont des valeurs négatives) et un progrès de la végétation (qui a des valeurs positives).

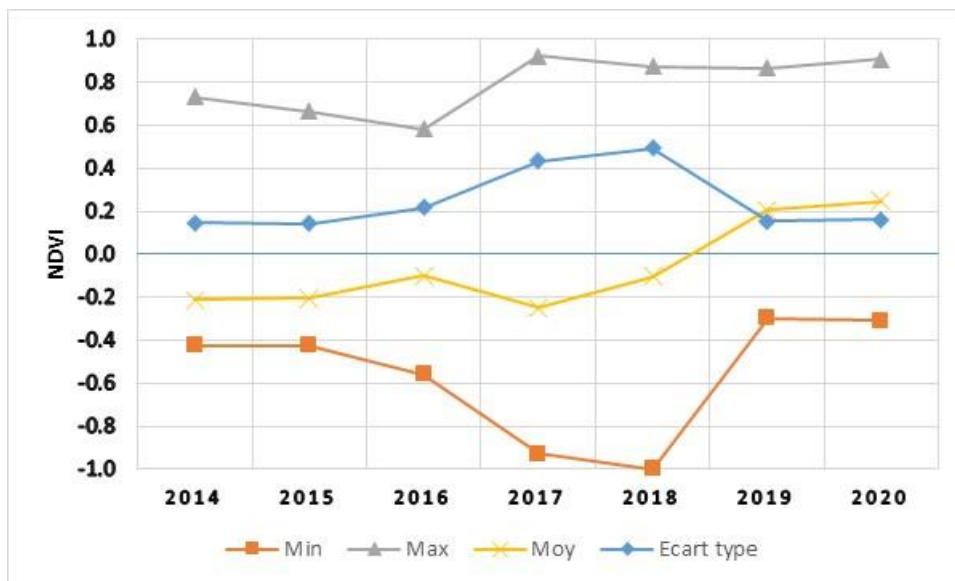


Figure 7-8: Variations statistiques du NDVI

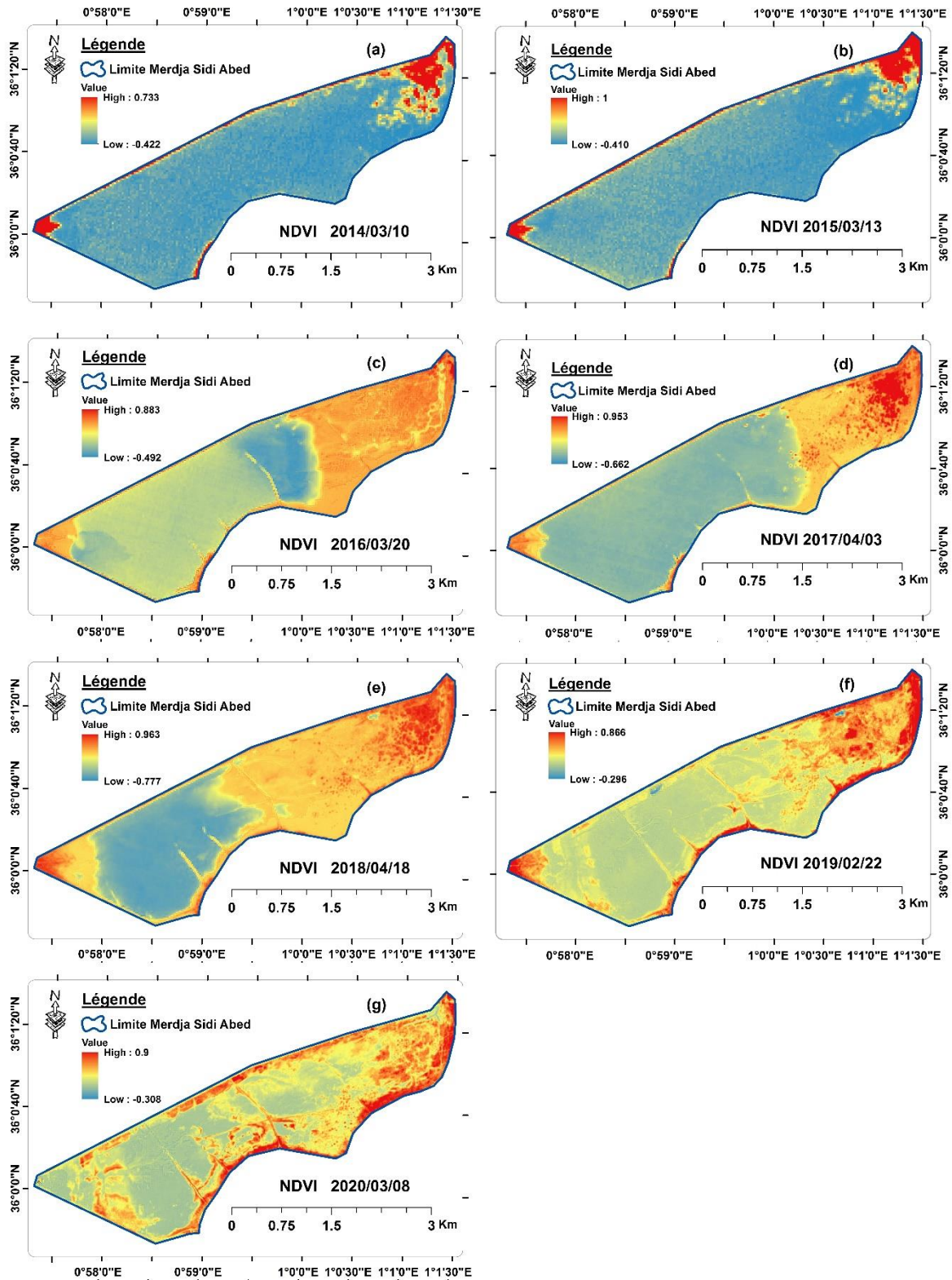


Figure 7-9: La carte de l'indice de végétation NDVI de : (a) 2014/03/10, (b) 2015/03/13, (c) 20/03/2016, (d) 2017/04/03, (e) 18/04/2018, (f) 2019/02/22 et (g) 2020/03/08

5.3. Cartes du MNDWI

D'après les cartes du MNDWI établies, l'eau est mieux décernée visuellement avec cet indice. Due à sa forte sensibilité à l'eau, les valeurs supérieures de cet indice distinguent la surface d'eau des autres classes. De même que le NDVI, les variations spatiale et temporelle du MNDWI affirment ce qu'on a constaté auparavant. En plus, il faut signaler les valeurs négatives qui caractérisent toute la retenue du barrage en 2020 ce qui peut conclure la baisse importante du niveau d'eau substituée par la vase qui a envahi une grande partie du barrage.

L'évolution des valeurs moyennes du MDNWI de 2014 à 2020 est caractérisée par une diminution très importante de 0.75 à -0.35 (Fig. 7-10). Cette diminution est expliquée par l'accentuation des sols peu humide avec la végétation au détriment de l'eau.

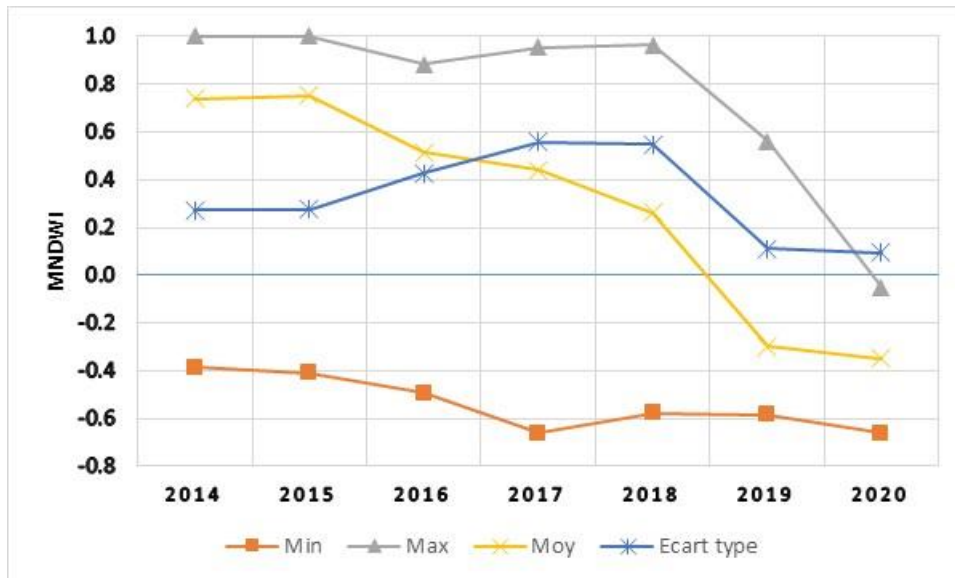


Figure 7-10: Variation des valeurs du MNDWI

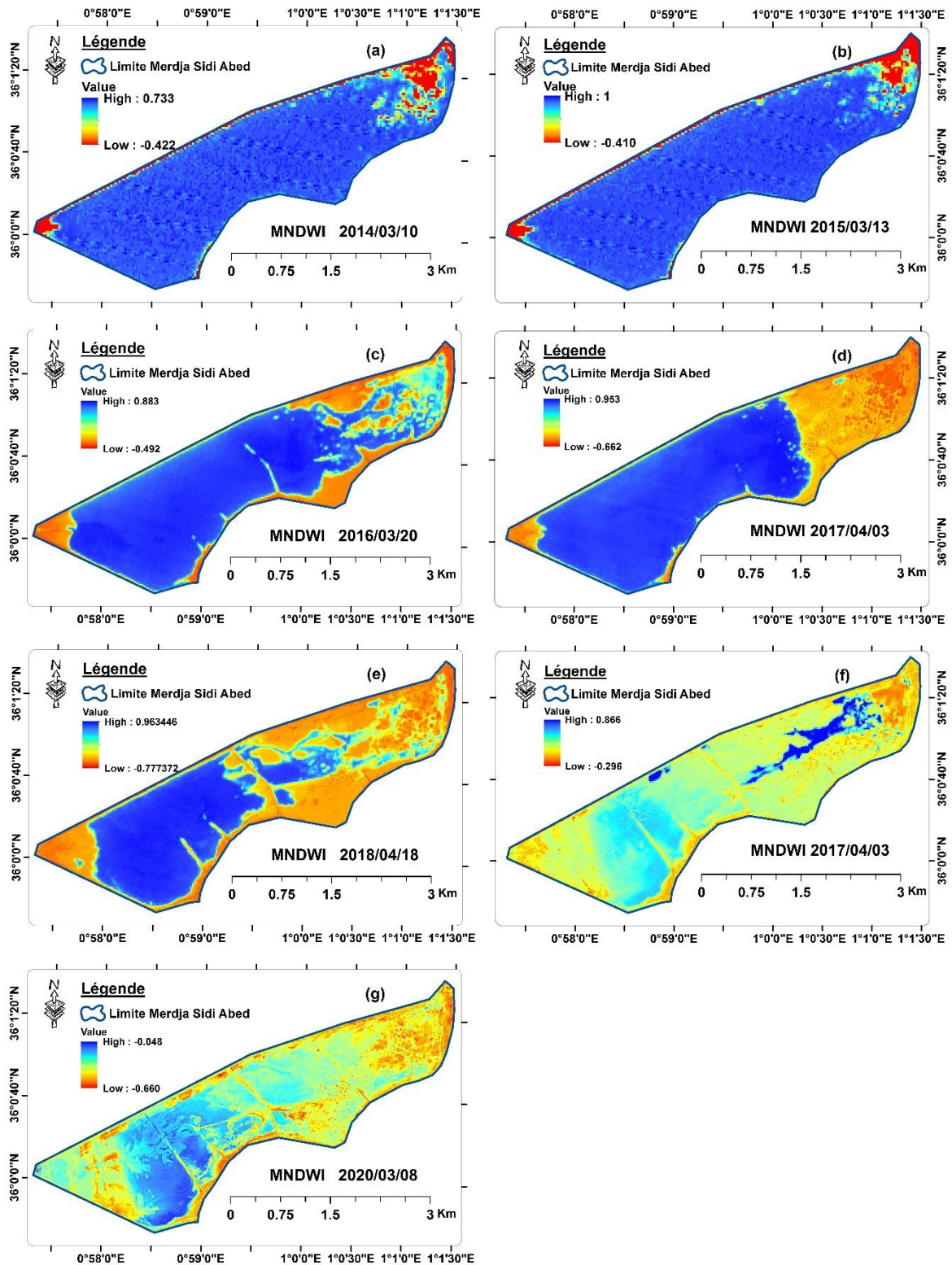


Figure 7-11: La carte de l'indice de l'eau MNDWI de : (a) 2014/03/10, (b) 2015/03/13, (c) 20/03/2016, (d) 2017/04/03, (e) 18/04/2018, (f) 2019/02/22 et (g) 2020/03/08

5.4. Cartes du BSI

L'indice du sol BSI peut renseigner indirectement sur l'état de la surface d'eau. Initialement, il est destiné pour refléter les sols nus à travers leur brillance ce qui les amène à avoir les valeurs supérieures où l'eau est caractérisée par les valeurs négatives. Les cartes ci-dessous montrent les surfaces d'eau en nuance foncé (noir) et les sols nus en clair (blanc) (Fig. 7-13).

L'évolution spatiotemporelle du BSI suit la même allure que celle de NDVI et MNDWI avec une majoration en 2019 et 2020. La valeur moyenne varie de -0.31 en 2014, où l'eau était dans son niveau maximal, à 0.1 en 2020 où la majorité de la surface du bassin est occupée par la vase emmagasinée dans la retenue du barrage. La figure ci-dessous présente les différentes variations des valeurs du BSI.

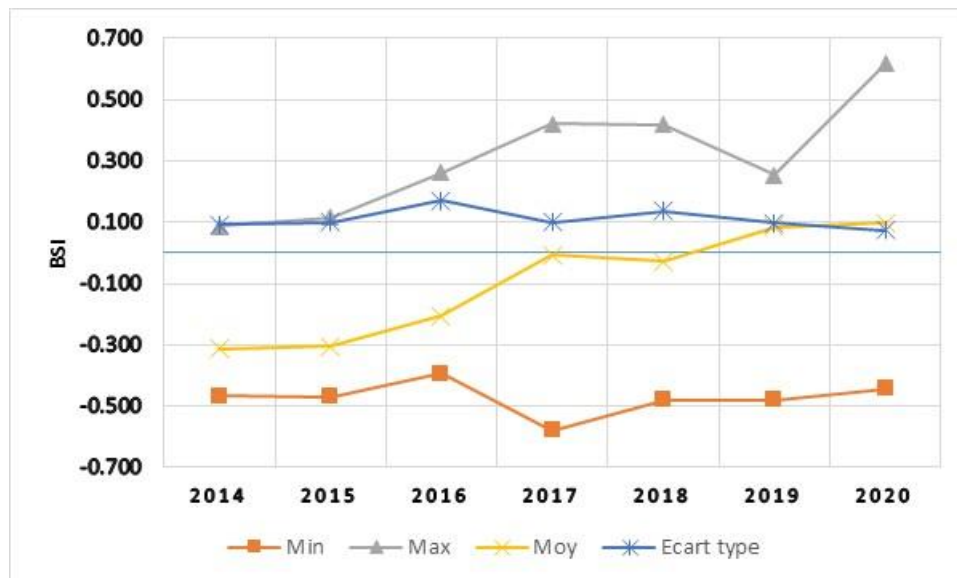


Figure 7-12: L'évolution des valeurs du BSI

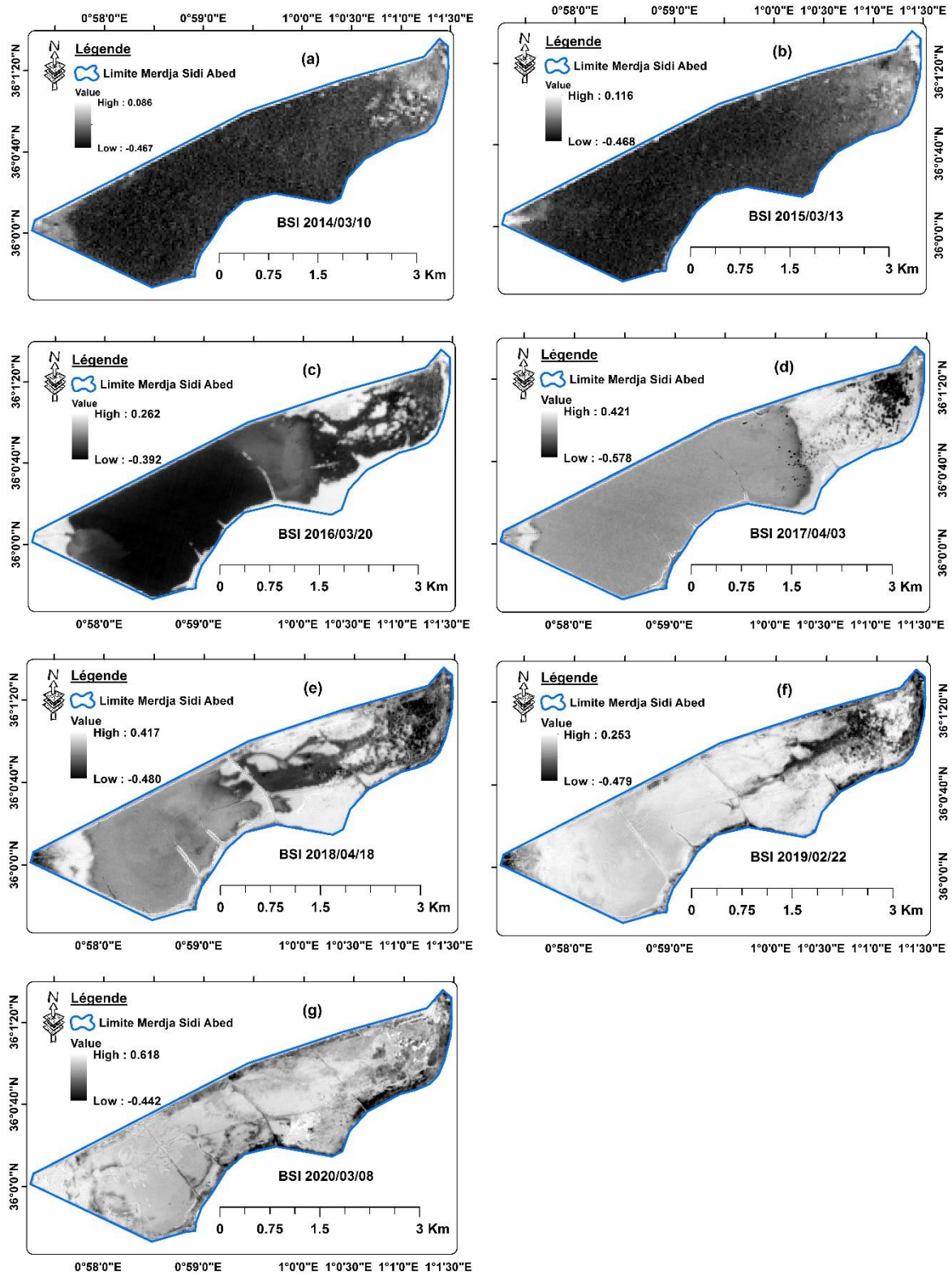


Figure 7-13: Variation de l'indice BSI : (a) 2014/03/10, (b) 2015/03/13, (c) 20/03/2016, (d) 2017/04/03, (e) 18/04/2018, (f) 2019/02/22 et (g) 2020/03/08

5.5. Extraction et suivi spatiotemporel de la surface d'eau

La numérisation des limites de rivage de la surface d'eau du barrage de Merdja Sidi Abed du 2014 à 2020 à partir de l'historique des images à très haute résolution de Google Earth nous a montrés la diminution interannuelle importante. En effet, l'étendu du barrage se voit sérieusement rétrécir d'une année à une autre où il atteint un état très dégradant en 2020 (Fig. 7-14). La superficie du plan d'eau a diminué de 814 ha en 2014 au moins de la moitié en 2018 avec 331 ha et qui a chuté en deux années à 28 ha (Tableau 7-9). Ces chiffres montrent nettement la dégradation massive qu'a connue cette infrastructure où la situation s'aggrave d'une année à une autre un peu plus.

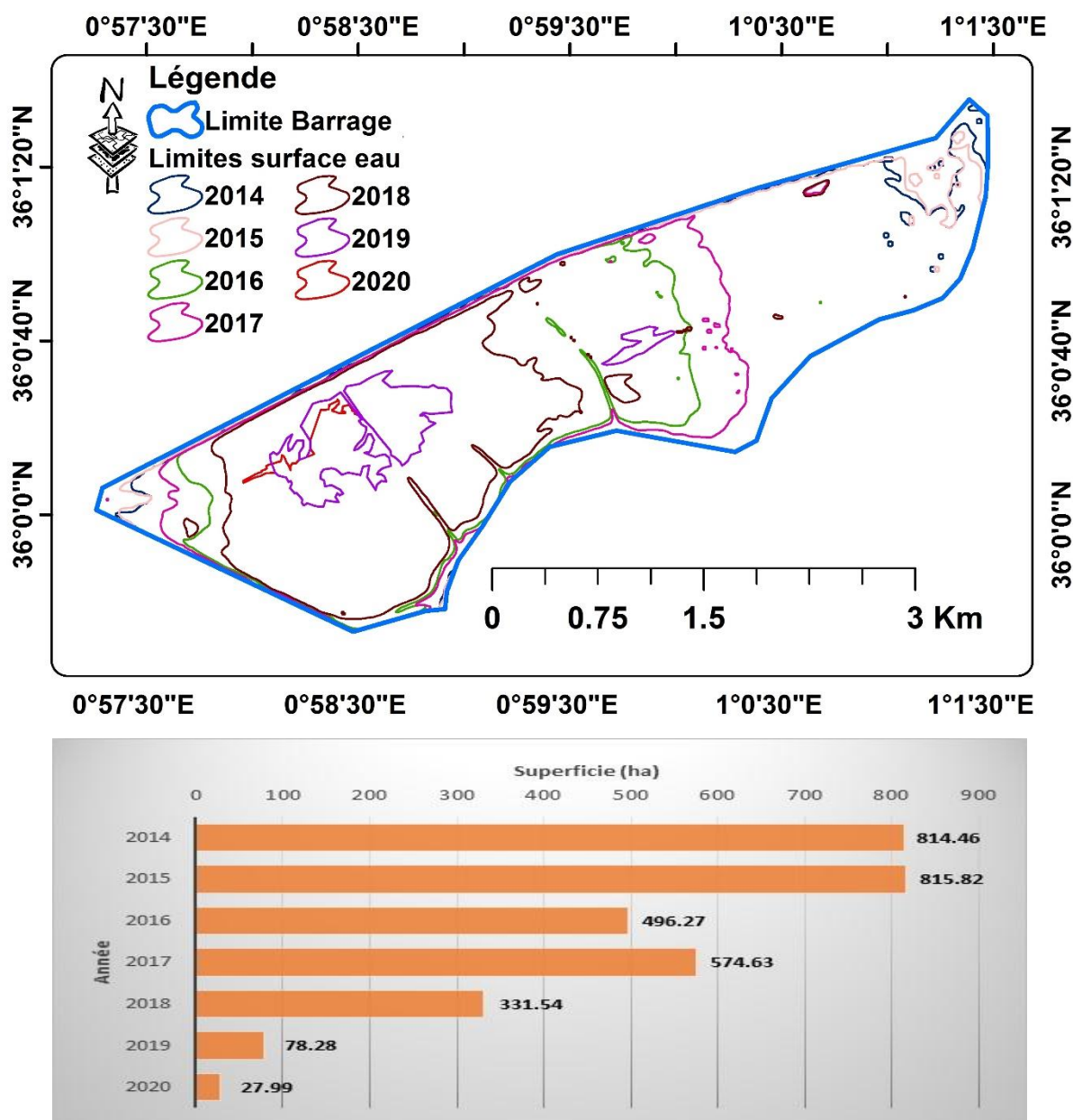


Figure 7-14: L'évolution de la superficie et des bordures du barrage de Merdja Sidi Abed de 2014 à 2020

Pour mieux étudier les variations de la surface en eau, nous avons procédé à une cartographie multi dates en se basant sur les indices spectraux ainsi dérivés des images Landsat et Sentinel. Une binarisation par un seuillage des valeurs des indices nous a permis d'extraire les surfaces d'eau est les séparées des autres objets. En effet, deux classes sont produites dont la surface est calculée : la classe eau codée par 1 (blanc) et la classe non-eau codé par 0 (noir).

L'étude de l'histogramme bimodal de l'image de chaque indice par l'algorithme d'Otsu permet de déterminer la valeur optimale du seuil utilisée pour la binarisation. Les résultats obtenus des seuillages des différentes images sont présentés dans la figure 7-15. L'observation tirée de l'analyse des images binaires montre un potentiel plus au moins important des trois indices à distinguer les surfaces d'eau.

En fait, comme on l'a déjà constaté, ces images binaires confirment la tendance à baisse de la retenue en étude. Pour 2014 et 2015, où le bassin était en plein état, les trois indices semblent être efficaces à extraire le plan d'eau. Au fur et à mesure de l'apparition des éléments perturbateurs principalement l'augmentation de la vase et l'occurrence de la végétation, l'extraction furent influencer d'où une surestimation de la surface d'eau comme pour le cas de 2016, 2018 et 2020 comme le montre le tableau ci-dessous. L'influence de ces deux facteurs est expliquée par le fait que la retenue du barrage devient inhomogène avec une éparpillations de la végétation aquatique et l'augmentation du taux de sédimentation qui conduit à une forte turbidité de l'eau.

L'eau est caractérisée par des valeurs positives pour le MDNWI et des valeurs négatives pour le NDVI et BSI. A partir de 2018, l'élévation du niveau de la vase a permis d'emmagasiner l'eau sous forme d'étangs bien décelés par le MNDWI. Plus la vase se sèche, plus elle est sensiblement détectée par le BSI comme sol nu ce qui est constaté en 2020 par cet indice.

Tableau 7-9: Evolution de la surface d'eau estimée et de référence 2014-2020

Année	Surface d'eau estimée (ha)			Surface de référence (ha)
	NDVI	MNDWI	BSI	
2014	768.34	772.79	725.16	814.46
2015	867.08	781.26	701.86	815.82
2016	508.58	641.44	666.79	496.27
2017	553.69	567.31	650.41	574.63
2018	309.31	410.89	567.29	331.54
2019	109.94	75.31	239.07	78.28
2020	95.57	65.17	188.18	27.99

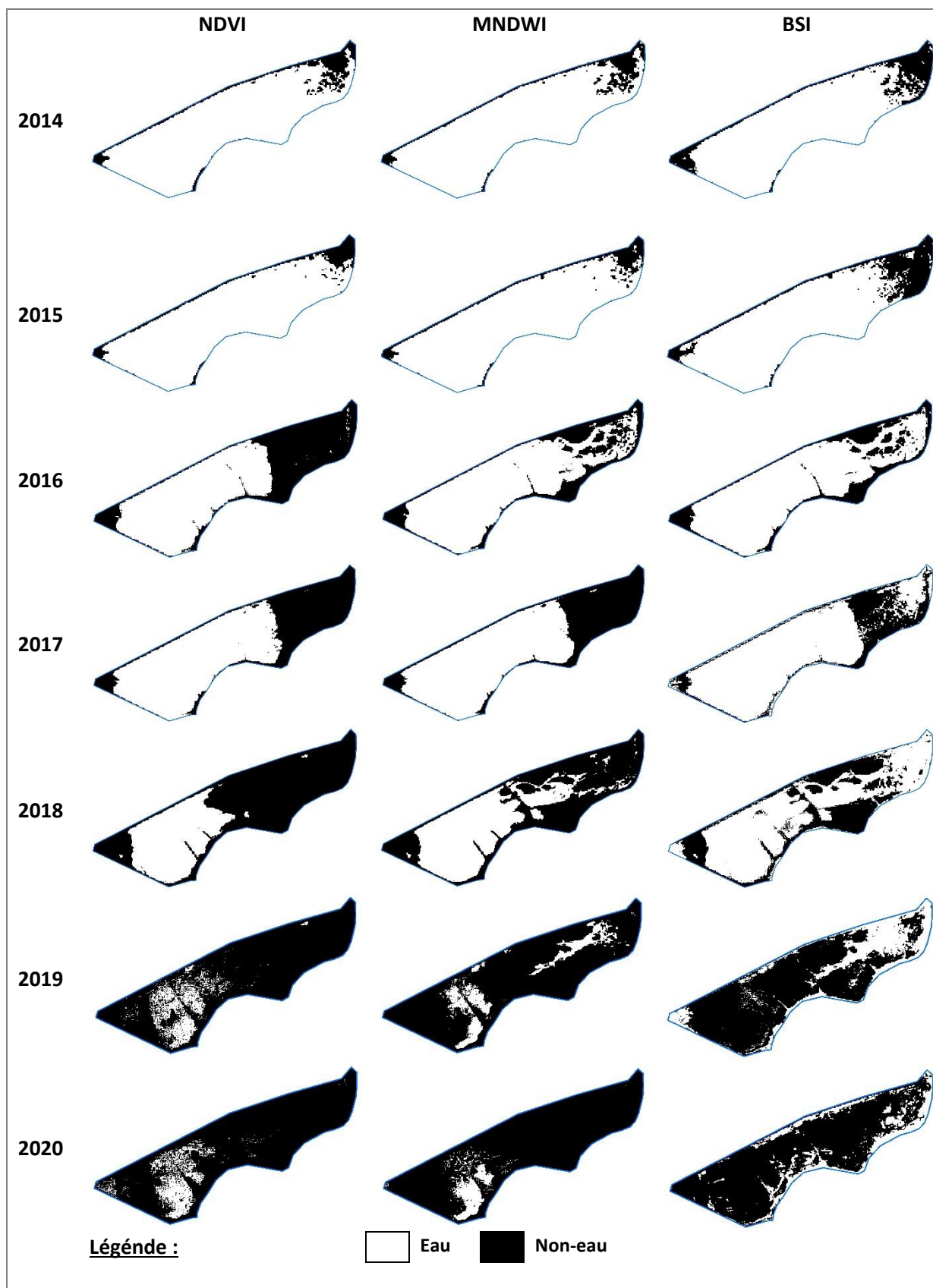


Figure 7-15: l'extraction des surfaces d'eau par seuillage des indices NDVI, MNDWI et BSI

5.6. Evaluation des résultats

L'évaluation rigoureuse de la précision d'une classification est envisageable. Dans cette étude, la qualité de la classification est évaluée à l'aide de la précision totale qui est la mesure la plus utilisée et la plus simple à mettre en œuvre. Le paramètre OA calculé par l'équation 7.6 exprime la précision globale de la classification binaire. Les deux autres paramètres PA et UA expriment respectivement le degré de précision de point de vue réalisateur de la carte et l'utilisateur ou le lecteur de la carte.

A partir du croisement des limites de la surface d'eau de références et celles obtenues de la présente méthode, les différentes surfaces des zones bien et mal classées ont été aisément déterminées. Le calcul des valeurs des trois paramètres de précision de chaque indice pour toutes les années (2014-2020) est dressé dans le tableau 7-10.

Ces calculs de précision montrent que les trois indices donnent de bons résultats avec les données de 2014 à e avec une précision moyenne de 92.63%, 92.76% et 85.19% pour le NDVI, MNDWI et BSI respectivement. Le moment où le barrage a connu une régression dans son volume en eau, la précision a été diminuée en particulier pour l'indice BSI à partir de 2018 où on enregistre une précision moyenne de 69.6%.

La moyenne de précision globale des sept années d'étude montre que l'indice MNDWI est reconnue très satisfaisant pour l'extraction de la surface d'eau avec une moyenne de 92.50%, suivi par le NDVI avec 91.27% en moyenne. Le BSI, avec une précision globale moyenne de l'ordre de 78.51%, exprime un pouvoir moins discriminant de l'eau que les deux autres indices.

Néanmoins, nous devons signaler l'effet de l'homogénéité de la surface d'eau pour la bonne extraction de celle-ci. En outre, la bonne discrimination de l'eau peut être significativement affectée par la turbidité, la profondeur et la présence ou non de la végétation émergée et/ou submergée.

Tableau 7-10 : Evaluation de la précision de l'extraction de la surface d'eau des trois indices NDVI, MNDWI et BSI

Année	NDVI			MNDWI			BSI			
	PA	UA	OA	PA	UA	OA	PA	UA	OA	
2014	94.16%	99.82%	94.35%	94.66%	99.76%	94.77%	88.82%	99.76%	89.29%	
2015	95.90%	90.23%	86.37%	95.64%	99.87%	95.77%	85.69%	99.60%	86.21%	
2016	98.13%	95.76%	96.44%	98.80%	76.44%	81.88%	98.49%	73.30%	78.59%	
2017	96.21%	99.85%	93.40%	98.34%	99.61%	98.64%	96.55%	85.30%	86.67%	
2018	93.17%	99.87%	95.34%	97.77%	78.89%	92.14%	94.23%	55.07%	68.38%	
2019	40.36%	28.74%	85.57%	37.30%	38.77%	89.01%	30.07%	23.30%	65.20%	
2020	25.76%	7.55%	87.41%	93.63%	40.22%	95.30%	22.75%	20.41%	75.23%	
Moy			91.27%				92.50%			

6. Conclusion

En télédétection, le choix approprié de données est un facteur clés pour l'étude de changement de la surface de la terre. Les plans d'eau par sa grande variabilité spatiotemporelle requièrent des indicateurs pertinents pour l'étude de leur dynamique. Diverses sources de données spatiales ont pris leurs places ces deux dernières décennies. Ces dernières années, le nouveau service de GEE fourni par Google, a mis en place une plateforme qui met à la disposition des utilisateurs un volume gigantesque de données géospatiales. Ce service a ouvert une autre opportunité en termes de stockage et d'analyse de données en ligne à faible cout (volume important, temps de calcul court, méthodes riches...).

Cette étude a examiné l'usage de la plateforme de GEE à choisir et utiliser des images satellitaires haute résolution à l'étude de la dynamique spatiotemporelle du barrage de Merdja Sidi Abed. Une série de deux jeux de données sont mises en œuvre pour ce travail à savoir Landsat 7 (2014-2015) et Sentinel 2 (2016-2020) pour extraire des néo-images correspondant aux indices spectraux. Notre choix s'est mené sur trois indices caractérisant trois thèmes différents : l'indice de végétation NDVI, l'indice de l'eau MNDWI et l'indice du sol BSI. Une binarisation des images de ces indices en se basant sur un seuillage par la méthode d'Otsu a été opérée.

Les résultats obtenus montrent la dégradation très rapide de la retenue de Merdja Sidi Abed qui connaît un recule très important de sa réserve en eau. De 2014 à 2018, le barrage a perdu plus de la moitié de son volume et qui a gravement baissé à un niveau difficilement réversible. En plus, nous constatons à travers ces résultats qu'il est possible, à l'aide des indices spectraux d'extraire d'une manière satisfaisante les surface d'eau. L'application d'un seuillage bimodal sur les indices spectraux peut apporter une estimation des superficies en

eau avec une précision plus au moins acceptable. L'indice MNDWI a montré son efficacité pour décerner l'eau avec une précision globale moyenne de l'ordre de 92.50%.

Nous notons d'après cette étude que le recourt aux données de télédétection peut également être un bon outil dans le suivi des zones humides dans le but d'une gestion rationnelle de ces ressources.

Conclusion Générale

Aujourd'hui, la biodiversité est devenue une préoccupation vitale pour le futur de l'humanité. En effet, ce n'est que par le respect des équilibres naturels, socio-économiques et des capacités de production qu'on pourra ralentir le processus de dégradation de la biodiversité et ses ressources naturelles

Toute action pouvant aider à protéger les écosystèmes et des milieux fragiles ou exceptionnels ainsi qu'aux habitats d'espèces menacées, sur le plan écologique et socioéconomique, doivent être envisagé.

L'évolution des outils de positionnement spatiales, de traitements et la disponibilité de diverses données à caractère spatial ont ouvert les portes aux techniciens, chercheurs et gestionnaires de la biodiversité pour mieux agir contre les phénomènes tant naturels que humaines qui provoquent cette dégradation.

L'intégration des données de la télédétection et les systèmes d'information géographique dans le processus de l'étude et la connaissance des ressources naturelles a prouvé son efficacité et deviennent des solutions incontournables pour le suivi et la préservation de la biodiversité sur un étendu important comme celui de l'Algérie en général et l'Ouest en particulier.

C'est dans ce contexte que ce travail s'est inscrit dans le but d'intégrer les outils de géomatique (Système d'Information Géographiques et Télédétection) afin de diagnostiquer et étudier les différentes ressources naturelles de la région occidentale de l'Algérie. L'analyse des différents facteurs manifestant à la dégradation de ces ressources a été ainsi introduite.

D'après les études réalisées sur trois sites pilotes choisis à l'ouest algérien, qui ont mis l'accent sur des facteurs jugés dévastateur pour la biodiversité (Erosion hydrique, Incendies de forêts et l'Assèchement des plans d'eaux) et les résultats obtenus, on constate qu'il y a une dégradation massive et continue de l'être des ressources qu'elles caractérisent cette région.

En premier lieu, une évaluation du risque érosif et une cartographie des zones potentiellement productrices de sédiments a été effectuée sur le bassin versant du barrage de Bouhanifia. On a adopté le modèle d'estimation des pertes en sol RUSLE intégré aux outils de la géomatique à savoir les SIG et la télédétection. Une spatialisation des différents facteurs du modèle RUSLE nous a permis de quantifier le taux de pertes annuel à l'échelle d'un pixel. Les résultats obtenus montrent que ce bassin est soumis à une fort potentiel érosif avec une moyenne annuelle de l'ordre de 4.7 ton.ha-1.an-1 et perte totale de 2.47 x 106 ton.an-1. Les mesures bathymétriques effectuées par l'ANBT attestent ce

constat avec un taux d'envasement, due essentiellement à la sédimentation, qui dépasse 40%.

En second lieu, une évaluation du risque des incendies a été effectuée pour la forêt de Gharrous situé au sud-est de la wilaya de Mascara et qui a montré le degré de vulnérabilité de cet espace. Le travail a été mené en spatialisant les différents facteurs impliqués dans la modélisation du risque du feu à l'aide d'un SIG. En effet, 43% de la surface forestière est caractérisée par un risque élevé à très élevé. Ces résultats ont été sont en forte corrélation avec les limites des incendies enregistrées dans cette forêt.

Et comme troisième étude, une cartographie multi-dates de l'évolution du barrage de Merdja Sidi Abed à la wilaya de Relizane a été faite en utilisant les données géospaciales fournies par la plateforme de Google Earth Engine. Ces données ont été exploitées pour dériver trois indices spectraux à savoir le NDVI, le MNDWI et le BSI qui sont utilisés pour extraire la surface en eau du barrage pour la période 2014-2020. Les résultats obtenus exposent la tendance rapide de l'assèchement et le recul du niveau d'eau du dit barrage Merdja Sidi Abed qui a diminué de 814 ha en 2014 à 28 ha en 2020. Une régression alarmante de cet ouvrage qui nécessite une intervention en urgence.

Globalement, la combinaison entre plusieurs sources de données d'une part, et l'étude des différents phénomènes et leur modélisation ont contribué efficacement pour l'établissement des cartes de synthèse des différents risques de dégradation causés par ces phénomènes à savoir l'érosion, les incendies de forêts et le recul du niveau des plans d'eau. Ces cartes peuvent être une solution très utile pour les décideurs et les gestionnaires pour une éventuelle planification d'aménagement.

En effet, le recourt aux outils de la géomatique notamment les SIG et la télédétection dans le cadre de la gestion et le suivi spatiotemporel des ressources naturelles est complètement justifiée grâce à la masse importante de données diverses qui se répartissent sur des surfaces étendues ou l'accès est souvent difficile et les potentialités de ces outils à analyser et croiser une variété de données avec un volume considérable.

L'utilisation des SIG et la Télédétection dans cette discipline représente une approche plus efficace, plus pertinente que les méthodes classiques ou les approches classiques d'évaluation ne tiennent pas compte de l'aspect spatiale de l'information.

En termes de perspectives, la gestion des ressources naturelles ainsi que l'étude de divers phénomènes affectant ces ressources peuvent être significativement amélioré par le développement de système d'information précoce permettant la surveillance quasi-permanente des espaces naturels. Cela peut être réalisable en intégrant la technologie

de la cartographie en ligne ou le webmapping qui a pris sa place dans le monde de la géomatique. Les SIG web peuvent être une solution très pratique pour les gestionnaires pour la prise de décision dans la mesure où ils peuvent diffuser l'information à tous les acteurs et impliquer plusieurs organismes en même temps.

L'évolution considérable des données de télédétection spatiale en termes de résolution spatiale (de l'ordre métrique) et répétitivité (de l'ordre de quelques jours) peut aussi contribuer efficacement à l'étude diachronique permanente de l'évolution des phénomènes naturels tels que la salinité, l'évapotranspiration, les incendies, l'artificialisation des sols ... etc.

Références Bibliographiques

- Abderrahmani B. (2015) Les risques climatiques et leurs impacts sur l'environnement, Thèse de Doctorat en Sciences, Université des sciences et de la technologie d'ORAN Mohamed Boudiaf, 184 pp
- Achite M. & Meddi M. (2005). Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'oued Mina (nord-ouest algérien). *Rev. Sci. Eau*, 18(special), 37-56
- Achite, M. & Ouillon, S. (2007). Suspended sediment transport in semiarid watershed, Wadi abd, Algeria (1973-1995). *J. Hydrol.*, 343, 187-202
- Achite, M., Touaibia, B., & Ouillon, S. (2006). Érosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences et Perspectives in 14th International Soil Conservation Organization Conference. *Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments*, Marrakech, Morocco.
- Adab, H., Kanniah, K.D, Solaimani, K (2012). Modelling forest fire risk in the Northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Nat Hazards*, 65: 1723–1743. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8>
- Alexandrian, D. & Rigolot, E. (1992) Sensibilité du pin d'Alep l'incendie. *Forêt Méditerranéenne* t. XIII, n° 3, pp 185-198
- Almagro, A. , Thomé, T.C., Colman, C.B., Pereira, R.B., Marcato Junior, J., Rodrigues, D.B.B., et al. (2019). Improving cover and management factor (C-factor) estimation using remote sensing approaches fortropical regions, *International Soil and Water Conservation Research*. 7(4), 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.08.005>
- Alonso A., Muñoz-Carpena R., Kennedy R. E., Murcia C. (2016) wetland landscape spatio-temporal degradation dynamics using the new google earth engine cloud-based platform: opportunities for non-specialists in remote sensing *Transactions of the ASABE*. 59(5): 1331-1342. <https://doi.org/10.13031/trans.59.11608>
- Arellano-Pérez, S., Castedo-Dorado, F., López-Sánchez, C.A., González-Ferreiro, E., Yang, Z., Díaz-Varela, R.A., Álvarez-González, J.G., Vega, J.A., Ruiz-González, A.D. (2018). Potential of Sentinel-2A Data to Model Surface and Canopy Fuel Characteristics in Relation to Crown Fire Hazard. *Remote Sens*, 10(10), 1645. <https://doi.org/10.3390/rs10101645>
- Arfa, A.M.T., Benderradji, M.E.H., Alatou, D. (2009). Analyse des bilans des incendies de forêt et leur impact économique en Algérie entre 1985-2006. *New Medit*, 8(1), 46-51.
- Arnold, J.G. , Srinivasan, R., Muttiah, R.S., & Williams, J.R., (1998). Large area hydrologic modelling and assessment, part 1: model development *JAWRA*, 34 (1) , pp. 73-90
- Arroyo, L.A., Pascual, C., Manzanera, J.A. (2008). Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. *Forest Ecol. Manag.*, 256 (2008), 1239-1252. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.048>
- Ashiagbor, G., Forkuo, E. K., Laari, P., & Aabeyi, R. (2013). Modeling Soil Erosion Using Rusle and GIS Tools. *Int J Remote Sens Geosci*, 2(4), 7-17.
- Assali, F., Alaoui, H. M., Rouchdi, M., Badraoui, M. (2016). Modélisation et cartographie du risque d'éclosion d'incendie de forêt dans le nord-ouest du Maroc (région de Chefchaouen-Ouazzane). *Revue d'écologie*. 71(2), 111-128
- Beasley, DB, Huggins, L.F., & Monke, E.J. (1980) ANSWERS: a model for watershed planning. *Trans ASAE* 23:0938–0944. <https://doi.org/10.13031/2013.34692>
- Belgherbi, B., Benabdeli, K., & Mostefai, K. (2018). Mapping the risk forest fires in Algeria: Application of the forest of Guetarnia in Western Algeria. *Ekologie*, 37(3), 289-300. <https://doi.org/10.2478/eko-2018-0022>

- Belhadj-Aissa, M., Belhadj-Aissa, A., & Smara, Y. (2003). Application du SIG et de la Télédétection dans la Gestion des feux de Forêts en Algérie. 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco, 2-5 December 2003, p. 16.
- Ben Rhouma, A., Hermassi, T., & Habaieb, H. (2018). Water Erosion modeling in a Mediterranean semi-arid catchment using USLE/GIS (El Gouazine, Central Tunisia). *Journal of new sciences, Agriculture and Biotechnology*, 50(7), 3071-3081.
- Benabadji, N. & Bouazza, M. (2000). Quelques Modifications Climatiques Intervenues dans le Sud-Ouest de l'Oranie (Algérie Occidentale). *Rev. Energ. Ren.*, 3,117-125.
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>.
- Benchettouh, A. (2019) L'érosion hydrique dans les régions marneuses du tell oranais cas des bassins versants de la mina (relizane) et kramis (mostaganem). Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Mostaganem, 224 pp.
- Benchettouh, A., Kouri, L., & Jebari, S. (2017). Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE/GIS techniques and practices conservation suggested for reducing soil erosion in Wadi Mina watershed (northwest, Algeria). *Arab J Geosci*, 10:79. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2875-6>.
- Benguerai, A., Benabdeli, K., Harizia, A. (2019). Forest Fire Risk Assessment Model Using Remote Sensing and GIS Techniques in Northwest Algeria. *Acta Silvatica et Lignaria*, 15(1), 9-21. <https://doi.org/10.2478/aslh-2019-0001>.
- Benkaci, S., Abir, D., Oumellal, A., & Remini, B. (2018). Modeling the erosion of the upper and middle Cheliff basin by the Model builder application on ArcGis. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 5(1), 81-93.
- Bensaïd, A. (2006) SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la wilaya de naâma (Algérie). *Géographie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, Français*. tel-00169433. 319 pp
- Benselama, O., Mazour, M., & Hasbaia, M. (2018) Prediction of water erosion sensitive areas in Mediterranean watershed, a case study of Wadi El Maleh in north-west of Algeria. *Environ Monit Assess* 190:735. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7117-1>
- Benstaali, I. & Benayada, L. (2017). Bilan et variabilité temporelle des matières en suspension dans le bassin de la Macta : cas du sous bassin versant de Bou-Hanifia (Algérie du nord). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 30(3), 199–211. <https://doi.org/10.7202/1044247ar>
- Blanco-Canqui, H. & Lal, R. (2008) Soil and Water Conservation, in *Principles of Soil Conservation and Management SE – 1*, Springer Netherlands, Dordrecht, 1–19.
- Bosco, C., De Rigo, D., Dewitte, O., Poesen, J. & Panagos, P. (2015). Modelling soil erosion at European scale: towards harmonization and reproducibility, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 225–245. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-225-2015>.
- Boualem, A., Larid, M., & Mederbal, K. (2009). Silting of the Bouhanifia Dam, Algeria. *Journal of Environmental Hydrology*, 17,1-14. <http://www.hydroweb.com/protect/pubs/jeh/jeh2009/boualem.pdf>. Consulté le 01/07/2019.
- Bouanani, A. (2004) ,Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la tafna (NW – Algérie), Thèse de doctorat d'état, Université de Tlemcen, 250pp.

- Bouderbala, D., Souidi, Z., Donze, F., Chikhaoui, M. & Nehal, L. (2018). Mapping and monitoring soil erosion in a watershed in western Algeria. *Arab J Geosci*, 11:744. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4092-3>
- Boulaine, J., (1957). Etude des sols des plaines du Cheliff. Thèse d'état , Université d'Alger, 582 pp.
- Brabant, P. (2008). Activités humaines et dégradation des terres Indicateurs et indices. IRD. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-05/010045188.pdf. Consulté le 01/08/2020.
- Buma W. G., Lee S. I., Seo J. Y. (2018) Recent Surface Water Extent of Lake Chad from Multispectral Sensors and GRACE. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 18(7). <https://doi.org/10.3390/s18072082>.
- Carbonneau, P. and Piégay, H. (2012) *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA,
- Chadli, K. (2016). Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco). *Model Earth Syst Environ*. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0105-y>.
- Chafai, A., Brahim, N. & Shimi, N.S. 2020) Mapping of water erosion by GIS/RUSLE approach: watershed Ayda river—Tunisia study. *Arab J Geosci*, 13, 810. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05774-0>
- Chiali Charif, K. (2018). Contribution a une étude des incendies de forêts dans le massif de Telagh- Algérie occidentales. Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel abbes, Algérie, 126 p.
- Dagorne, A., Duche, Y., Castex, J., Ottavi, J., Dallier, C., Coster, A. (1994). Protection des forêts Contre les Incendies & Système d'Information Géographique. Application à la Commune d'Auribeau sur Siagne (Alpes Maritimes). *Forêt Méditerranéenne*. XV, n 4, 416-419.
- Dahmani A. (2010), Impact des changements climatique sur les ressources en eau dans le bassin versant de Oued Fekan wilaya de Mascara. Thèse de doctorat, Université d'USTO Mohamed Boudiaf, Algérie, p 126.
- Dahmani, B., Hadji F. & Allal, F. (2003), Traitement des eaux du bassin hydrographique de la Tafna (N-W Algeria), *Desalination*, 152(1), pp 113-124. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01054-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01054-8).
- Demmak, A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie Septentrionale. Thèse de doctorat, Université de Paris 6, France, p 323.
- Devatha, C.P., Deshpande, V., & Renukprasad, M.S. (2015). Estimation of Soil loss Using USLE Model for Kulhan Watershed, Chattisgarh- A Case Study, *Aquatic Procedia* 4 (2015) 1429 – 1436. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.185>
- DGF (2018). Direction Générale des Forêts : Les Feux de Forêts en Algérie, Analyse et Perspectives.
- DGF (2019), Direction Générale des Forêts, Plan national sécheresse Algérie : Lignes directrices en vue de son opérationnalisation.
- Djoukbala, O., Hasbaia, M., & Benselama, O. (2019). Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria) *Model. Earth Syst. Environ*. 5:725. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0562-6>
- Djoukbala, O., Mazour, M., Hasbaia, M., & Benselama, O. (2018). Estimating of water erosion in semiarid regions using RUSLE equation under GIS environment. *Environ Earth Sci*, 77:345. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7532-1>
- Dong, X., Li-min, D., Guo-fan, S. et al. (2005). Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, China. *Journal of Forestry Research* 16, 169–174. <https://doi.org/10.1007/BF02856809>

- Douaoui, A., & Lépinard, P. (2010). SIG Cartographie de la salinité des sols de la plaine algérienne du Bas-Chéllif. *Géomatique Expert* 76
- El-Mahi, A., Meddi, M., & Bravard, J. P. (2012). Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord). *Hydrological Sciences Journal*, 57(8), 1642–1661. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.717700>
- El Hafid, D., & Akdim, B. (2018) Quantification De L'érosion Hydrique En Utilisant Le Modèle Rusle Et Déposition Intégrée Dans Un Sig. Cas Du Bassin Versant De L'oued Isly (Maroc Oriental). *European Scientific Journal*, 14 (5), pp.1857-7881. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n5p373>.
- El Jazouli, A., Barakat, A., Ghafiri, A., El Moutaki, S., Ettaqy, A. & Khellouk, R. (2017). Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco). *Geosci. Lett.*, 4:25. <https://doi.org/10.1186/s40562-017-0091-6>
- Elmeddahi, Y. (2016), Les changements climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau, cas du bassin du Cheliff, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Chlef, 245pp
- Erencia Z. (2000). C-factor mapping using remote sensing and GIS - A case study of LOM Sak/ Lom Kao, Thailand. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Holland.
- ESA (2015) Sentinel-2 User Handbook, ESA Standard Document. 64 pp
- Fang, G., Yuan, T., Zhang, Y., Wen, X., & Lin, R. (2019). Integrated study on soil erosion using RUSLE and GIS in Yangtze River Basin of Jiangsu Province (China). *Arab J Geosci*, 12:173. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4331-2>
- FAO & ITPS (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR)–Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- FAO (1989). The state of food and agriculture, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO (2005) L'irrigation en Afrique en chiffres – Enquête AQUASTAT 2005.
- FAO (2015) AQUASTAT Profil de Pays – Algérie. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie
- FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC (2012). Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Fauck, R. (1956). Érosion et mécanisation agricole en Casamance (Sénégal). Bureau des sols en Afrique occidentale, 24 p.
- Fecih, A., Habi, M., & Morsli, B. (2018) Développement de l'irrigation économisatrices dans le nord-ouest de l'Algérie : Cas de la wilaya de Tlemcen. *Larhyss Journal*, 35, pp. 59-71.
- Filipponi, F. (2019). Exploitation of Sentinel-2 Time Series to Map Burned Areas at the National Level: A Case Study on the 2017 Italy Wildfires. *Remote Sens*, 11(6), 622. <https://doi.org/10.3390/rs11060622>
- Foster, G.R., McCool, D.K., Renard, K.G., & Moldenhauer, W.C. (1981). Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *J Soil Water Conserv*, 36(6): 355-359.
- Foster, G.R., & Lane, L.J. (1987). User Requirements: USDA Water Erosion Prediction Project (WEPP). NSERL Report No.1 Western Lafayette, Ind.:USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Fournier, F. (1967). La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. *Sols Africains*, 12(1), 5-51.

- Gassert, F., M. Landis, M. Luck, P. Reig, & T. Shiao. (2014). Aqueduct Global Maps 2.1. Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute. Available online at <http://www.wri.org/publication/aqueduct-metadata-global>
- Gaubi, I., Chaabani, A., Ben Mammou, A., & Hamza, M. H. (2017). A GIS-based soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Lebna watershed, Cap Bon, Tunisia). *Nat Hazards*, 86:219. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2684-3>
- Gausson, H., & Bagnouls, F. (1953). Saison sèche et indice xéothermique. Université de Toulouse, Faculté des Sciences, Toulouse, France
- Ghenim A. (2008). Étude des écoulements et des transports solides dans les régions semi-arides méditerranéennes. Thèse de doctorat : Université de Tlemcen, Algérie.
- Ghenim, A. N. & Megnounif, A. (2011). caractérisation de la sécheresse par les indices SPI et SSFI (nord-ouest de l'Algérie), *Revue scientifique et Technique* 18, pp59-77
- Ghenim, A. N., Megnounif, A., Seddini, A. & Terfous, A. (2010). Fluctuations hydropluviométriques du bassin versant de l'Oued Tafna à Béni Bahdel (Nord Ouest Algérien), *Sécheresse* 21(2), 115-120.
- Gherina, S.A., Douaoui, A., Hartani, T. & Vincent, B. (2008). Application de la télédétection dans la connaissance de la salinité des sols de la plaine du Bas-Chélif. *Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb, Mostaganem, Algérie*. 8 p
- Ghzel, H. (2018). Synthèse monographique sur l'état de l'environnement en Algérie/ OSS . Tunis : OSS, 28p.
- Gitas, I. Z., Douros, K., Minakou, C., Silleos, G. N., & Karydas, C. G. (2009). Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. *EARSel eProceedings*, 8(1): 40-52. http://www.eproceedings.org/static/vol08_1/08_1_gitas1.pdf. Consulté le 13/03/2019.
- Gliz, M. (2015). Etude de la sédimentation des barrages de la triplex : Ouizert-Bouhanifia-Fergoug, Thèse de doctorat, Univ. of Sidi Belabbes, Algeria.
- Guettoche, M. , Derias, A., Boutiba, M., Bounif, M., Guendouz, M., & Boudella, A. (2011). A Fire Risk Modelling and Spatialization by GIS. *Journal of Geographic Information System*, 3(3), 254-265. <https://doi.org/10.4236/jgis.2011.33022>.
- Habert, E. (2000), Qu'est-ce qu'un système d'informations géographiques ? Notes de cours, IRD, disponible enligne <http://www.cartographie.ird.fr/publi/documents/sig1.pdf>. Consulté le 04/08/2020.
- Haddouche, I. (2009), La télédétection et la dynamique des paysages en milieu aride, Thèse doctorat, Université de Tlemcen, 259 p.
- Hajji, O., Abidi, S., Hermassi, T., & Mekni, I. (2017). Evaluation of Water Erosion Risk in Tunisian Semi Arid Area. In Abdalla O., Kacimov A., Chen M., Al-Maktoumi A., Al-Hosni T., & Clark I. (eds) *Water Resources in Arid Areas: The Way Forward*. (pp 215–249) .Springer Water. Springer, Cham.
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahé, G., Alirahmani, S., & Keddar, A. (2018). Modeling of discharge and sediment transport through the SWAT model in the basin of Harraza (Northwest of Algeria). *Water Sci*, 32(1), 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2017.12.004>
- Hamadouche, M. A. (2015). Outils spatiaux et analyse multicritère : Application à la gestion des parcs nationaux de l'Ahaggar et Tassili (Algérie). Thèse de doctorat en Sciences, Université de Mostaganem, 298pp

- Hamadouche, M.A., Daikh, F.Z., Chraïr, M., Anteur, D., Fekir, Y., & Driss, M. (2019). Erosion Sensitivity Mapping Using GIS-Based Multicriteria Analysis – Case Study of the Semiarid Macta Watershed, North-West of Algeria. In: Kallel A., Erguler, Z. A., Cui, Z., Karech, A., Karakus, M., & al. (eds) Recent Advances in Geo-Environmental Engineering, Geomechanics and Geotechnics, and Geohazards. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development). Springer, Cham
- Hamlat A. (2014). Contribution à la gestion des ressources en eau des bassins versants de l'ouest algérien à l'aide d'un système informatise, Thèse de doctorat Es-sciences, USTO, 243pp
- Haouchine, A. (2012). Assessment of Risk and Uncertainty Related to Coastal Aquifer Management in Algeria. National report.
- Hasheminasab et al. (2017). Fire Risk Potential Checking in Forests using Fire Risk Model. International Journal of Constructive Research in Civil Engineering, 3(4), 67-75. <https://dx.doi.org/10.20431/2454-8693.0304006>
- INSID (2008). Institut National des Sols, de L'irrigation et du Drainage : Sols salins en Algérie. <http://www.insid.dz/realisation/autres%20activites/A8.pdf>. Consulté le 12/08/2020
- IPCC (2007). Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp
- Jaiswal, R. k., Krishnamurthy, J., Mukherjee, S. (2005). Regional study for mapping the natural resources prospect and problem zones using remote sensing and GIS. Geocarto Int, 20(3): 21–31. <https://doi.org/10.1080/10106040508542352>
- Jaquet, J. (1989). Limnologie et télédétection : situation actuelle et développements futurs. Revue des sciences de l'eau, 2(4), 457–481. <https://doi.org/10.7202/705039ar>
- Kaci, M., Habi, M. & Morsli, B., (2017). Estimation de l'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol (USLE). Cas du bassin versant non jaugé de l'oued Rhio, (Bassin de Cheliff) Algérie, Geo-Eco-Trop, 41(3), pp. 503-518
- Kaplan, G., Avdan, Z.Y., & Avdan, U., (2019). Mapping and Monitoring Wetland Dynamics Using Thermal, Optical, and SAR Remote Sensing Data. In: Gökçe, D. (Ed.). Wetlands Management – Assessing Risk and Sustainable Solutions, IntechOpen, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80264>
- Karaburun, A. (2010). Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed, Ozean J Appl Sci 3(1), 77-85.
- Kessira, M. (2013) politiques de soutien et cadres institutionnels : Valorisation des eaux usées épurées en irrigation. Synthèse Internationale du Projet “Sécurité d'utilisation des eaux usées en agriculture” Téhéran, Iran, 26-28 Juni 2013.
- Khader, M., Benabdeli, K., Mederbal, K., Fekir, Y., Rami, G., & Mekkous, B. (2009). Etude du risque incendie à l'aide de la géomatique: cas de la forêt de Nesmoth (Algérie). Revistas Mediterránea. 20, 205-234. <https://doi.org/10.14198/MDTRRA2009.20.07>.
- Khali Issa, L., Ben Hamman Lech-Hab, K., Raïssouni, A., & El Arrim, A. (2016). Quantitative Mapping of Soil Erosion Risk Using GIS/USLE Approach at the Kalaya Watershed (North Western Morocco), J. Mater. Environ. Sci. 7(8), 2778-2795
- Khemis, F. (2013), Inventaire des variétés locales d'arboriculture fruitière et leurs biotopes respectifs dans la wilaya de Tlemcen. Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 221pp

- Koussa, M., & Bouziane, M. T. (2018). Contribution of GIS to the mapping of water-erosion risk areas in the Beni Haroun watershed, Mila, Algeria, *Geo-Eco-Trop.*, 42, 1 : 43-56.
- Kreirzti, L.K., Benamara, L. , & Boudjenane, NE. (2019). Valorization of dredging sediments of dam Bouhanifia in ceramic. *J Aust Ceram Soc.* <https://doi.org/10.1007/s41779-019-00321-x>
- Kumar, L.; & Mutanga, O. (2018). Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. *Remote Sens.* 10, 1509. <https://doi.org/10.3390/rs10101509>
- Labioud, Z., Remini, B. , & Belaredj, M. (2004). Traitement de la vase du barrage de Bouhanifia en vue de sa valorisation. *Larhyss Journal*, 3, 7-12
- Larid, M. (1994). Rôle du machinisme agricole dans l'érosion des sols : Cas du plateau de Mostaganem (Algérie). Thèse de doctorat, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg I, France, 109p.
- Levacher, D., Colin, D., Carina, A., Duan, Z., & Sun, L. (2006). Recyclage et valorisation de sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers. IXème journées nationales Génie Civil- Génie Côtier, Brest, pp 603-612. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2006.058-L>.
- Maarouf, H., Semcha, A., Mahmoudi, N., Bouhamou, N., Benzerzour, M., & Maherzi, W. (2018). Experimental study on the reuse of a dredging sludge from west of Algeria in brick fabrication. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 5(2), 163-172. <http://revue.ummo.dz/index.php/IMES/article/view/1697>. Consulté le 18/05/2019
- Mariel, A. (1995). Cartographie du niveau de risque d'incendie : exemple du massif des Maures Mapping the level of fire risk: example of the Maures massif. Cemagref report..
- Meddi, M. & Hubert, P. (2003) Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. *Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions*. IAHS publication 278, 1-7.
- Meddi, H. & Meddi, M. (2009) Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie, *Sécheresse* 20(1) : 57-65.
- Meddi, M., Toumi, S. & Assani, A. (2016). Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria. *Arab. J. Geosci.* 9:282. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2303-8>
- Meddour-Sahar, O., Meddour, R., Leone, V., Derridj, A. (2014). Motifs des incendies de forêt en Algérie : analyse comparée des dires d'experts de la Protection Civile et des Forestiers par la méthode Delphi. *Vertigo*, 14(3). <https://doi.org/10.4000/vertigo.15462>. Disponible au : <https://journals.openedition.org/vertigo/15462>. Consulté 1/12/2019
- Medjerab, A. & Henia, L. (2005). Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord-occidentale, *Revue Géographique de l'Est* [Online], 45(2). DOI : <https://doi.org/10.4000/rge.501>. Disponible au: <http://journals.openedition.org/rge/501> ; Consulté le 05/10/2019.
- Medjerab, A. & Henia, L. (2011) variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie nord-occidentale, *Courrier du Savoir* N°11, pp.71-79.
- Meghraoui, M., Habi, M., Morsli, B., Regagba, M., & Seladji, A. (2017). Mapping of soil erodibility and assessment of soil losses using the RUSLE model in the Sebaa Chioukh Mountains (NorthWest of Algeria). *Journal of Water and Land Development*. 34(1), 205–213. <https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0055>.
- Megnounif, A., Terfous, A. & Bouanani, A. (2003). Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest algérien). *Rev. Sci. Eau*, 16(3), 369-380.

- Megnounif, A., Terfous, A. & Ouillon S. (2013). A graphical method to study suspended sediment dynamics during flood events in the Wadi Sebdou, NW Algeria (1973- 2004). *J. Hydrol.*, 497, 24-36
- Messahel, M., & Benhafid, M.S. (2004) Amenagements hydro agricoles : situation actuelle et perspectives de developpement en Algerie. In : Hamdy A. (ed.), Tüzün M. (ed.), Lamaddalena N. (ed.), Todorovic M. (ed.), Bogliotti C. (ed.). *Participatory water saving management and water cultural heritage*. Bari : CIHEAM, p. 85-95 (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 48)
- Messahel, M., Benhafid, M.S., & Ouled Hocine, C. (2005) Efficience des systemes d'irrigation en Algerie. In : Lamaddalena N. (ed.), Lebdi F. (ed.), Todorovic M. (ed.), Bogliotti C. (ed.). *Irrigation systems performance*. Bari : CIHEAM, p. 61-78 (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 52)
- Morgan, R.P.C. (2005) *Soil erosion and conservation*, third edition., Blackwell Publishing, Oxford, UK. 304pp
- Morsli, B., Mazour, M., Mededjel, N., Hamoudi, A., & Roose, E. (2004). Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, 15(1): 96–104.
- Mouhouche, B., & Guemraoui, M. (2004). Réhabilitation des grands périmètres d'irrigation en Algérie. Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée, Rabat, Maroc. 13 p. ffcirad-00189190
- Mutin Georges. La construction régionale de l'Algérie (Algeria : a regional appraisal). In: *Bulletin de l'Association de géographes français*, 62e année, 1985-1 (avril). pp. 21-43. <https://doi.org/10.3406/bagf.1985.1278>. Disponible au : https://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_1985_num_62_1_1278. Consulté le 14/04/2020.
- Nedjraoui D. (2011). Vulnérabilité des écosystèmes steppiques en Algérie. « L'effet du Changement Climatique sur l'élevage et la gestion durable des parcours dans les zones arides et semi-arides du Maghreb ». Université KASDI MERBAH - Ouargla- Algérie, du 21 au 24 Novembre 2011. pp41-53.
- Neggaz, F.Z., & Kouri, L. (2018). Assessment of soil water erosion using RUSLE and GIS techniques: a case study of Oued El-Abtal watershed, Algeria. *J. Bio. Env. Sci.* 13(5), 166-179. <https://innspub.net/jbes/assessment-soil-water-erosion-using-rusle-gis-techniques-case-study-oued-el-abtal-watershed-algeria>. Accessed 25 March 2019
- Neitsch, S., Arnold, J. , Kiniry, J., & Williams, J. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute, pp 1–647.
- Nichane, M. & Khelil, M. A. (2014) Changements climatiques et ressources en eau en Algérie : vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation. *Revue des BioRessources*, 4(2), pp 1-7.
- Nichane, M., & Khelil, M.A. (2015) changements climatiques et ressources en eau en Algérie : vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation. *Larhyss Journal*, 21, 25-33
- Nichane M. & Khelil M. A. (2015) changements climatiques et ressources en eau en Algérie : vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation. *Algerian journal of arid environment*, 5(1), 56-62
- OMM (2005), Organisation Météorologique Mondiale : Le climat et la dégradation des sols (Disponible au https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5097. Consulté le 10/06/2020
- Ozsahin, E. , & Eroglu, I. (2019). Soil Erosion Risk Assessment due to Land Use/Cover Changes (LUCC) in Bulgaria from 1990 to 2015. *Alinteri Journal of Agriculture Science* , 34(1) , 1-8. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.444193>
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Zanden, A. H., Poesen, J., & Alewell, C. (2015). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental Science & Policy*, 51, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.012>.

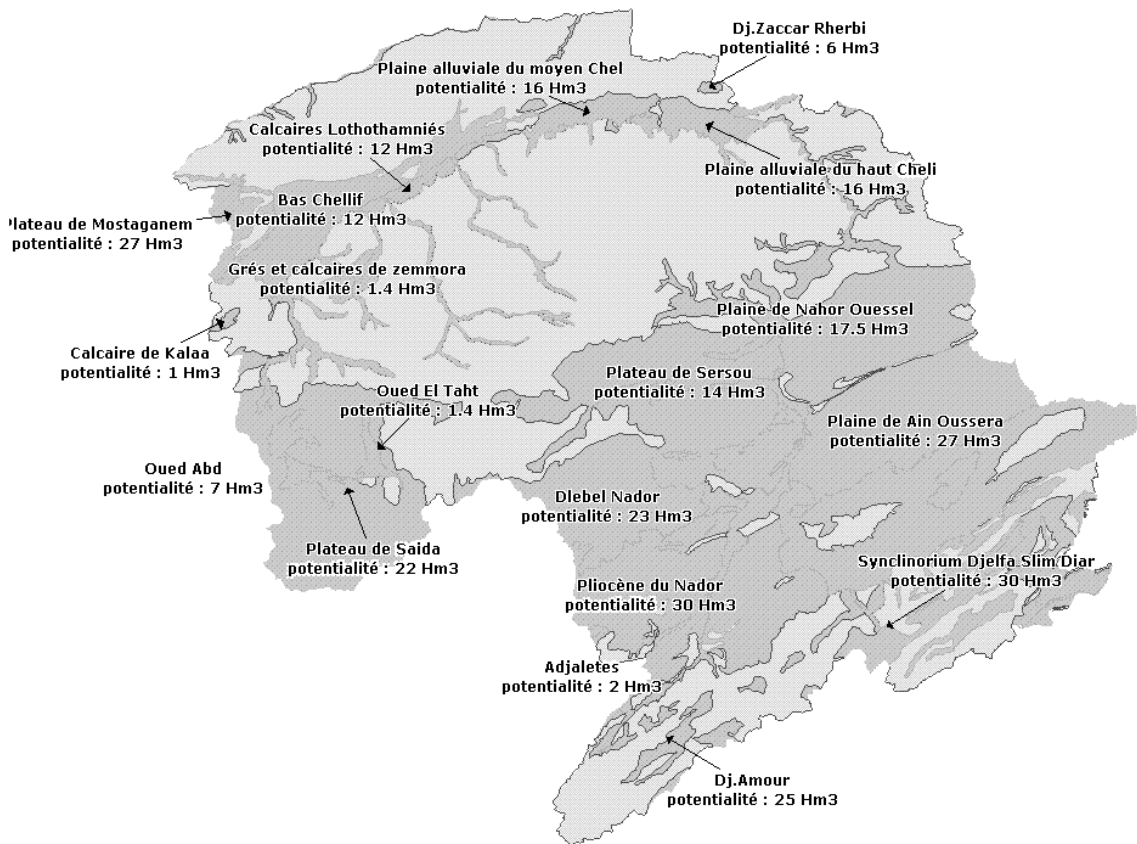
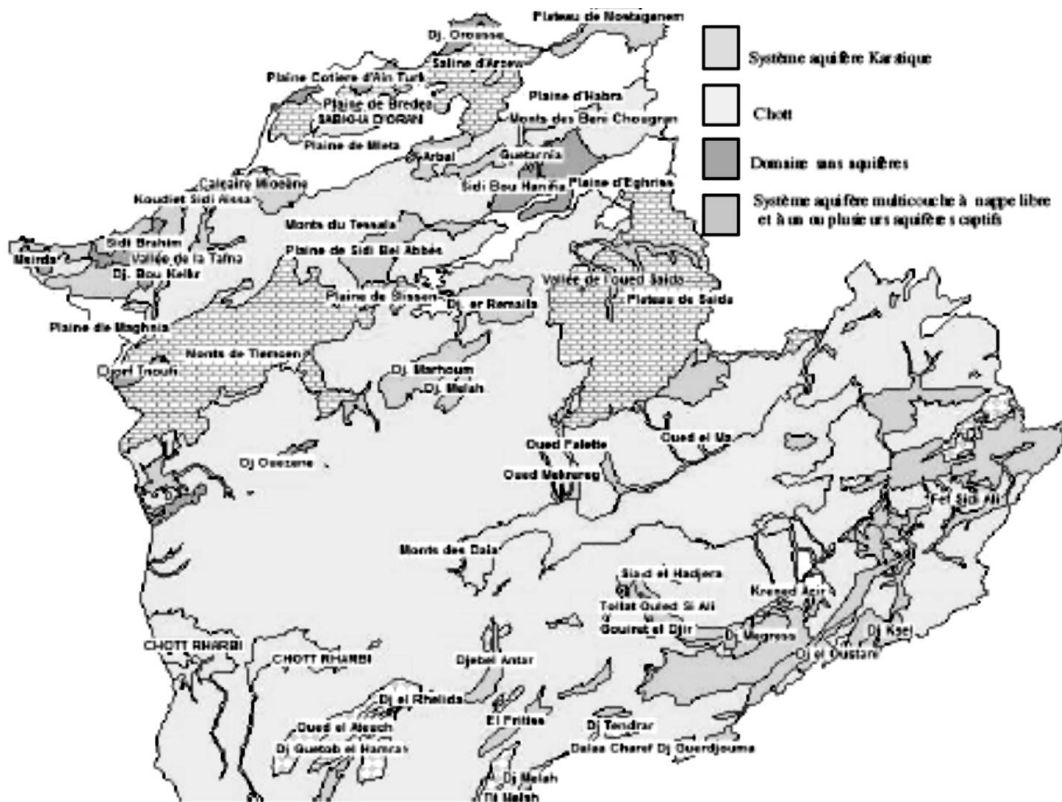
- Plan Bleu (2003). Les Cahiers du Plan Bleu 2 : Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens, Etude bibliographique. 80 p
- PNUD (2009) Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie.
- PPRIF (2003) Plan de prévention du risque des incendies de forêts, disposition mises en opposabilités immédiates. Rapport de projet, 42pp
- Prasad, V.K., Badarinath, K., Eaturu, A. (2008). Biophysical and anthropogenic controls of forest fires in the Deccan Plateau. India. J. Environ. Manage, 86, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.11.017>
- Rango, A., & Arnoldus, H.M.J. (1987). Aménagement des bassins versants. Cahiers techniques de la FAO.
- Rasul, A.; Balzter, H.; Ibrahim, G.R.F.; Hameed, H.M.; Wheeler, J.; Adamu, B.; Ibrahim, S.; Najmaddin, P.M. (2018) Applying Built-Up and Bare-Soil Indices from Landsat 8 to Cities in Dry Climates. Land , 7, 81. <https://doi.org/10.3390/land7030081>
- Remini, B. (1997). Envasement des retenues de barrages en Algérie : Importance, mécanismes et moyen de lutte par la technique du soutirage. Doctorat d'état, École Nationale Polytechnique d'Alger, 348 pp
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Washington, DC: USDA Agricultural Research Services, Agriculture handbook no, 703pp.
- Roose, E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique. 70. FAO, Rome. 420 pp
- Saatchi, S., Halligan, K., Despain, D., Crabtree., R. (2007). Estimation of Forest Fuel Load From Radar Remote Sensing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(6), 1726 - 1740. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.887002>
- Sadiki, A., Faleh, A., Zèzere, J. L., & Mastass, H. (2009). Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla, Rif central Maroc. Cahiers Géographiques, 6, 59-70.
- Sakellariou, S., Tampekis, S., Samara, F. et al. (2019). Determination of fire risk to assist fire management for insular areas: the case of a small Greek island. J. For. Res. 30, 589–601. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0666-x>
- Seklaoui-Oukid, O. (2016) Valorisation des sédiments du barrage d'el Merdja Sidi Abed : étude technico-économique. Thèse de Doctorat, Université de Tizi Ouzou, 138 pp
- Selby, M.J. (1993). Hillslope Materials and Processes. Oxford: Oxford Univ. Press, New York. 451 pp
- Serbah, B., (2018), Cartographie des sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien : Une solution de valorisation en BTC, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Tlemcen, 230pp
- Setiawan, I., Mahmud, A., Mansor, S., Shariff, M., Nuruddin, A. (2004). GIS-grid-based and multi-criteria analysis for identifying and mapping peat swamp forest fire hazard in Pahang, Malaysia. Disaster Prev Manag, 13(5): 379-386. <https://doi.org/10.1108/09653560410568507>
- Sogreah (1967). Étude générale des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie. Dossier. Alger : Ministère de l'Agriculture et de la Réforme agraire.
- Soudani, K. (2005) Introduction Générale à La Télédétection, Partie I : Bases physiques et exemples d'applications aux couverts végétaux, Notes de Cours, Université Paris Sud XI, France. Disponible au http://hebergement.u-psud.fr/ese/IMG/pdf/doc_cours_teledec.pdf. Consulté le 22/5/2020.
- Stone, R.P., & Hilborn, D. (2012). Équation universelle des pertes en terre (USLE). Fiche technique, Imprimeur de la Reine pour l'Ontario, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des affaires rurales. <http://www.omafr.gov.on.ca/french/engineer/facts/12-052.htm>. Accessed 25 January 2019.

- Suryabhadgavan, K. V., Alemu, M., Balakrishnan, M. (2016). GIS-based multi-criteria decision analysis for forest fire susceptibility mapping: a case study in Hareenna forest, southwestern Ethiopia. *Tropical Ecology*, 57(1): 33-43.
- Talbi., O., Benabdeli, K., Benhanifia, K. & Haddouche, D. (2018). Cartographie des zones de risque de feux de forêt dans la commune de Doui Thabet, Saïda, Algérie. *International Journal of Environmental Studies*, 75(4), 543-552. <https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1386434>
- Terfous, A., Megnoufi, A. & Bouanani, A. (2001). Étude du transport solide en suspension dans l'oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau*, 14(2), 173-185
- Toubal, A. K. (2019) Evaluation de l'érosion hydrique et du transport solide du bassin versant de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert, nord-ouest Algérien, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Chlef, 232 pp.
- Toubal, A.K., Achite, M., Ouillon, S., & Dehni, A. (2018). Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the WadiSahouat basin, North-West of Algeria, *Environ Monit Assess*, 190:210. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6580-z>
- Toumi, A., & Remini, B. (2018) Perte de la capacité de stockage d'eau au barrage de Beni Haroun, Algérie. *SAGREN* 2(1), pp 80-97
- Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., & Brou, Y. T. (2013). Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1542-1558. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.824088>
- Trabaud, L. (1991) Fire regimes and phytomass growth dynamics in a *Quercus coccifera* garrigue. *Journal of Vegetation Science* 2, 307-314.
- UICN (2005), Union International pour la Conservation de la Nature : Programme pour l'Afrique du Nord, Projet Education et Conservation de la Biodiversité.
- Uwe, M. W. (2016). Sentinel-2 MSI – Level-2A Prototype Processor Installation and User Manual, S2PAD-VEGA-SUM-0001, Issue 2.2. <https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.2.1/S2PAD-VEGA-SUM-0001-2.2.pdf>. Accessed 15 December 2018.
- Vélez, R. (1999). Protection contre les incendies de forêt : principes et méthodes d'action. In : Vélez R. (ed.). *Protection contre les incendies de forêt : principes et méthodes d'action*. Zaragoza : CIHEAM 1999. p. 1-18 (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 26)
- Williams, J.R., (1975). Sediment Yield Prediction with Universal Equation using Runoff Energy Factor. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. USDA ARS Report S-40. 244-252.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., & Cross, B.V. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of soil and water conservation*, 26, 189-193.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses, USDA Agricultural Research Services Handbook 537. Washington, DC: USDA 57 pp
- Xia, H.; Zhao, J.; Qin, Y.; Yang, J.; Cui, Y.; Song, H.; Ma, L.; Jin, N.; & Meng, Q. (2019) Changes in Water Surface Area during 1989–2017 in the Huai River Basin using Landsat Data and Google Earth Engine. *Remote Sens*, 11, 1824. <https://doi.org/10.3390/rs11151824>
- Xu, D., Shao, G., Dai, L. et al. (2006). Mapping forest fire risk zones with spatial data and principal component analysis. *Sci China Ser E*, 49, 140–149. <https://doi.org/10.1007/s11434-006-8115-1>.

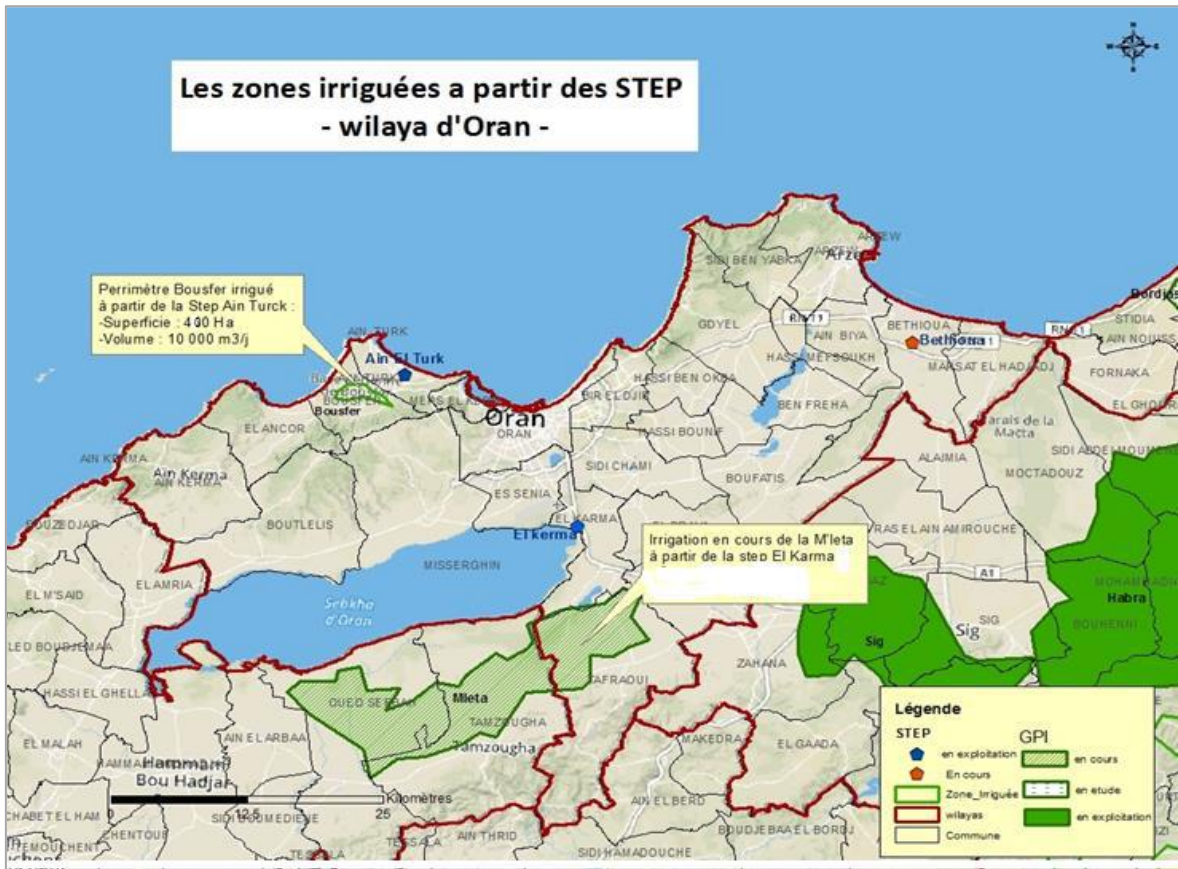
- Yerou, H. (2013). Dynamique des systèmes d'élevage et leur impact sur l'écosystème steppique : cas de la région de Naâma (Algérie occidentale). Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Tlemcen, Algérie. 135 p
- Zante, P., Collinet, J., & Leclerc, G. (2003). Cartographie des risques érosifs sur le bassin versant de la retenue collinaire d'Abdessadok (nord dorsale tunisienne). Montpellier. Institut de recherche pour développement pp. 44.
- Zaoui, M.A. (2015). Etude d'optimisation de dévasement par dragage des barrages de l'Ouest d'Algérie Cas du Barrage de Bouhanifia, Thèse de Magister, Université Sciences et Technologies Oran, Algérie. 82p. http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=1214. Consulté le 12/04/2019.

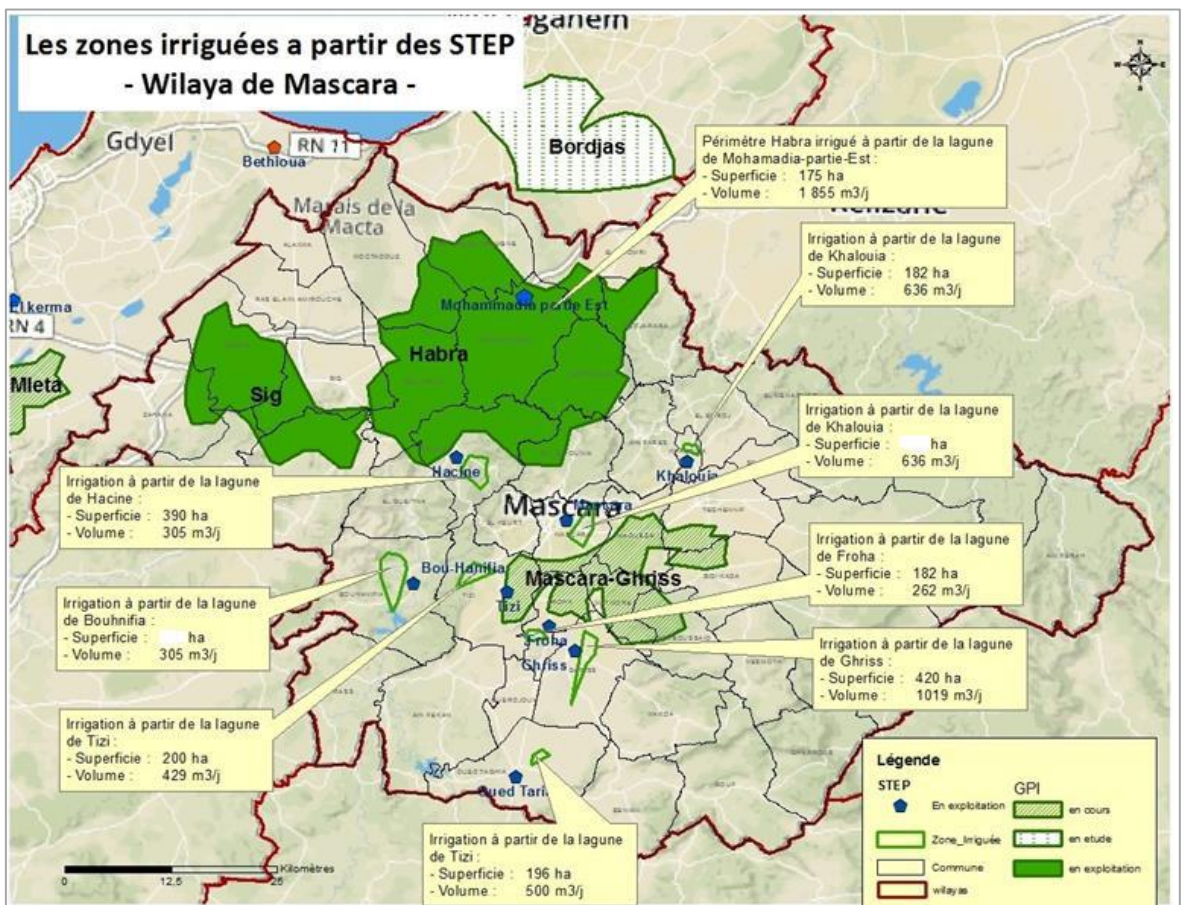
Annexes

Annexe 1: Carte des Aquifères de la région occidentale de l'Algérie



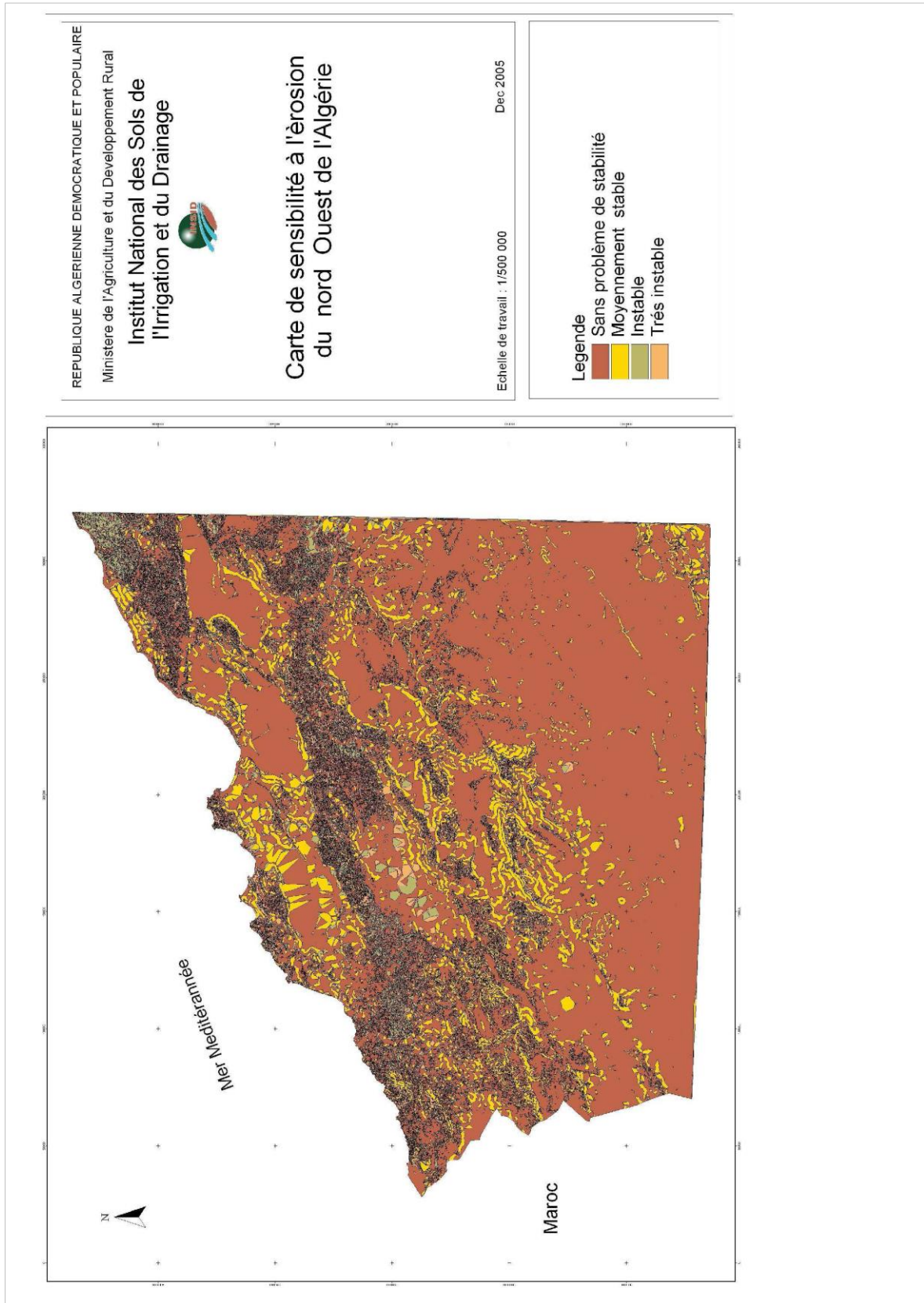
Annexe 2: Cartes des zones irriguées à partir des STEP (Source :ONA)

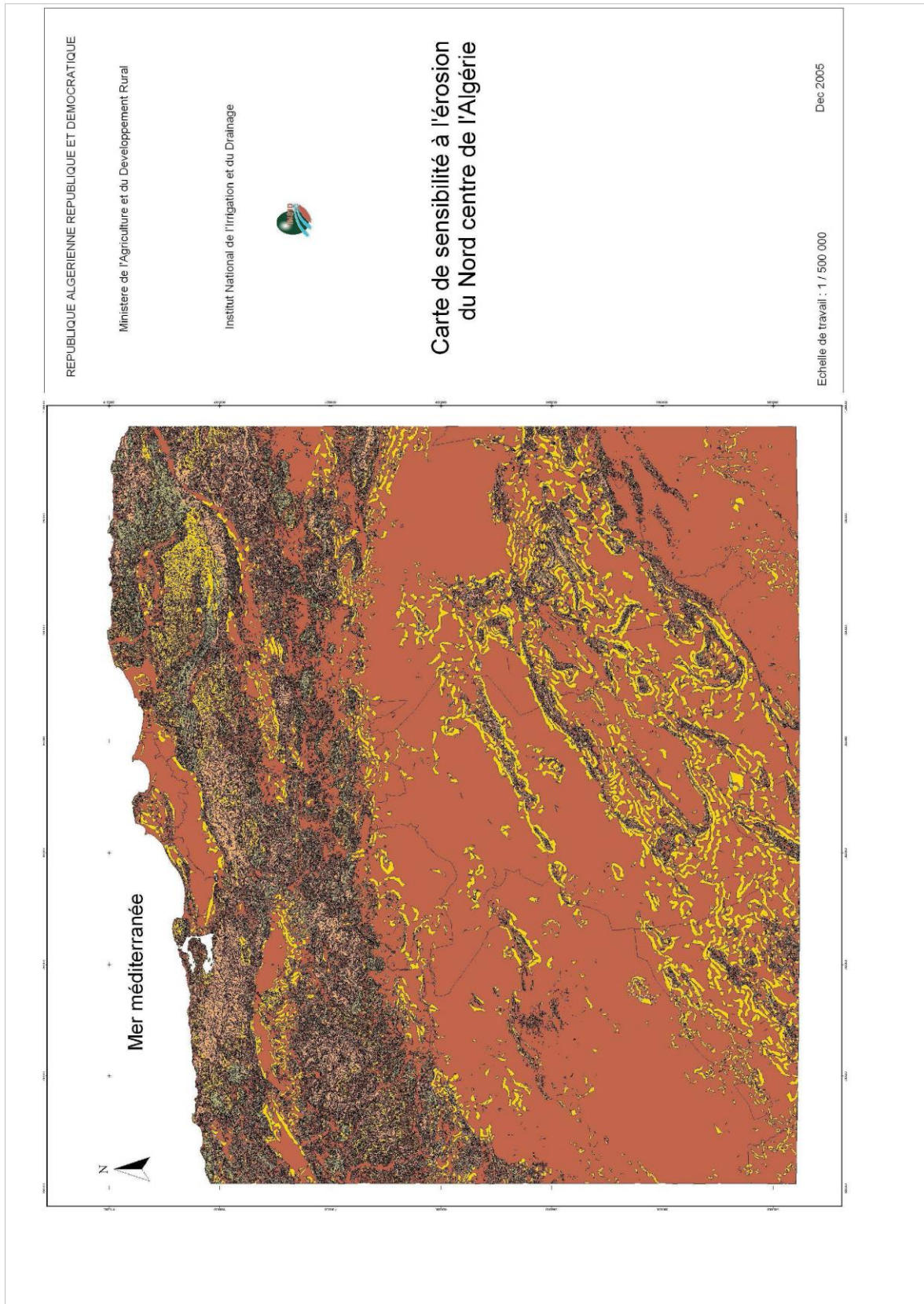


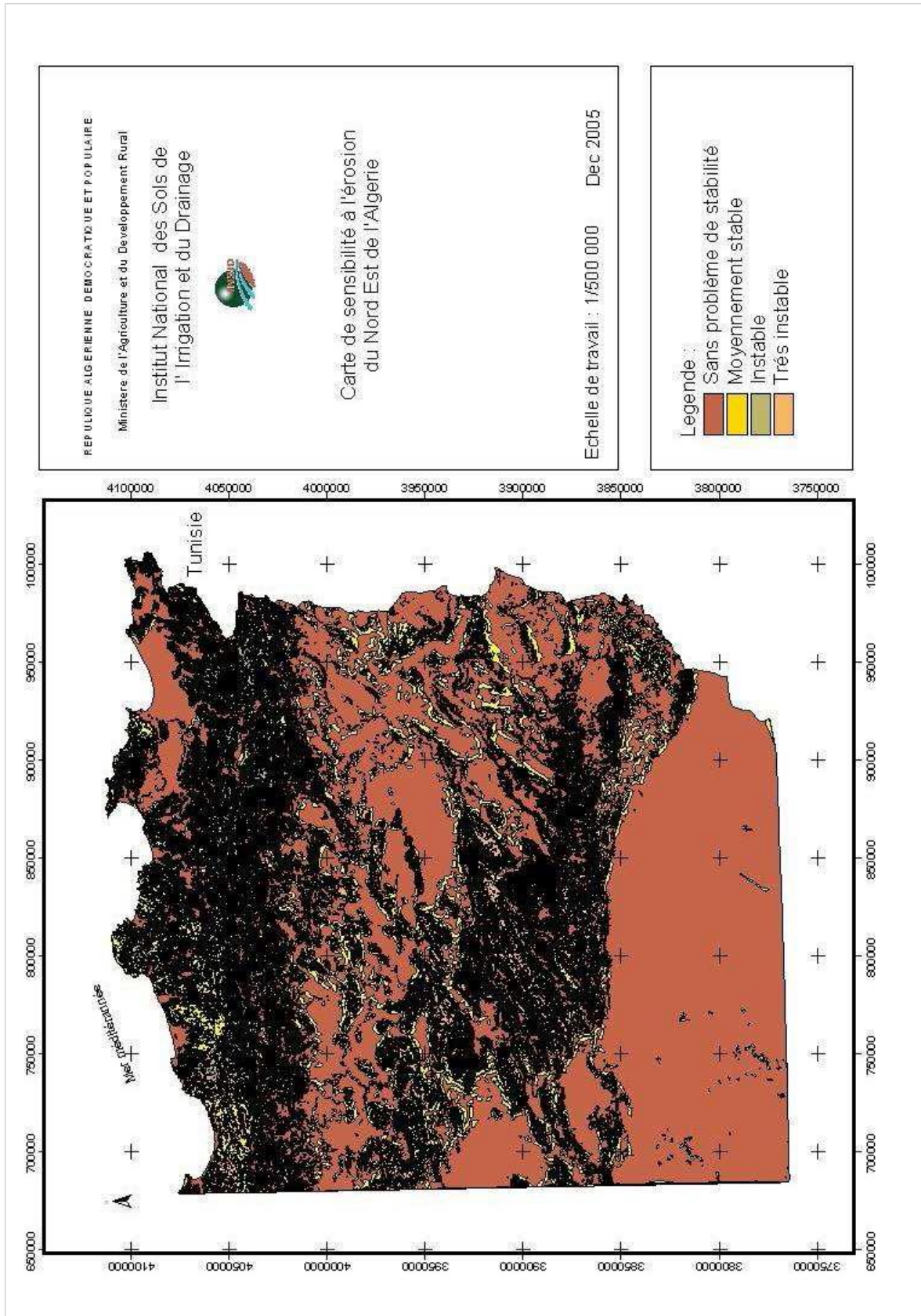




Annexe 3 : Cartes des zones sensibles à l'érosion du nord Algérie (Source : INSID)







Annexe 3 : Extrait du Code JavaScript développé avec les APIs de Google Earth Engine

```

var L7_1 = L7.filterBounds(limit);
var S2_1 = S2.filterBounds(limit);
var L7_cloud = L7_1.filterMetadata('CLOUD_COVER',"less_than",1);
var L7_stud = L7_cloud.filterDate('2014-02-01','2014-06-30');
print(L7_stud.size());
var L7_study = L7_stud.median();
var S2_cloud =
S2_1.filterMetadata('CLOUD_COVERAGE_ASSESSMENT',"less_than",1);

var S2_area = S2_cloud.filterDate('2016-03-19','2016-03-22');
print(S2_area.size());
var trueColourL8 = {
  bands: ["B3", "B2", "B1"],
  min: 0,
  max: 3000
};
var NDVI14 = L7_study.normalizedDifference(['B4','B3']); // NIR
//BLUE: im.select("B2"), //BLUE
//SWIR: im.select("B12")// SWIR
var NDVIS214 = S2_area.median().normalizedDifference(['B8','B4']);

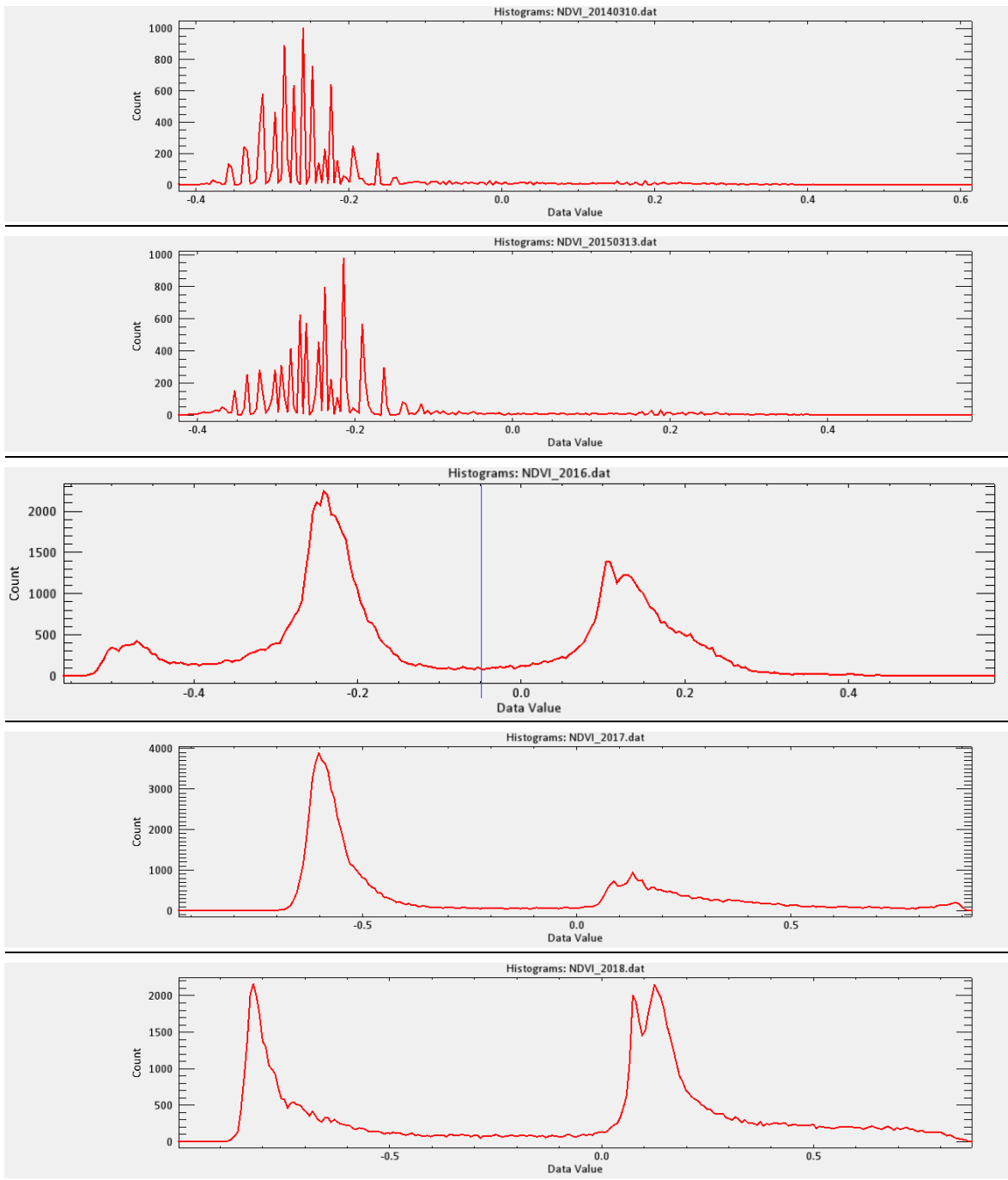
//Map.addLayer(NDVI, {min: 0, max: 1}, "NDVI");
var NDWI14 = L7_study.expression(
  "(GR - NIR) / (GR + NIR)",
  {
    //RED: im.select("B4"), // RED
    NIR: L7_study.select("B4"), // NIR
    //BLUE: im.select("B2"), //BLUE
    GR: L7_study.select("B2")
    //SWIR: im.select("B12")// SWIR
  });

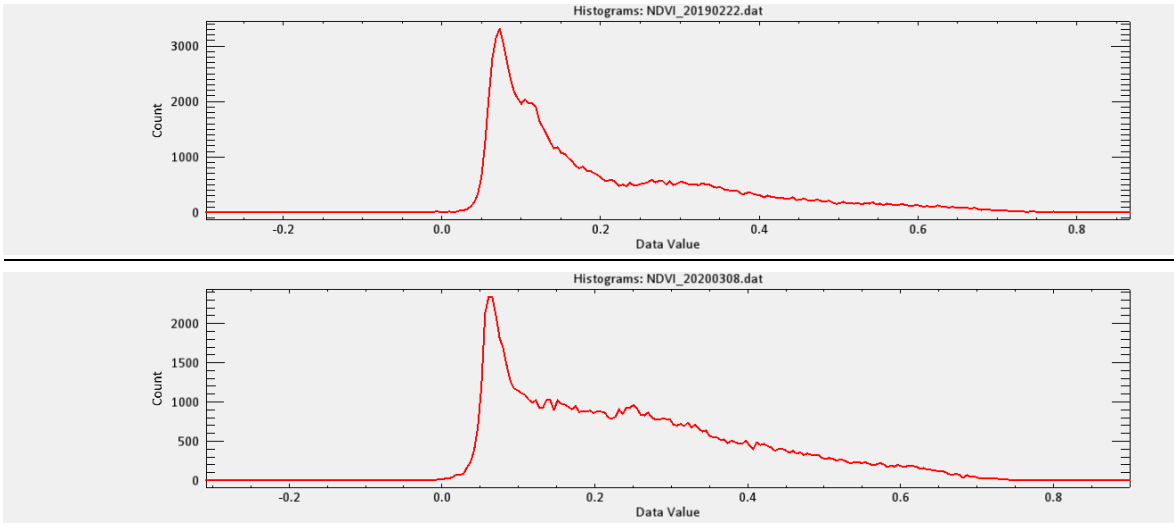
//Map.addLayer(NDWI, {min: 0, max: 1}, "NDWI");
var NDVI_study = NDVI14.clip(limit);
var NDWI_study = NDWI14.clip(limit);
var NDVIS214_study = NDVIS214.clip(limit);
var S2_study = S2_area.median();

var BSI2014 = L7_study.expression(
  '((mir + red) - (pir + blue)) / ((mir + red) + (pir + blue))',
  {
    mir: L7_study.select('B5'),
    red: L7_study.select('B3'), // 620-670nm, RED
    pir: L7_study.select('B4'), // 841-876nm, NIR
    blue: L7_study.select('B1') // 459-479nm, BLUE });
var BSI2016 = S2_study.expression(
  '((mir + red) - (pir + blue)) / ((mir + red) + (pir + blue))',
  {
    mir: S2_study.select('B11'),
    red: S2_study.select('B4'), // 620-670nm, RED
    pir: S2_study.select('B8'), // 841-876nm, NIR
    blue: S2_study.select('B2') // 459-479nm, BLUE });
Map.addLayer(L7_study, trueColourL8, "True-color composite");
Map.addLayer(NDVI_study, {min: -1, max: 1}, "NDVI 2014");
Map.addLayer(NDWI_study, {min: -1, max: 1}, "NDWI 2014");
Map.addLayer(NDVIS214_study, {min: -1, max: 1}, "NDVI S2 2014");
Map.addLayer(BSI2014.clip(limit), {min: -1, max: 1}, "BSI 2014");
Map.addLayer(BSI2016.clip(limit), {min: -1, max: 1}, "BSI 2014");
Map.setCenter(0.992222, 36.0101, 13.5);

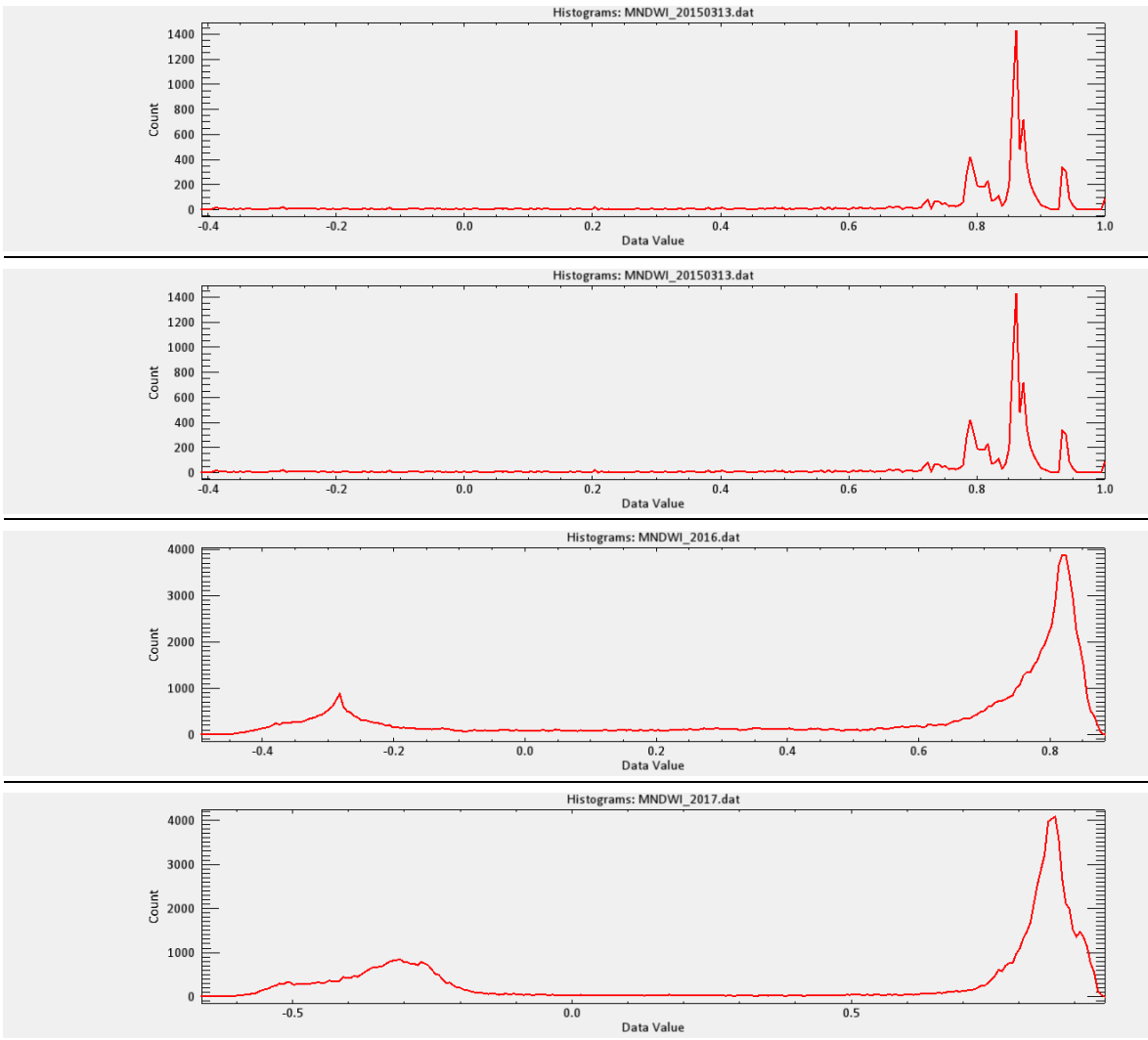
```

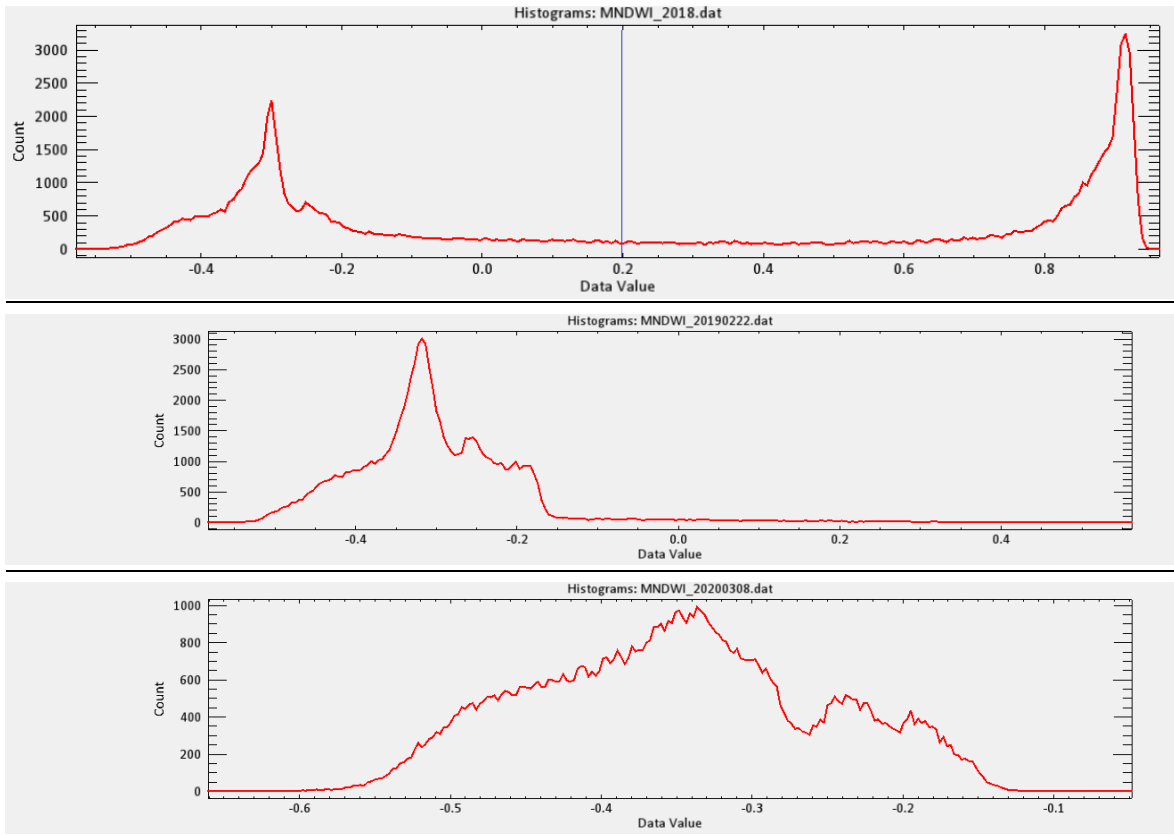
Annexe 4 : Les histogrammes du NDVI



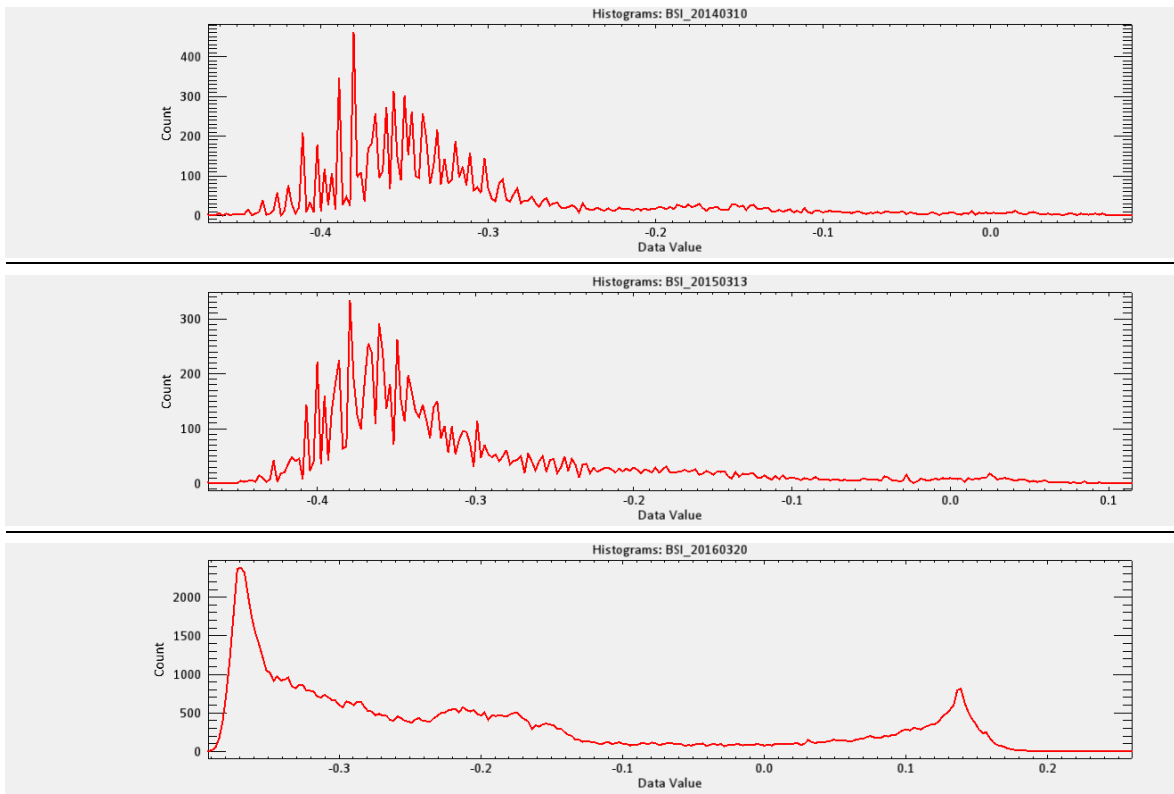


Les histogrammes du MNDWI

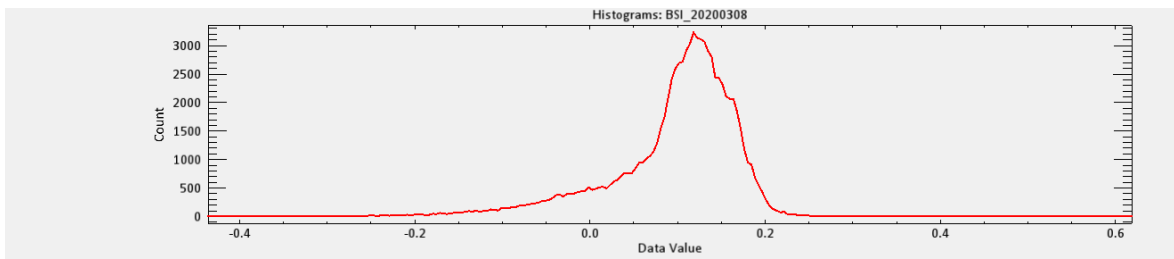
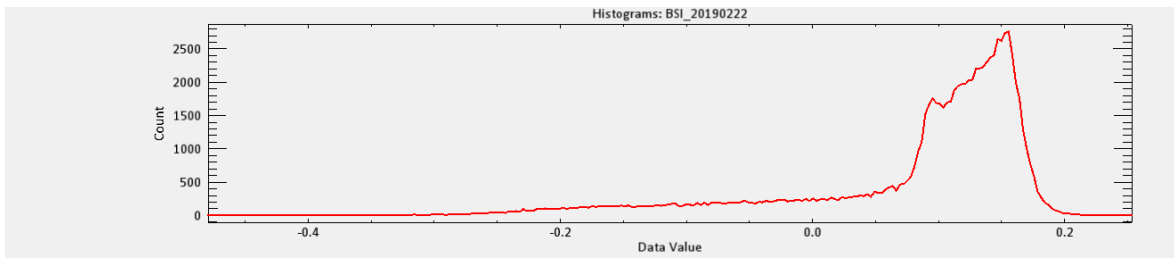
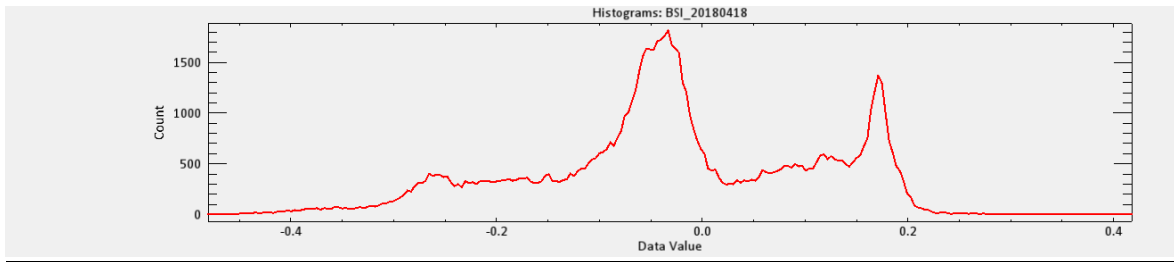
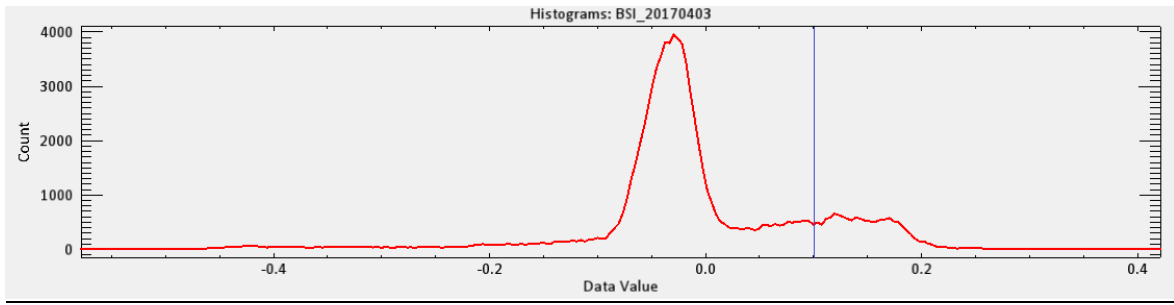




Les histogrammes du BSI



Annexe



Annexe 5 : Photos sur l'état du barrage de Merdja Sidi Abed (Septembre 2020)



