



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة باتنة 2 الشهيد مصطفى بن بولعيد  
Université Mustafa Ben Boulaïd, Batna -2-  
كلية علوم الطبيعة والحياة  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

## THÈSE

Présentée par

AIT MEDJBER Rachid

Pour l'obtention du Diplôme de  
Doctorat LMD

**Filière :** Ecologie et Environnement

**Spécialité :** Ecosystèmes méditerranéens et géomatique appliquée

## THÈME

# CARTOGRAPHIE ET MODELISATION DE L'EVOLUTION DU RISQUE POUR LA BIODIVERSITE AU NIVEAU DU MASSIF DE BELEZMA

Soutenue publiquement le 13/06/2024

Devant le jury :

<b>Président :</b> Abdelkrim SI BACHIR	Pr.	Université Batna 2
<b>Directeur de thèse :</b> Hassen BENMESSAOUD	Pr.	Université Batna 1
<b>Examineur :</b> Farid BEKDOUCHE	Pr.	Université Batna 2
<b>Examineur :</b> Tewfik MOSTEPHAOUI	D.R.	C.R.S.T.R.A. Biskra
<b>Examineur :</b> Fahima NEFFAR	MCA	Université Batna 2

Année universitaire : 2023/2024

# Dédicace

Au nom de Dieu, le tout puissant et le très miséricordieux, grâce  
à qui j'ai pu accomplir ce travail.

À la mémoire de mon père.

À ma mère.

À ma femme et mes enfants Adem, Ayoub et Aya.

À mes frères et sœurs.

À mes neveux et mes nièces.

Je dédie ce travail.

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ceux qui m'ont apporté leur soutien, leurs conseils et leurs encouragements tout au long de mon travail de recherche à : **Monsieur Benmessaoud Hassen**, professeur au département des sciences agronomiques à l'université de Batna 1, d'avoir bien voulu diriger mes travaux de recherche. Je le remercie profondément pour ses orientations, sa patience, son bel humanisme et sa grande sagesse, ses précieux conseils et son aide à différents niveaux durant toute la période de travail. Je le prie de trouver ici, l'expression de ma profonde reconnaissance.

**Monsieur Errol Vela**, professeur à l'université de Montpellier, pour son aide à différents niveaux de la préparation de l'article sur les orchidées. Je le prie de trouver ici, l'expression de ma profonde reconnaissance.

**M<sup>elle</sup> Hana Soualah Alila**, professeur à l'université Mouhamed Cherif Messadia, Souk-Ahras, pour son soutien moral et son aide à la préparation de l'article sur la détection et la cartographie du changement d'occupation de sol dans une zone méditerranéenne d'Afrique du Nord, Belezma (Algérie). Je lui adresse ici, l'expression de ma profonde reconnaissance.

**Monsieur Abdelkrim Si Bachir**, professeur à l'université de Batna 2 qui, malgré ses lourdes tâches, a accepté de présider le jury. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance.

**Monsieur Farid Bekdouche**, professeur à l'université de Batna 2, qui me fait l'honneur d'examiner ce travail et d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

**M<sup>elle</sup> Fahima Neffar**, maitre de conférences « A » à l'université de Batna 2, qui me fait l'honneur d'examiner ce travail et d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

**Monsieur Tewfik MOSTEPHAOUI**, directeur de recherche au niveau du centre des recherches scientifiques et techniques sur les régions arides (CRSTRA) de la wilaya de Biskra, d'avoir accepté d'examiner cette thèse, qu'il trouve ici le témoignage de mon profond respect.

Je remercie aussi les cadres et les agents **du parc national de Belezma et de la conservation des forêts de la wilaya de Batna**, sans oublier M. Elalmi Benmokhtar, M. Tahar Mebarki et M. Ammar Sahraoui pour leur aide sur terrain.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## TABLE DES MATIERES

**DEDICACE**

**REMERCIEMENTS**

**TABLE DES MATIERES**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**LISTE DES ABREVIATIONS**

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : MILIEU PHYSIQUE ET CONTEXTE CLIMATIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....</b>	<b>5</b>
Introduction .....	5
1.1. Milieu physique et état socioéconomique .....	5
1.1.1. Aspect géographique et administratif.....	5
1.1.2. Les principales zones homogènes .....	6
1.1.3. Les structures géologiques.....	7
1.1.4. Cadre édaphique .....	7
1.1.5. Hydrologie.....	8
1.1.5.1. Les eaux superficielles.....	8
1.1.6. La géomorphologie.....	10
1.1.7. La biodiversité .....	11
1.1.7.1. La biodiversité végétale.....	11
1.1.8. Etat socioéconomique.....	14
1.1.8.1. La répartition démographique .....	14
1.1.8.2. Réseau routier .....	16
1.1.8.3. Les activités économiques (Agriculture).....	16
1.1.8.4. Alimentation en énergie, activités économiques et industrialisation .....	16
Conclusion.....	17
1.2. Données météorologiques et synthèse climatique .....	18
1.2.1. Introduction .....	18
1.2.1. Données météorologiques.....	18
1.2.1.1. Température.....	18
1.2.1.2. Précipitations (Pluviométrie).....	19
1.2.2. Répartition spatiale des variables climatiques températures et précipitations .....	20
1.2.2.1. Extrapolations des données .....	20

1.2.2.2. Les Températures .....	21
1.2.2.3. Les précipitations .....	23
1.2.3. Synthèses climatiques.....	24
1.2.3.1. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN.....	24
1.2.3.2. Climagramme d'EMBERGER .....	26
1.2.4. L'indice d'aridité de DE MARTONNE .....	30
Conclusion .....	31

## **CHAPITRE II : CARTOGRAPHIE DE L'ETAT DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DU SOL DANS LA REGION DE BELEZMA.....**

Introduction .....	32
2.1. Localisation de notre zone d'étude.....	32
2.2. Matériel et méthodologie .....	33
2.3. Résultats et discussion.....	39
Conclusion.....	46

## **CHAPITRE III : CARTOGRAPHIE ET MODELISATION DU RISQUE DES INCENDIES DANS LE MASSIF DE BELEZMA .....**

Introduction .....	47
3.1. Localisation du massif forestier de Belezma.....	47
3.2. Matériel et méthodologie .....	48
3.2.1. Le biovolume BV .....	50
3.2.2. Les notes calorifiques .....	50
3.2.3. L'indice topo-morphologique IM .....	50
3.2.4. L'indice des activités humaines IH .....	51
3.2.5. L'indice de risque aux incendies de forêts IR.....	51
3.2.6. La démarche multicritère AHP de SAATY.....	51
3.3. Résultats et discussion.....	52
3.3.1. Le biovolume .....	52
3.3.2. Les notes calorifiques .....	54
3.3.3. Indice des activités humaines .....	56
3.3.4. Indice topo-morphologie .....	61
3.3.5. L'indice de risque aux incendies de forêts IR.....	64
3.3.6. Validation du modèle .....	68
Conclusion .....	70

## **CHAPITRE IV : CARTOGRAPHIE ET MODELISATION DES RISQUES D'EROSION HYDRIQUE DANS LA REGION DE BELEZMA** ..... 71

Introduction .....	71
4.1. Matériel et méthodologie .....	71
4.1.1. Données utilisées .....	71
4.1.2. Méthodologie de travail .....	72
4.2. Résultats et discussion .....	74
4.2.1. Indice d'érosivité potentielle des précipitations (R) .....	74
4.2.2. Indice d'érodibilité des sols (K) .....	75
4.2.3. Facteur topographie LS .....	78
4.2.4. Facteur de couvert végétal (C).....	81
4.2.5. Facteur de pratique antiérosive (agricole et conservation du sol) (P) .....	83
4.2.6. Croisement des cartes (A) .....	84
Conclusion .....	86

## **CHAPITRE V : SURVEILLANCE DU DECLIN DU CEDRE A L'AIDE DE DONNEES CLIMATIQUES ET DE LA TELEDETECTION DANS LA REGION DE BELEZMA** ..... 88

Introduction .....	88
5.1. Données utilisées et méthodologie .....	88
5.1.1. Données utilisées .....	88
5.1.2. Méthodologie.....	89
5.2. Résultats et discussion .....	90
5.2.1. Effet des températures et précipitations.....	90
5.2.2. Tendance du nombre de mois secs .....	91
5.2.3. Les précipitations mensuelles dans la période de l'activité biologique.....	92
5.2.4. L'utilisation des indices NDVI, NDMI et dNDMI .....	93
5.2.5. Indice de végétation par différence normalisée NDVI.....	93
5.2.6. MODIS séries chronologiques de NDVI 2000-2021 .....	95
5.2.7. Indice d'humidité par différence normalisée (NDMI).....	95
5.2.8. Delta de l'indice d'humidité par différence normalisée (dNDMI) .....	98
Conclusion.....	102

<b>CHAPITRE VI : LES ORCHIDEES, INDICATEURS DE LA BIODIVERSITE DANS LA REGION DE BELEZMA : ETUDE CARTOGRAPHIQUE, ECOLOGIQUE ET ENJEUX DE CONSERVATION</b> .....	103
Introduction .....	103
6.1. Matériels et méthodes .....	106
6.2. Résultats .....	109
6.3. Discussion.....	121
6.3.1. Écologie des espèces .....	121
6.3.2. Diversité et biogéographie.....	121
6.3.3. Enjeux de conservation et menaces .....	124
Conclusion.....	128
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	129
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	132
<b>ANNEXES</b>	
<b>RESUME</b>	

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure. 01 :</b> Carte de situation géographique.....	5
<b>Figure. 02 :</b> Carte des principales zones homogènes.....	6
<b>Figure. 03 :</b> Carte géologique. ....	7
<b>Figure. 04 :</b> Carte des types de sol de la zone d'étude .....	8
<b>Figure. 05 :</b> Carte du réseau hydrographique .....	9
<b>Figure. 06 :</b> Carte des altitudes .....	10
<b>Figure. 07 :</b> Cédraie du Belezma (Bordjem) .....	11
<b>Figure. 08 :</b> Pinède du Bouarif .....	12
<b>Figure. 09 :</b> Chênaie du Belezma (Refaâ) .....	12
<b>Figure. 10 :</b> Juniperaie du Belezma (Djerma) .....	13
<b>Figure. 11 :</b> Quelques espèces floristiques du Belezma <i>Romulea Vaillantii</i> , <i>Turgenia latifolia</i> , <i>Centaurea sp</i> et <i>Erodium guttatum</i> .....	13
<b>Figure. 12 :</b> L'évolution de la population dans la zone d'étude .....	14
<b>Figure. 13 :</b> Carte des zones urbaines dans la zone d'étude 2021 .....	15
<b>Figure. 14 :</b> Carte des zones d'activités industrielles et minières.....	17
<b>Figure. 15 :</b> Répartition des précipitations moyennes mensuelles .....	20
<b>Figure. 16 :</b> Température maximas et minimas moyennes pour la zone d'étude .....	21
<b>Figure. 17 :</b> Température moyenne par extrapolation 1989-2017 .....	22
<b>Figure. 18 :</b> Précipitations annuelles moyennes 1989-2017 .....	24
<b>Figure. 19 :</b> Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN .....	25
<b>Figure. 20 :</b> Climagramme d'EMBERGER .....	28
<b>Figure. 21 :</b> Carte des étages bioclimatiques Extrapolation 1989-2017.....	29
<b>Figure. 22 :</b> Carte des étages bioclimatiques WorldClim 1970-2000 .....	29
<b>Figure. 23 :</b> Carte des étages bioclimatiques WorldClim 2000-2021 .....	29
<b>Figure. 24 :</b> Indice d'aridité de DE MARTONNE .....	31
<b>Figure. 25 :</b> Carte des points d'échantillonnages.....	36
<b>Figure. 26 :</b> Les différentes classes de la diversité d'occupation du sol.....	37
<b>Figure. 27 :</b> Organigramme méthodologique .....	38
<b>Figure. 28 :</b> Cartes d'occupation du sol 1986, 2001 et 2021 .....	39
<b>Figure. 29 :</b> Le diagramme de l'évolution des différentes classes d'occupation du sol 1986, 2001 et 2021. ....	40

<b>Figure. 30 :</b> Carte des changements d'occupation du sol de la région du Belezma entre 1986 et 2021 .....	43
<b>Figure. 31 :</b> Carte représente les zones stables et les zones variables de la région du Belezma entre 1986 et 2021 .....	45
<b>Figure. 32 :</b> Carte de localisation du massif forestier de Belezma .....	48
<b>Figure. 33 :</b> Organigramme méthodologique .....	49
<b>Figure .34 :</b> Carte de l'indice de végétation par différence normalisée NDVI, 16 mai 2021 .....	52
<b>Figure .35 :</b> Les valeurs de biovolume correspondantes aux valeurs de NDVI.....	53
<b>Figure. 36 :</b> Carte de répartition de biovolume.....	53
<b>Figure. 37 :</b> Carte d'occupation du sol 2021 .....	54
<b>Figure. 38 :</b> Carte des notes calorifiques du combustible.....	55
<b>Figure. 39 :</b> Carte de répartition des zones urbaines .....	56
<b>Figure. 40 :</b> Carte de répartition des zones agricoles.....	56
<b>Figure. 41 :</b> Carte de répartition du réseau routier.....	57
<b>Figure. 42 :</b> Carte de distance des zones urbaines .....	58
<b>Figure. 43 :</b> Carte de distance des zones agricoles .....	59
<b>Figure. 44 :</b> Carte de distance du réseau routier .....	60
<b>Figure. 45 :</b> Indice de distance de l'homme IH .....	61
<b>Figure. 46 :</b> Carte d'indice des pentes .....	62
<b>Figure. 47 :</b> Carte d'indice des expositions .....	63
<b>Figure. 48 :</b> Carte d'indice topo morphologie .....	64
<b>Figure. 49 :</b> Carte de risque aux incendies de forêts .....	67
<b>Figure. 50 :</b> Pourcentage des classes de risque.....	68
<b>Figure. 51 :</b> Carte de répartition des incendies dans les années 2000-2021(EFFIS, 2022). .....	69
<b>Figure. 52 :</b> Organigramme méthodologique .....	73
<b>Figure. 53 :</b> Carte des précipitations moyennes annuelles .....	74
<b>Figure. 54 :</b> Carte d'indice d'érosivité potentielle des précipitations R.....	75
<b>Figure. 55 :</b> Carte des différents types de sol selon les propriétés physiques (HWSD, 2022) .....	76
<b>Figure. 56 :</b> Carte du facteur K de la zone d'étude.....	77
<b>Figure. 57 :</b> Carte des altitudes, du fill et du sens d'écoulement .....	79
<b>Figure. 58 :</b> Carte de l'accumulation des flux .....	80

<b>Figure. 59 :</b> Carte des pentes .....	80
<b>Figure. 60 :</b> Carte du facteur LS .....	81
<b>Figure. 61 :</b> Carte de l'NDVI et le facteur C 2021 .....	82
<b>Figure. 62 :</b> Carte de pratique agricole et de conservation du sol (P) .....	83
<b>Figure. 63 :</b> Carte de risque d'érosion de la zone d'étude 2021 .....	85
<b>Figure. 64 :</b> Organigramme méthodologique .....	89
<b>Figure. 65 :</b> Comparaison des températures des trois stations.....	90
<b>Figure. 66 :</b> Comparaison des précipitations des trois stations .....	90
<b>Figure. 67 :</b> Tendence du nombre de mois secs.....	91
<b>Figure. 68 :</b> Précipitation moyenne des mois de l'activité végétale (station Ain Skhouna) .....	92
<b>Figure. 69 :</b> Précipitation moyenne des mois de l'activité végétale (station Ain Touta) ....	92
<b>Figure. 70 :</b> Précipitation moyenne des mois de l'activité végétale (station Barika).....	92
<b>Figure. 71 :</b> Evolution de l'indice de végétation par différence normalisée de la cédraie du Belezma, août 1985-2001-2021 .....	94
<b>Figure. 72 :</b> Série chronologique de NDVI 2000-2021 MODIS pour la zone d'étude. ....	95
<b>Figure. 73 :</b> Evolution de l'indice de l'humidité par différence normalisée de la cédraie du Belezma, août 1985-2001-2021 .....	97
<b>Figure. 74 :</b> Série chronologique de NDMI 1985-2021 de la cédraie du Belezma .....	98
<b>Figure. 75 :</b> dNDMI 1996-2005 de la zone d'étude .....	100
<b>Figure. 76 :</b> dNDMI 1996-2005 de la cédraie du Belezma .....	101
<b>Figure. 77 :</b> La cédraie dépérie du Bordjem, Belezma 2022 .....	101
<b>Figure. 78 :</b> Carte de localisation de la zone d'étude dans la wilaya de Batna .....	105
<b>Figure. 79 :</b> Carte des étages bioclimatiques de la région des Aurès et de Belezma.....	107
<b>Figure. 80 :</b> Carte lithologique de la région des Aurès et de Belezma .....	108
<b>Figure. 81 :</b> Station 2.1 d' <i>Androrchis olbiensis</i> , Tizi Nselli, Belezma 21/04/2020 .....	111
<b>Figure. 82 :</b> Station 7.1 de <i>Dactylorhiza maculata subsp. battandieri</i> , entre Djbel Dhraa Aissi et Djbel Saresa, Aurès Nord 07/06/2020 .....	111
<b>Figure. 83 :</b> Station 11.1 de <i>Dactylorhiza elata</i> s.l., Oued Saboun Tafrent, Belezma, 17/06/2021 .....	112
<b>Figure. 84 :</b> <i>Ophrys tenthredinifera subsp. ficalhoana</i> , station 1, Belezma, 03/05/2020...	112
<b>Figure. 85 :</b> <i>Androrchis olbiensis</i> , station 2.1, Belezma, 21/04/2020 .....	112
<b>Figure. 86 :</b> <i>Ophrys battandieri</i> , station 3, Belezma, 03/04/2021 .....	113
<b>Figure. 87 :</b> <i>Ophrys flammeola</i> , station 4, Belezma, 03/04/2021 .....	113

<b>Figure. 88 :</b> <i>Anacamptis morio subsp. longicornu</i> , station 5, Belezma, 17/04/2020 .....	113
<b>Figure. 89 :</b> <i>Anacamptis papilionacea subsp. expansa</i> , station 6.1, Belezma, 18/04/2016 .....	113
<b>Figure. 90 :</b> <i>Dactylorhiza maculata subsp. battandieri</i> , station 7.1, Aurès Nord, 21/05/2020 .....	114
<b>Figure. 91 :</b> <i>Anacamptis pyramidalis</i> , station 8, Belezma, 05/06/2020.....	114
<b>Figure. 92 :</b> <i>Ophrys marmorata</i> , station 9, Belezma, 30/03/2016.....	114
<b>Figure. 93 :</b> <i>Himantoglossum hircinum</i> , station 10, Bouarif, 27/05/2021 .....	114
<b>Figure. 94 :</b> <i>Dactylorhiza elata</i> s.l., station 11.1, Belezma, 17/06/2021 .....	115
<b>Figure. 95 :</b> <i>Dactylorhiza elata</i> s.l., station 11.1, Belezma, 17/06/2021 .....	115
<b>Figure. 96 :</b> <i>Dactylorhiza maculata subsp. battandieri</i> , station 11.1, Belezma, 17/06/2021 .....	115
<b>Figure. 97 :</b> <i>Neotinea lactea subsp. conica</i> , station 12, Belezma, 03/05/2011.....	115
<b>Figure. 98 :</b> <i>Ophrys speculum subsp. speculum</i> , station 13, Belezma, 17/04/2022 .....	116
<b>Figure. 99 :</b> Carte de localisation des orchidées dans la zone d'étude .....	120
<b>Figure. 100 :</b> Nombre total d'individus recensés par espèce.....	120
<b>Figure. 101 :</b> Photo des résidus des plants de <i>Dactylorhiza maculata subsp. battandieri</i> dans la période de floraison à Dhraa Aissi, station 7.1, Aurès Nord, 30/05/2021 .....	125
<b>Figure. 102 :</b> Photo de <i>Ophrys speculum subsp. speculum</i> au milieu d'une décharge sauvage, station 13, Belezma 17/04/2022 .....	126
<b>Figure. 103 :</b> Photo des résidus des plants de <i>Dactylorhiza elata</i> s.l. dans la période de floraison (surpâturage) à Oued Saboun Tafrent, station 11.1, Belezma, 23/06/2022.....	126
<b>Figure. 104 :</b> Photos de la station 11.1 de <i>Dactylorhiza elata</i> s.l. à Oued Saboun Tafrent (avant 17/06/2021 et après 23/06/2022) .....	127

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau. 01 :</b> Evolution de la population par commune 1966-2021 (habitant).....	15
<b>Tableau. 02 :</b> Localisation des stations météorologiques d’Ain S’khouna, d’Ain Touta et de Barika et les durées de données disponibles.....	18
<b>Tableau. 03 :</b> Les températures moyennes mensuelles d’Ain S’khouna, Ain Touta, Barika et de Seltzer .....	19
<b>Tableau. 04 :</b> Les précipitations moyennes mensuelles .....	19
<b>Tableau. 05 :</b> Précipitation moyenne annuelle .....	23
<b>Tableau. 06 :</b> Les valeurs Q2 des stations .....	27
<b>Tableau. 07 :</b> Classification du climat selon l’indice de De Martonne.....	30
<b>Tableau. 08 :</b> Valeurs de l’indice d’aridité annuel de DE MARTONNE pour les stations étudiées .....	30
<b>Tableau. 09 :</b> Caractéristiques des images satellitaires de Landsat.....	34
<b>Tableau. 10 :</b> Superficie de différentes classes d’occupation du sol 1986, 2001 et 2021 en hectare (ha) .....	40
<b>Tableau. 11 :</b> Les classes de biovolume et leurs poids.....	54
<b>Tableau. 12 :</b> Les différentes classes d’occupation du sol, et les formations végétales et leurs notes calorifiques (CEMAGREF, 1990). .....	55
<b>Tableau. 13 :</b> Classification des distances des agglomérations.....	57
<b>Tableau. 14 :</b> Classification des distances des zones agricoles .....	58
<b>Tableau. 15 :</b> Classification des distances des routes et pistes.....	59
<b>Tableau. 16 :</b> Classification de l’indice de distance de l’homme IH.....	60
<b>Tableau. 17 :</b> Classification de l’indice des pentes et des expositions.....	62
<b>Tableau. 18 :</b> Critères de comparaison par paire de l’échelle numérique SAATY .....	65
<b>Tableau. 19 :</b> Matrice pour une comparaison par paire SAATY .....	65
<b>Tableau. 20 :</b> Le poids des critères utilisés .....	65
<b>Tableau. 21 :</b> Superficie et pourcentage des classes du risque.....	66
<b>Tableau. 22 :</b> La superficie des incendies enregistrés dans la zone d’étude entre 2000 et 2021 .....	68
<b>Tableau. 23 :</b> Les propriétés physiques des différents types de sol.....	76
<b>Tableau. 24 :</b> Estimation de l’érodibilité du sol en fonction de la texture du sol et de la présence de matière organique .....	77
<b>Tableau. 25 :</b> Les valeurs de facteur (m) qui dépend de pourcentage de pente .....	78

<b>Tableau. 26 :</b> Classes de NDVI, AKBAR (2019) .....	93
<b>Tableau. 27 :</b> Classes de NDMI, (MALIK <i>et al.</i> 2020) modifié .....	96
<b>Tableau. 28 :</b> Degrés des changements dans la surface foliaire, proposé par USGS (modifié) .....	99
<b>Tableau. 29 :</b> La superficie des changements dans la cédraie en 2005 .....	102
<b>Tableau. 30 :</b> Liste des espèces avec leur présence par station, superficie des stations, floraison et fructification .....	109
<b>Tableau. 31 :</b> Caractéristiques physiques des stations, lieu-dit, versant, lithologie, type de sol, pente, coordonnées GPS, description, étage bioclimatique, exposition à la lumière, matière organique et espèces dominantes.....	117
<b>Tableau. 32 :</b> Liste des taxons d'Orchidées signalés à ce jour dans les massifs de l'Aurès / Belezma / Bouarif et leurs statuts officiels .....	123

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>AHP</b>	Analytic Hierarchy Process/processus de hiérarchie analytique
<b>AS</b>	Secteur de l'Atlas saharien
<b>AS2</b>	Sous-secteur de l'Atlas saharien central
<b>AS3</b>	Sous-secteur de l'Atlas saharien constantinois
<b>ASTER</b>	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
<b>BNEDER</b>	Bureau National d'Études pour le Développement Rural
<b>C1</b>	Secteur du Tell constantinois : Sous-secteur bibano-guelmois
<b>C2</b>	Secteur du Tell constantinois : Sous-secteur belezmo-hodnéen
<b>CBD</b>	Convention sur la diversité biologique
<b>dNBR</b>	Delta Normalized Burn Ratio
<b>dNDMI</b>	Delta Normalized Difference Moisture Index
<b>DPSB</b>	La direction de la programmation et du suivi budgétaires
<b>ENVI</b>	logiciel Environnement pour Visualisation d'Images
<b>ETM+</b>	Capteur Enhanced Thematic Mapper
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organisation.
<b>GDEM</b>	Global Digital Elevation Model
<b>GEE</b>	Google Earth Engine
<b>GIS /SIG</b>	système d'information géographique
<b>GPS</b>	Global Positioning System.
<b>HWSD</b>	Harmonized World Soil Database
<b>IFN</b>	inventaire forestier national
<b>IIASA</b>	l'Institut international d'analyse des systèmes appliqués
<b>INCT</b>	institut national de la cartographie et de la télédétection
<b>IUCN</b>	International Union for Conservation of Nature
<b>J.O.R.A.</b>	Journal officiel de la République algérienne
<b>LC</b>	Préoccupation mineure (LC)
<b>METI</b>	Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan
<b>MJ</b>	Mégajoules
<b>MNT</b>	Model numérique du terrain
<b>MODIS</b>	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>NDMI</b>	Normalized Difference moisture Index.
<b>NDVI</b>	Normalised Difference Vegetation Index
<b>NE</b>	Non évalué

<b>NT</b>	Quasi menacé
<b>OLI</b>	Operational Land Imager.
<b>ONM</b>	Office National de la Météorologie
<b>OSM</b>	Open Street Map
<b>PNUD</b>	Programme des Nations Unies pour le Développement
<b>PPDRI</b>	Projets de Proximité de Développement Rural Intégré.
<b>RGPH</b>	Recensement général de la population et de l'habitat
<b>RUSLE</b>	Revised Universal Soil Loss Equation.
<b>SRTM</b>	Shuttle Radar Topography Mission
<b>TIRS</b>	Thermal Infrared Sensor
<b>TM</b>	Thematic Mapper
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>VIIRS</b>	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
<b>VU</b>	Vulnérable
<b>ZIP</b>	Zone importante pour les plantes

## INTRODUCTION GENERALE

La biodiversité, ou la diversité biologique, joue un rôle crucial dans le maintien des fonctions écosystémiques et la résilience des systèmes naturels, fournissant une vaste gamme de services écosystémiques essentiels à la survie humaine. Elle contribue à la régulation du climat, à la purification de l'air et de l'eau, à la pollinisation des cultures, à la fertilité des sols et à la régulation des maladies, tout en soutenant les fondements économiques, culturels et de bien-être des sociétés humaines (MEA, 2005).

Le territoire algérien est caractérisé par une diversité physiographique, orographique et paysagère renfermant une diversité d'habitats et de processus écologiques avec la présence d'une biodiversité spécifique et génétique présentant de nombreuses spécificités (PNUD & CBD, 2018).

La connaissance des transformations actuelles des surfaces terrestres représente un enjeu important pour l'évaluation des problèmes environnementaux. Dans un pays méditerranéen comme l'Algérie, les formations végétales subissent des changements d'un rythme inquiétant en raison des activités humaines ainsi que des facteurs naturels. Une évolution régressive est observée dans certains écosystèmes forestiers au Nord de l'Algérie : on note par exemple les dépérissements des cédraies du Belezma et de l'Aurès qui connaissent un déclin majeur de leur superficie d'origine (MEDDOUR, 2012).

Les études sur les changements et l'évolution des surfaces terrestres revêtent une grande importance, car elles fournissent des informations sur les tendances actuelles des processus de déforestation, de dégradation, de désertification et de perte de biodiversité (LAMBIN *et al.*, 2001).

On a choisi comme zone d'étude le massif de Belezma, pour sa position géographique, sa composition écosystémique fragile, son importance historique et pour son exposition aux changements anthropiques et naturels qui se sont accélérés dans les dernières décennies. Faire face à ces changements, constitue un grand défi pour l'homme lui-même pour préserver les composants de ces écosystèmes.

Le choix du massif de Belezma comme terrain de recherche type se justifie à plus d'un point :  
- L'agrandissement de la ville de Batna, qui est passée d'une petite communauté de quelques centaines d'habitants à une métropole abritant plusieurs centaines de milliers de personnes 361.544 habitants selon DPSB (2021). Alors la population a dépassé un million au niveau de la

wilaya de Batna, signifiant une croissance très significative. Cependant, cette expansion n'a pas été sans conséquences, car elle a entraîné des changements profonds dans tous les domaines sociaux, économiques, agricoles et enfin l'épuisement des ressources naturelles environnantes.

- La position géographique de cette zone près du désert dans l'Atlas saharien ; exposée aux différents impacts climatiques et anthropiques.

- La présence d'un parc national au milieu de la zone d'étude qui est considéré comme une zone importante pour les plantes ZIP (hot spot).

En réalité, le massif de Belezma a été soumis à une variabilité climatique très apparente, d'autant plus qu'il est entouré de terres agricoles et de plusieurs agglomérations urbaines (villes, carrières, routes), ce qui provoque une dégradation continue des écosystèmes tels que le dépérissement massif de la cédraie et de la diminution de la fertilité des sols (érosion hydrique), ce qui risque une perte irréversible de la biodiversité.

Ce travail de recherche s'intéresse aux risques qui menacent la biodiversité au niveau du massif de Belezma et la mise au point d'un modèle d'évaluation des risques pour la biodiversité basé sur l'intégration des techniques de télédétection et de SIG.

L'objectif principal de cette étude est de faire un diagnostic sur l'état actuel de la biodiversité et d'analyser les risques anthropiques et naturels à deux niveaux : niveau écosystémique tel que l'écosystème forestier et niveau spécifique des espèces tel que les orchidées par l'utilisation des techniques de la cartographie numérique.

Les objectifs spécifiques de ce travail sont :

- La réalisation et l'analyse des cartes d'occupation du sol dans un territoire de grande étendue où culminent tous les facteurs climatiques et anthropiques dans une région méditerranéenne, telle que la région de Belezma, afin d'identifier et de comprendre l'évolution et les changements spatiotemporels de treize classes d'occupation du sol et de formations végétales pour une période de 35 ans entre 1986, 2001 et 2021.

- La modélisation de vulnérabilité aux incendies de forêt, en intégration de plusieurs paramètres biotiques et abiotiques.

- La modélisation du risque d'érosion hydrique par le modèle RUSLE tenant compte des données existantes. La méthodologie adoptée doit aboutir, à travers la construction d'une base de données numérique dans un SIG, à la cartographie rapide et à moindre coût du risque érosif à l'échelle de notre zone d'étude.

- L'analyse de l'évolution des données climatiques de trois séries de données (ONM ; Batna, Barika et Ain Touta) et l'analyse spatio-temporelle des données satellitaires de trois indices :

NDVI, NDMI, dNDMI, afin de détecter la période la plus sèche et la période de déclenchement du dépérissement massif de la cédraie de Belezma, et de quantifier les pertes réelles du couvert forestier.

- La réalisation d'un inventaire des orchidées de la zone de Belezma et de la partie centro-occidentale des Aurès dans la wilaya de Batna, complétant ainsi les données existantes de l'Aurès oriental (BEGHAMI *et al.*, 2015) avec un bilan cartographique pour chaque espèce et un bilan de population par station ; connaître leur écologie (phénologie par espèce et habitats naturels abritant ces plantes), valoriser la diversité de cette zone biogéographique méditerranéenne et mettre en évidence les enjeux de conservation et les menaces des espèces recensées.

- En fin, le développement d'un modèle SIG en vue d'un suivi continu des risques de la biodiversité dans la région de Belezma à travers l'établissement d'une base de données structurée de façon à répondre aux besoins de la gestion durable de ces écosystèmes.

La méthodologie adoptée est basée sur l'application des techniques de la géomatique, doit permettre de connaître et d'effectuer une analyse des changements intervenus au cours d'un intervalle de temps donné, la quantification des pertes en ressources naturelles et la recherche des éléments de causalité, en vue de lutter efficacement contre la régression de la biodiversité. Le traitement de ces données par des chaînes de traitement appropriées permet l'extraction de plusieurs paramètres biophysiques utiles pour des applications thématiques, tels que les indices de végétation qui présentent une grande efficacité dans la caractérisation et le suivi réguliers des peuplements forestiers. La modélisation permettra de suivre les interactions difficilement extractibles vers un outil d'aide à la décision fiable.

Pour traiter les différentes questions de cette thèse, nous avons scindé le présent travail en six chapitres qui traitent respectivement :

- Le premier chapitre, relatif à la localisation de la zone d'étude et à ses différentes caractéristiques physique, socioéconomique et climatique.
- Le deuxième chapitre, traite le suivi cartographique de l'état des changements de l'occupation du sol dans la zone d'étude.
- Le troisième chapitre, présente la cartographie et la modélisation du risque des incendies dans le massif de Belezma.
- Le quatrième chapitre, présente la modélisation du risque d'érosion hydrique dans la zone d'étude.

- Le cinquième chapitre est consacré à l'exploitation des données climatiques et de la télédétection pour la surveillance du déclin du cèdre dans le massif forestier.
- Le sixième chapitre, traite des connaissances sur les orchidées, en particulier, et de la biodiversité de cette région en général, et d'attirer l'attention sur ces espèces floristiques rares et menacées.

Nous terminons ce travail avec une conclusion générale qui récapitule les axes généraux de cette étude, les résultats principaux et les perspectives.

**CHAPITRE I :**  
**MILIEU PHYSIQUE ET CONTEXTE CLIMATIQUE**  
**DE LA ZONE D'ETUDE**

## Introduction

Notre recherche est réalisée autour du massif de Belezma qui est situé dans la partie orientale de l'Algérie du Nord, il se trouve à l'extrémité Ouest des monts des Aurès, il est bordé au Nord et au Nord Est par un complexe de zones humides de Batna et d'Oum El Bouaghi qui chevauche les plaines de Belezma, d'Ain Djasser, de Zana et d'Ain Yagout, à l'Ouest par les monts et le chott d'El Hodna, aux Sud par le chef-lieu de la wilaya de Batna qui se prolonge par une dépression qui se termine par la porte du désert d'El Kantara.

Dans ce chapitre, et après la localisation de la zone d'étude, on présentera les éléments du milieu physique explorant ses caractéristiques géologiques, pédologiques, hydrographiques, végétales, socioéconomiques et climatiques.

### 1.1. Milieu physique et état socioéconomique

#### 1.1.1. Aspect géographique et administratif

La zone d'étude dont le massif du Belezma est située approximativement dans les fourchettes de coordonnées suivantes :

Longitude : entre 5° 09' 25,69" Est et 6° 25' 58,12" Est ;

Latitude : entre 35° 6' 52,17" Nord et 36° 1' 57,82" Nord, WGS 84.

X : entre 711.503 et 806.540 mètres ;

Y : entre 3.895.870 et 3.978.962 mètres, WGS 84 UTM 31N.

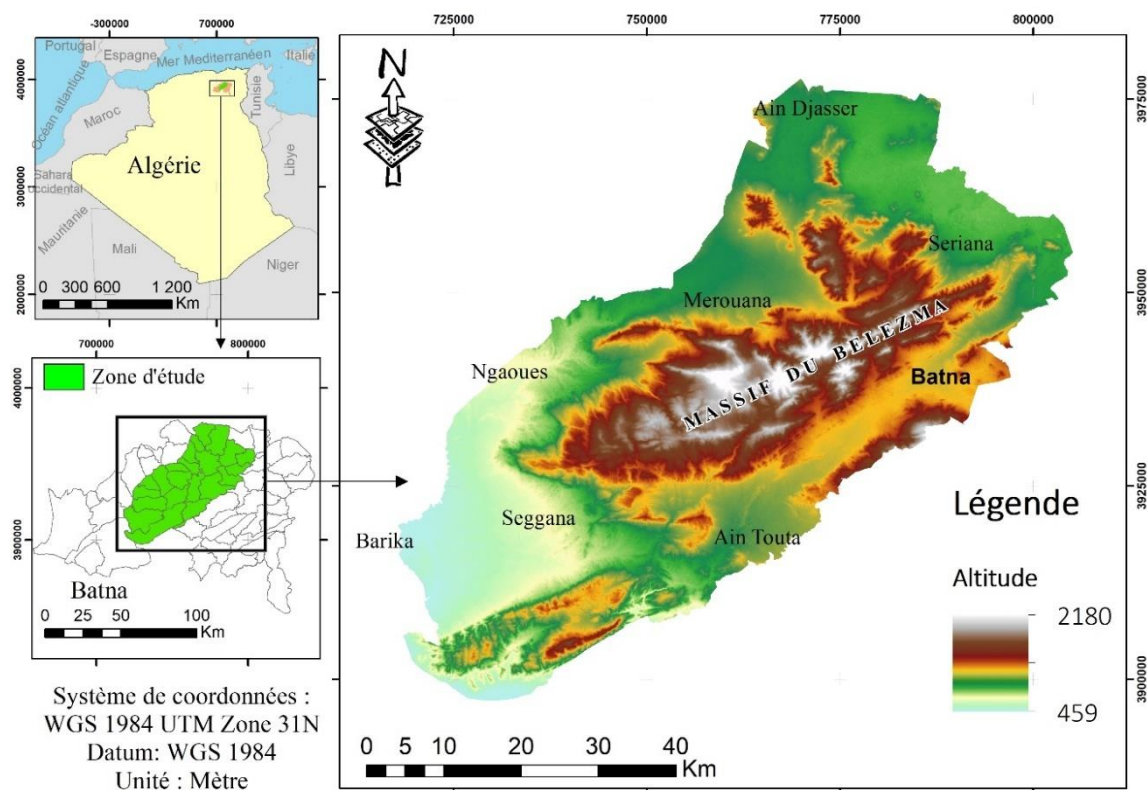


Figure. 01 : Carte de situation géographique (carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).

En se basant sur plusieurs études qui ont été réalisées partiellement dans le massif de Belezma, en prenant compte les 22 communes, et l'ensemble des agglomérations et les périmètres agricoles autour de ce massif, elle occupe la zone centrale de la wilaya de Batna sur une superficie de 340.000 ha.

### 1.1.2. Les principales zones homogènes

La zone d'étude se divise en douze principales zones homogènes selon BNEDER, IFN (2008), chacune contribuant de manière significative à la diversité géographique et écologique de la région. Ces zones, présentées par ordre d'importance, offrent un aperçu détaillé de la topographie et des caractéristiques environnementales de la zone d'étude (Figure. 02).

Cette division en zones homogènes permet une meilleure compréhension des caractéristiques géographiques, écologiques et environnementales de la zone d'étude, soulignant l'importance de la préservation de cette diversité face aux défis environnementaux et aux pressions anthropiques croissantes.

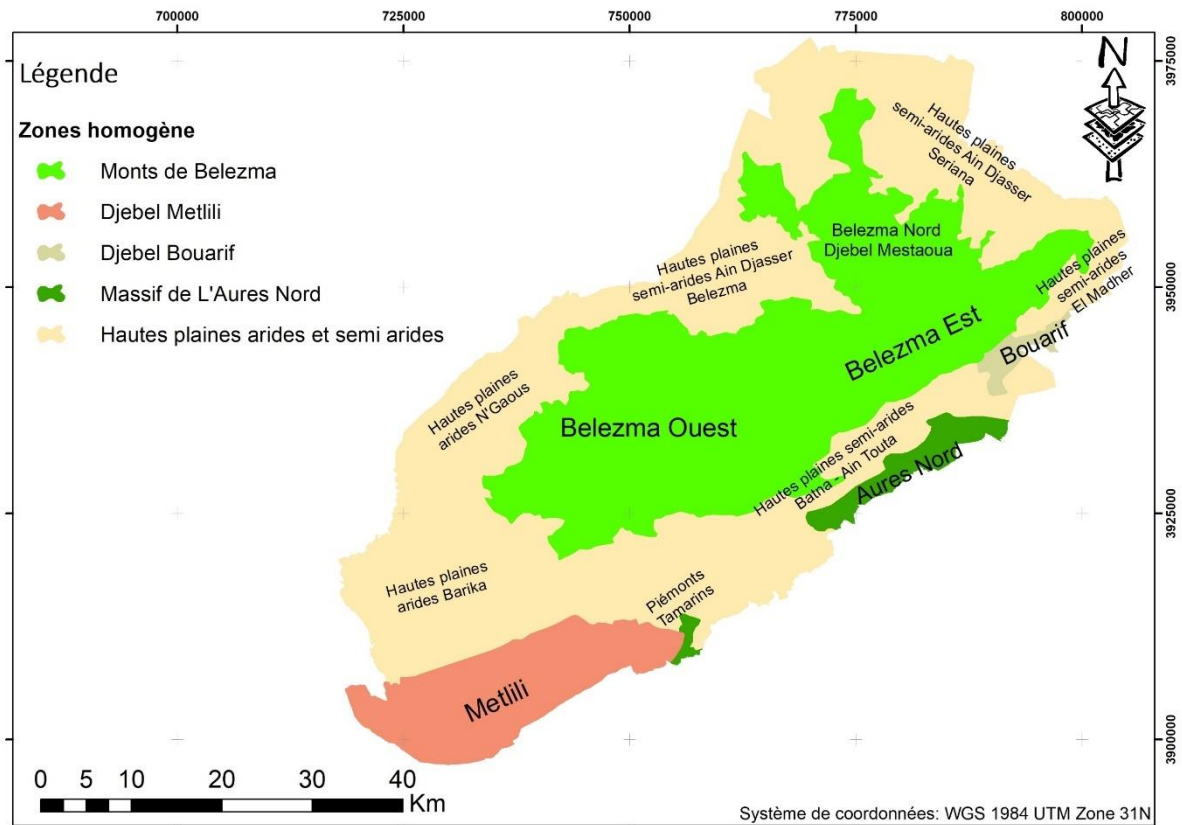
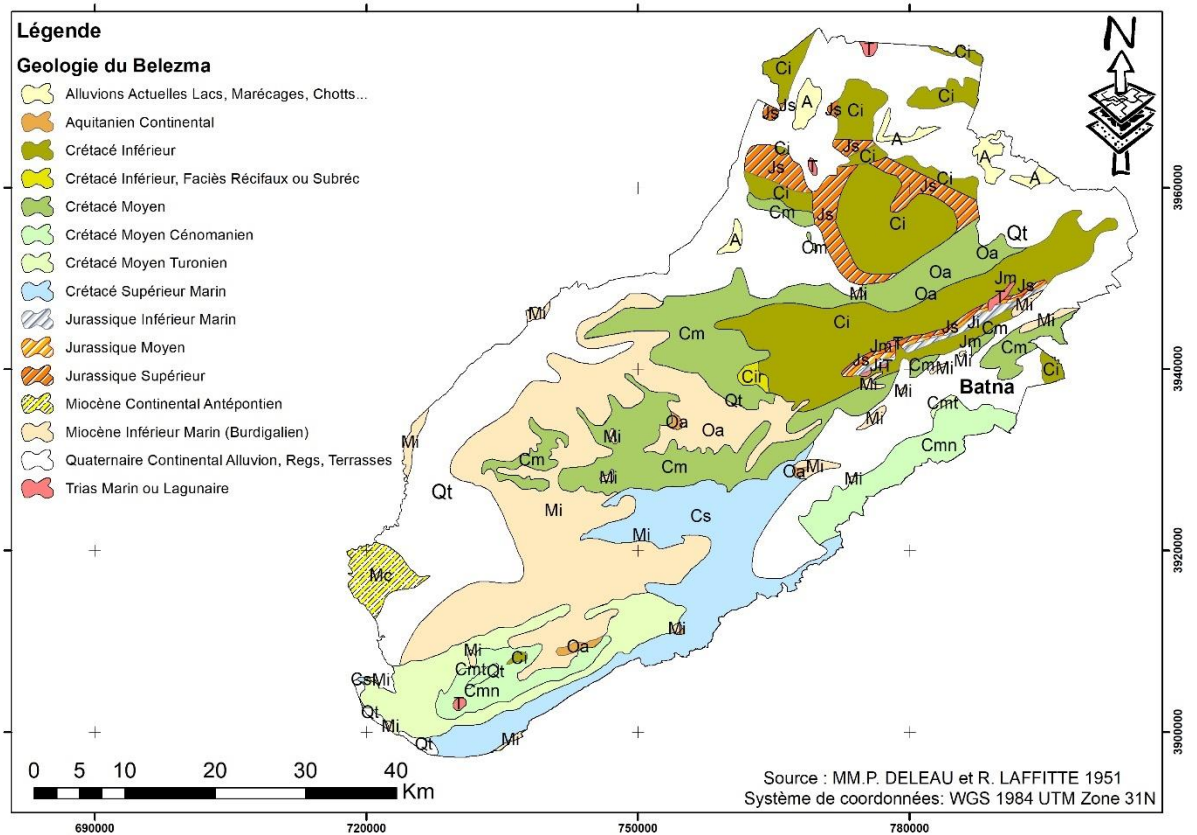


Figure. 02 : Carte des principales zones homogènes (BNEDER, IFN, 2008).

### 1.1.3. Les structures géologiques

Les terrains de la région de Belezma sont de formation géologique secondaire appartenant au Triasique, Jurassique et Crétacé (LAFFITTE, 1939 ; ABDESSEMED, 1981).



**Figure. 03 :** Carte géologique (Source : MM.P. DELEAU et R. LAFFITTE, 1951),  
(Carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).

La zone d'étude par les formations qui affleurent, présente une diversité importante de formations géologiques qui s'étendent du tertiaire inférieur au quaternaire récent, témoignant ainsi d'une grande variété de faciès et de structures géologiques. (Figure. 03).

### 1.1.4. Cadre édaphique

D'après ABDESSEMED (1981), les sols du territoire du massif du Belezma sont caractérisés par leur jeunesse relative. Les sols typiques de Belezma sont :

- Sols bruns calcaires ;
- Sols bruns faiblement calcaires ;
- Rendzines.

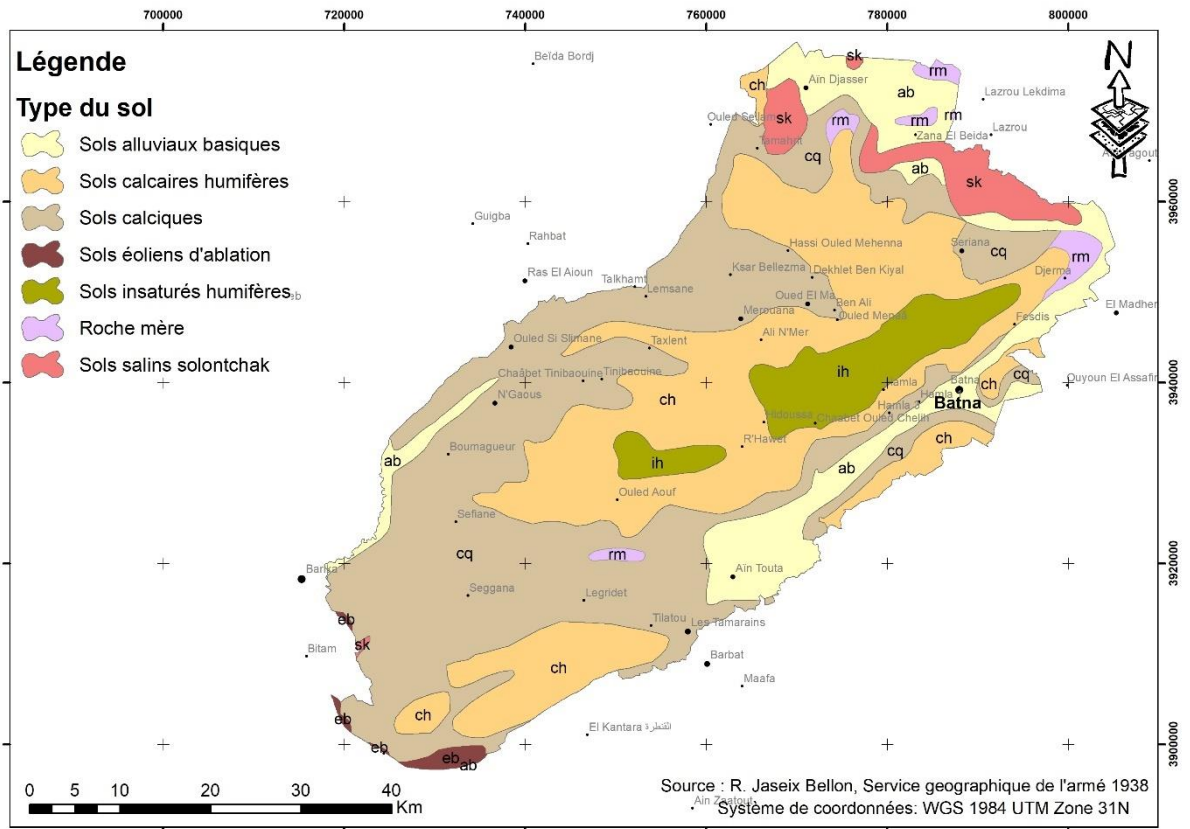


Figure. 04 : Carte des types de sol de la zone d'étude, R. JASEIX BELLON 1938.

(Carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).

### 1.1.5. Hydrologie

En raison de ses caractéristiques géologiques et hydrogéologiques, la zone d'étude possède d'importantes ressources utilisables en eaux souterraines ou de surface.

#### 1.1.5.1. Les eaux superficielles

Le territoire de la zone d'étude est caractérisé par l'existence de trois grands bassins versants, définis par le BNEDER, IFN (2008).

- Le bassin des hauts plateaux Constantinois, situé au Nord et au Nord Est.
- Le bassin versant du Hodna situé à l'Ouest.
- Le bassin des Aurès Nord, situé au Sud.

La zone de Belezma est drainée par un réseau hydrographique très dense, offrant une multitude de sites potentiels pour la réalisation de barrages et de retenues collinaires (Figure. 05).



### 1.1.6. La géomorphologie

La zone de Belezma est caractérisée par un relief essentiellement montagneux, marqué par des contrastes topographiques majeurs, avec des sommets très élevés et des fonds de vallées abaissés. Les altitudes de la zone d'étude commencent de 450 mètres jusqu'à 2178 mètres. Les monts de Belezma sont caractérisés par un relief tourmenté avec des vallées très étroites et des pics culminants jusqu'à 2178 m d'altitude (Djebel Réfaa) et 2136 m (Djebel Thichaou). Plus de 50 % de la superficie de cette zone est caractérisée par des pentes fortes supérieures à 25 %. Les versants Nords sont reconnaissables de l'état satisfaisant du couvert végétal. En revanche, sur les versants Sud, la densité du couvert végétal est plus faible, avec l'apparition des signes de dégradation comme l'érosion hydrique.

La topographie du massif du Belezma est globalement orientée Nord/Sud avec un relief très accidenté et des pentes supérieures à 25 %. Ce sont des barres rocheuses et des falaises sur les deux versants. Formée de deux (02) principales lignes de crête de 70 Km de longueur, ces chaînons de montagne culminent au centre de la zone d'étude (Figure. 06) (ABDESSEMED, 1981), au Nord-Est Djebel Mestaoua, au Sud-Ouest Djebel Metlili et au Sud Djebel Bouarif et le massif des Aurès.

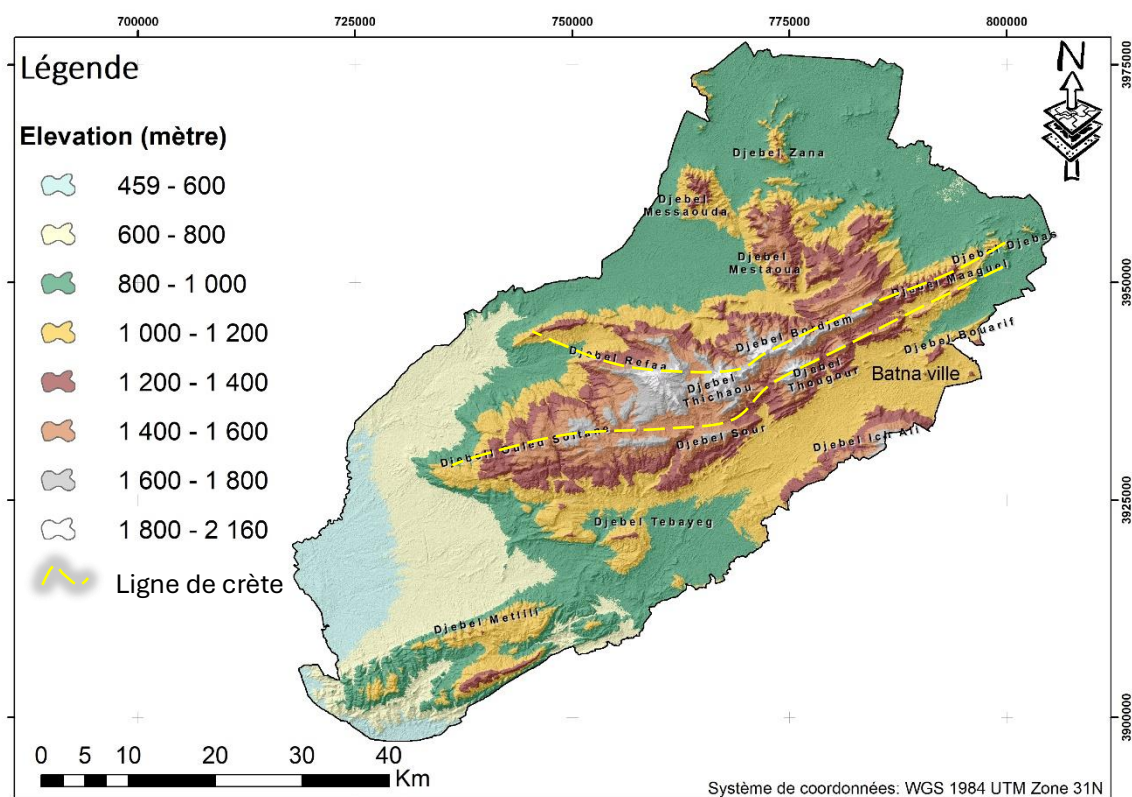


Figure. 06 : Carte des altitudes (carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).

### 1.1.7. La biodiversité écosystémique

Par ses spécificités climatiques et biotiques, la biodiversité que présente cette zone revêt une importance écologique particulière, caractérisée par une grande diversité des écosystèmes (agricoles, forestiers, steppiques, présahariens et zones humides ... etc).

Cela est largement dû à un relief varié et contrasté, favorisant un taux élevé d'endémisme en faune et flore. Aussi, la présence d'un parc national au centre de cette zone montre l'importance de cette zone en termes de biodiversité.

#### 1.1.7.1. La biodiversité végétale

Le parc national de Belezma abrite 650 espèces végétales en association avec les peuplements forestiers et les pelouses d'altitude (pseudo-alpine). Ces espèces peuvent se trouver également dans les zones rocheuses, les oueds et les grottes. Au piémont des montagnes, c'est l'agriculture qui s'installe sur les meilleurs terrains (SMAIHI *et al.*, 2017).

Les principales essences forestières selon BNEDER, IFN (2008) sont :

Le cèdre (*Cedrus atlantica M.*) occupe une place centrale dans le patrimoine forestier de cette zone. Il est soit pur, soit en mélange avec d'autres essences telles que le chêne vert comme deuxième espèce dominante, le frêne, le grand houx, l'érable et le pin d'Alep. Il est localisé au niveau des sommets du massif de Belezma.



**Figure. 07** : Cédraie du Belezma (Bordjem), photo prise par AIT MEDJBER R. 2021.

Le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) est l'essence forestière la plus répandue dans les piémonts des montagnes de la zone d'étude. Il est soit pur dans les reboisements, soit en mélange avec d'autres essences telles que le chêne vert, le genévrier oxycèdre, le genévrier de Phénicie et le cèdre.



**Figure. 08 :** Pinède du Bouarif, photo prise par AIT MEDJBER R. 2019.

Le chêne vert (*Quercus ilex*) se présente sous forme de matorral avec des densités et des hauteurs variées selon les conditions du milieu. C'est une espèce très peu exigeante, qui s'associe facilement avec le pin d'Alep et le cèdre de l'Atlas en sous-étage. Il couvre la grande partie des terres forestières, Il est en mélange avec les espèces du matorral telles que : le genévrier oxycèdre, le genévrier de Phénicie, le frêne, le diss, l'Alfa, dans les stations rocailleuses et pauvres.



**Figure. 09 :** Chênaie du Belezma (Refaâ) Photo prise par AIT MEDJBER R. 2023.

Le genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea*) peu important au niveau de la wilaya de Batna, se trouve à l'état de matorral et se propage dans les stations pauvres et chaudes. On le rencontre souvent dans les massifs ayant subi des dégradations, notamment dans une partie des forêts de Bouarif, de Belezma et de Metlili, il est en mélange avec les espèces du matorral par ordre d'importance telles que : l'alfa, le romarin, l'armoise blanche, le lentisque, la globulaire, le genêt, le chêne vert, le genévrier oxycèdre, le frêne, etc.



**Figure. 10 :** Juniperaie du Belezma (Djerma) Photo prise par AIT MEDJBER R. 2021.

Le genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*) et les frênes (*Fraxinus xanthoxyloides* et *Fraxinus dimorpha*) sont faiblement représentés. Ils se trouvent en mélange avec le cèdre, le chêne vert et les autres espèces du matorral.

La prédominance des matorrals sur les superficies forestières, atteste l'état de la dégradation de la forêt, à la suite des changements climatiques et à la forte pression anthropique (surpâturage, coupes illicites, incendies...etc).

Le reste des terres, c'est le domaine des terrains agricoles, des terrains improductifs et urbains.



**Figure. 11 :** Quelques espèces floristiques du Belezma *Romulea Vaillantii*, *Turgenia latifolia*, *Centaurea sp* et *Erodium guttatum*, photos prises par AIT MEDJBER R.

### 1.1.8. Etat socioéconomique

Le massif du Belezma n'a pas permis l'émergence de grandes communautés comme dans les Aurès. Les habitats y sont dispersés, souvent sous forme de mechtas. Les tentatives de colonisation ont échoué et décliné pendant la guerre de l'indépendance, entraînant un déplacement de la population vers les piémonts. Aujourd'hui, l'essentiel de la population vit autour du massif, dans des localités issues de villages de colonisation ou développées spontanément. Batna, Ain Touta, Merouana, Ain Djasser et N'gaous jouent un rôle clé dans le dynamisme de cette région (COTE, 1991).

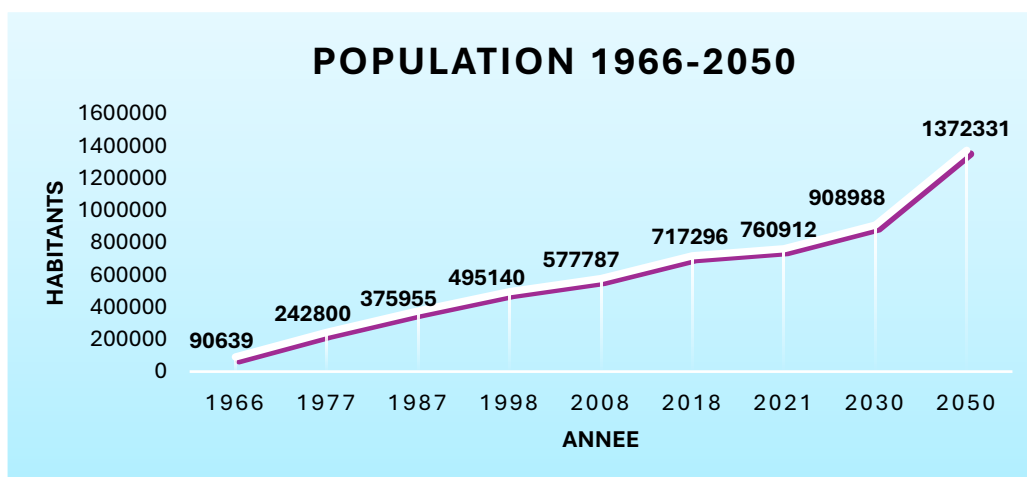


Figure. 12 : L'évolution de la population dans la zone d'étude (DPSB, 2021).

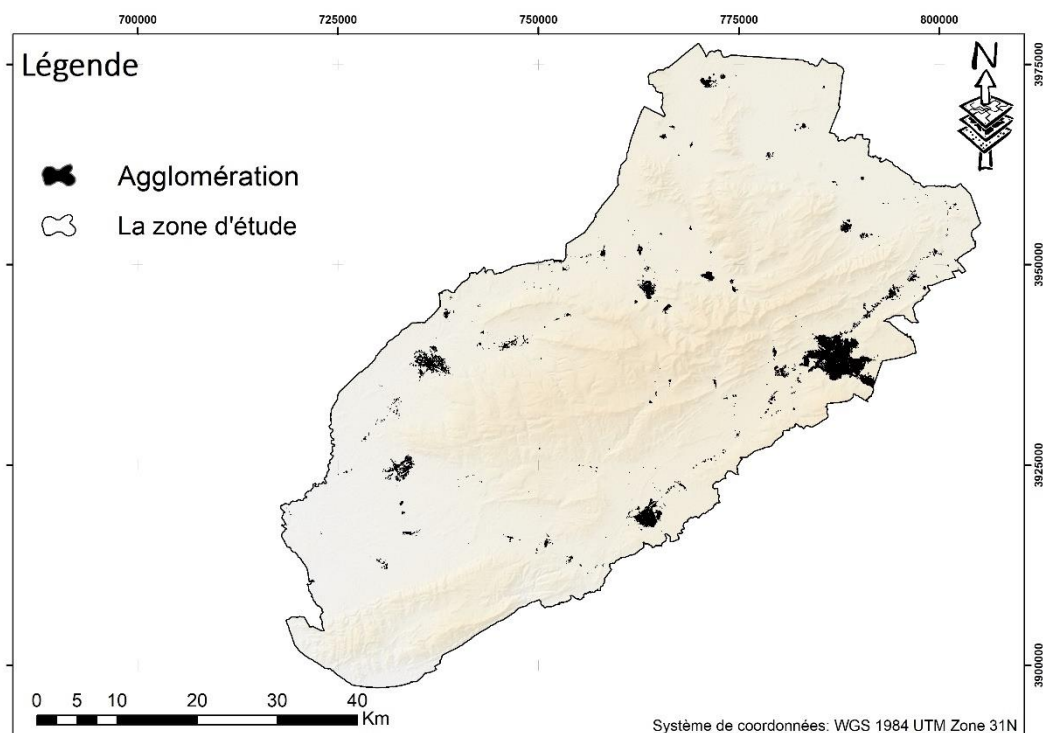
La figure 12 montre que la population vivante dans cette région a connu une explosion démographique et s'est multipliée 8 fois durant 55 ans, de 90.639 habitants en 1966 à 760.912 habitants en 2021 et qu'elle pourrait atteindre 1.372.331 d'habitants en 2050, ce qui exerce une pression continue sur les ressources naturelles.

#### 1.1.8.1. La répartition démographique

La répartition démographique se fait de deux manières :

- Au Nord : la répartition de la population est moins dense avec des centres urbains éloignés les uns des autres tels que Merouana, Ngaoues et Ain Djasser, et des zones rurales moyennement habitées.
- Au Sud : la répartition de la population est dense, où les centres urbains sont bien peuplés tels que le chef-lieu de la wilaya de Batna et Ain Touta, en revanche la zone rurale est moins peuplée.

La zone du Belezma est entourée de 84 agglomérations et villages appartenant au 05 dairates, 22 communes, abritant une population de l'ordre de 760.912 habitants selon DPSB, 2021.



**Figure. 13 :** Carte des zones urbaines dans la zone d'étude 2021, (carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).

La figure 13 présente la répartition de l'urbanisation en 2021. La population de cette région vit à peine sur 2 % du territoire de la zone d'étude.

**Tableau. 01 :** Evolution de la population par commune 1966-2021 (habitant) (DPSB, 2021).

N°	Commune	Population 1966	Population 1977	Population 1987	Population 1998	Population 2008	Population 2021
1	AIN DJASSER	1 339	6 000	9 458	13 232	15 704	20 768
2	ZANA EL BEIDA	/	6 900	7 865	9 265	10 564	13 272
3	EL HASSI	/	5 000	5 579	6 964	7 990	10 240
4	SERIANA	2 238	7 100	9 675	11 714	15 445	19 736
5	KSAR BELEZMA	7 039	5 700	6 672	7 942	9 033	11 144
6	OUED EL MA	4 606	11 000	15 372	16 947	20 288	24 964
7	DJERMA	/	2 300	2 679	3 063	3 436	5 324
8	MEROUANA	6 584	14 500	25 556	34 788	38 658	50 650
9	LEMCEN	/	3 400	3 897	4 572	5 108	6 580
10	OULED SI SLIMANE	/	6 400	8 641	11 406	12 473	15 800
11	FESDIS	/	2 100	3 810	5 811	14 327	12 632
12	BATNA	55 751	108 700	184 069	247 520	290 645	<b>361 544</b>
13	HIDOUSSA	/	2 300	2 435	2 529	2 378	3 140
14	TAXLENT	431	6 100	6 776	7 875	8 605	10 620
15	OUED CHAABA	832	3 600	4 926	5 835	7 236	43 948
16	N'GAOUS	4 887	10 400	18 834	25 731	29 504	33 564
17	OULED AOUF	/	3 500	3 701	1 411	1 724	2 288
18	BOUMAGUER	/	3 500	5 540	7 413	8 474	9 624
19	SEFIANE	/	7 500	9 620	11 939	7 516	18 648
20	AIN TOUTA	6 133	20 400	34 305	52 143	59 906	74 200
21	TILATOU	/	2 800	2 844	2 367	3 004	3 692
22	SEGGANA	799	3 600	3 701	4 673	5 769	8 534
<b>Population Total</b>		<b>90 639</b>	<b>242 800</b>	<b>375 955</b>	<b>495 140</b>	<b>577 787</b>	<b>760 912</b>

Le tableau 01 montre l'augmentation démographique dans la totalité des communes, de 90.639 habitants en 1966 à 760.912 habitants en 2021, sauf la commune de Hidoussa et d'Ouled Aouf qui ont connu une diminution puis une faible augmentation (DPSB, 2021).

#### **1.1.8.2. Réseau routier**

Le réseau routier de la zone d'étude est marqué par le cadre physique de la région : un relief accidenté, des vallées et des lits d'oueds asséchés qui peuvent prendre des formes torrentielles lors d'épisodes pluvieux. En 2021, la zone d'étude comprend 2141,37 km de réseau routier (DPSB, 2021).

#### **1.1.8.3. Les activités économiques (Agriculture)**

La DPSB (2021) décrit l'activité agricole régionale en trois zones distinctes, influençant leur orientation agro-sylvo-pastorale :

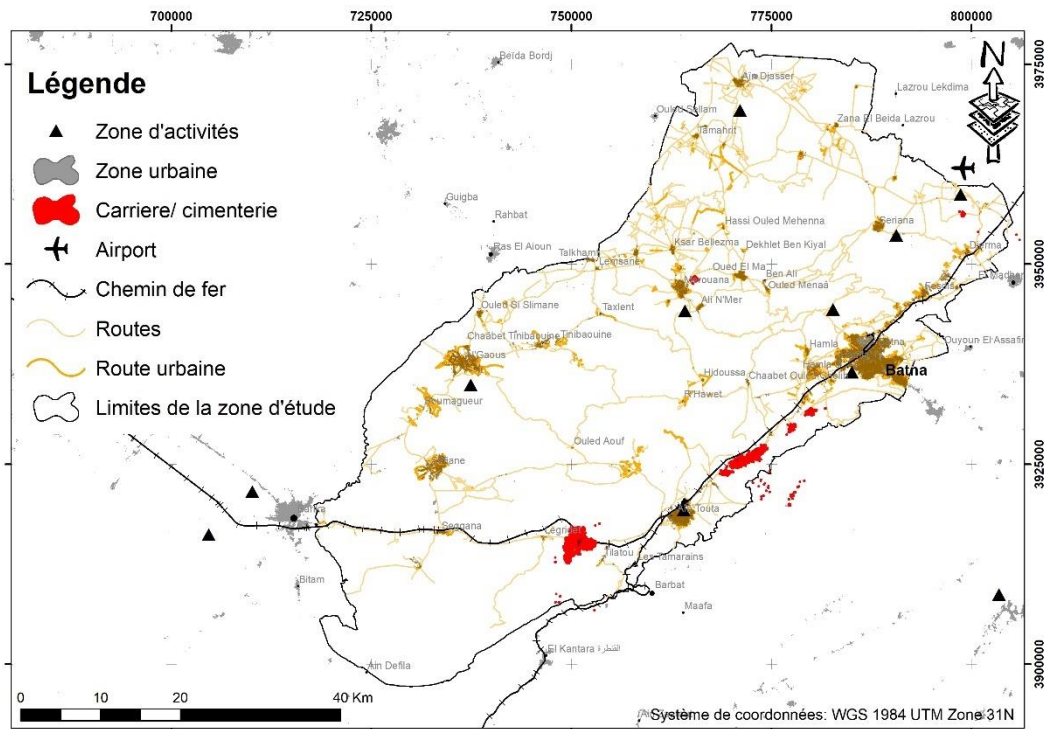
- Les hautes plaines telliennes du Nord pratiquent principalement la céréaliculture, avec un climat semi-aride frais bénéficiant de 300 à 400 mm de précipitations annuelles.
- Les zones montagneuses du Sud-Ouest et du Sud, à agriculture plus incertaine, se distinguent par la sylviculture et l'arboriculture fruitière, notamment l'abricotier, avec des précipitations de 300 à 600 mm.
- La zone steppique occidentale, caractérisée par un élevage et une céréaliculture à faible rendement en raison des faibles précipitations d'environ 200 mm/an, englobe les plaines du Sud-Ouest et du Sud vers le Hodna.

La région compte 129.574 ha de surface agricole utile, dont 29.544 ha irrigués, et se concentre sur l'élevage et une agriculture traditionnelle. La population de ces zones avait comme activité principale l'élevage bovin, ovin et caprin. 549.364 têtes d'ovin, 50.958 têtes de bovin et 117.666 têtes de caprin, 6.628.754 effectifs d'aviculture et 27.000 ruches d'apiculture, avec des prélèvements de produits forestiers comme les plantes médicinales et les glands de chêne vert.

#### **1.1.8.4. Alimentation en énergie, activités économiques et industrialisation**

La wilaya de Batna est une zone clé en Algérie, dotée d'infrastructures énergétiques majeures, incluant des centrales électriques, des postes transformateurs, et un réseau de transport d'énergie électrique étendu, totalisant 1423 km de lignes électriques. Elle bénéficie également d'un approvisionnement en gaz via trois gazoducs principaux et le Gazoduc Rcade Est-Ouest, assurant une couverture énergétique de presque 97 %. Parallèlement, Batna abrite un secteur industriel et minier dynamique, avec six zones industrielles diversifiées et des ressources

minières abondantes avec 30 unités d'extraction des agrégats et du gravier et une cimenterie géante, jouant un rôle crucial dans le développement économique local (Figure. 14).



**Figure. 14 :** Carte des zones d'activités industrielles et minières, (OSM, 2023 modifiée)  
(Carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).

## Conclusion

Du fait de sa localisation à l'Est de l'Algérie, en zone de transition entre l'Atlas tellien et saharien, la région de Belezma présente une particularité de biotopes et de paysages. A travers l'étude du milieu physique, on peut constater que notre zone d'étude se divise potentiellement en deux régions :

- Région montagneuse, au centre de la zone d'étude, d'une altitude qui varie entre 800 et 2200 m, avec un couvert végétal assez dense formé essentiellement de forêts de cèdres de l'Atlas et de pin d'Alep, des matorrals de chêne vert et de genévrier, qui abritent une biodiversité exceptionnelle.
- Région d'activité économique et d'urbanisation, sur des altitudes qui varient entre 450 et 1200 m, formées essentiellement de parcours, couverte par une activité économique et agricole intensive et une urbanisation dense, incluant la ville de Batna.

Aux cours des dernières décennies, cette région a connu un développement et une évolution urbaine très rapides, notamment dans les régions localisées sur la périphérie du massif de Belezma. Cette explosion démographique a augmenté les besoins d'exploitation des différentes ressources naturelles, ce qui a accentué la pression anthropique dans la région.

## 1.2. Données météorologiques et synthèse climatique

### Introduction

Le climat joue un rôle prépondérant dans le développement, la répartition et l'individualisation des êtres vivants (RAMADE, 1984). Trois facteurs principaux : l'eau, la température et la lumière déterminent la répartition des végétaux à la surface du globe. Le couvert végétal atteint son plein développement lorsque ces trois conditions d'eau, de température et d'éclairement sont suffisamment bien remplies. En revanche, lorsque l'un ou l'autre de ces éléments est inférieur à un certain niveau, la vie s'amenuise ou disparaît. Selon QUEZEL (1974), la connaissance précise de la bioclimatologie permet seule de comprendre la répartition et les rapports respectifs des divers types de forêts méditerranéennes.

### 1.2.1. Données météorologiques

L'absence de stations météorologiques au sein du massif ne permet pas d'avoir des données qui peuvent être prises en considération pour une synthèse climatique. Devant cette défaillance et en raison de l'étendue de notre zone d'étude, nous utilisons des variables climatiques recueillies auprès de trois stations, situées à diverses altitudes et versants autour du massif de Belezma, présenté dans le tableau 02, où notre travail se concentre au milieu de ces stations à savoir les stations météorologiques : d'Ain S'khouna, d'Ain Touta et celle de Barika. Nous avons utilisé des données disponibles des 30 dernières années ce qui permet de faire une synthèse climatique représentative de cette zone. Pour mieux refléter les conditions météorologiques de la zone d'étude, les valeurs des précipitations et des températures seront extrapolées.

**Tableau. 02** : Localisation des stations météorologiques d'Ain S'khouna, d'Ain Touta et de Barika et les durées de données disponibles (ONM, 2018).

Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Versant	Données disponibles
Ain S'khouna	35°45'21,90"N	6°18'28,44"E	821	N-E	1989-2017
Ain Touta (Ras El Ma)	35°24'47,70"N	5°56'39,70"E	966	S	1990-2017
Barika	35°20'52,20"N	5°20'22,80"E	460	S-O	1989-2016

#### 1.2.1.1. Température

Les températures moyennes et les valeurs minimales et maximales de la zone d'étude sont récapitulées dans le tableau 03.

**Tableau. 03 :** Les températures moyennes mensuelles d'Ain S'khouna, Ain Touta, Barika et de SELTZER.

Station	Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Moyenne Annuelle
Ain S'khouna 1989- 2017	T (°C)	5,69	6,82	10,02	13,16	18,18	23,33	26,69	26,14	21,62	16,89	10,77	6,77	<b>15,51</b>
	Tm (°C)	0,07	0,51	2,83	5,72	9,80	14,35	17,11	17,17	14,30	10,02	4,67	1,29	
	TM (°C)	12,06	13,51	16,90	20,37	26,14	31,78	35,73	35,03	29,37	24,15	17,27	12,87	
Ain Touta 1990- 2017	T (°C)	5,90	6,61	10,00	14,00	18,33	23,29	27,29	26,45	22,10	16,60	10,74	6,22	<b>15,63</b>
	Tm (°C)	-0,12	0,37	3,11	6,53	10,57	14,72	18,43	17,86	14,53	10,09	4,98	0,65	
	TM (°C)	11,91	12,88	16,92	21,60	26,26	32,06	36,33	35,14	29,76	23,18	16,51	11,82	
Barika 1989- 2016	T (°C)	8,1	9,6	13,4	16,8	22,3	27,7	31,3	30,8	25,5	20,1	13,2	8,9	<b>18,98</b>
	Tm (°C)	2,3	3,3	6,7	9,9	15,2	20,4	23,9	23,6	19,1	13,8	7,4	3,3	
	TM (°C)	14,2	16,0	20,1	23,7	29,3	35,0	38,6	38,0	32,1	26,5	19,1	14,7	
Batna Seltzer 1913 -1937	T (°C)	4,90	6,05	8,50	11,95	15,95	20,95	24,70	24,00	20,35	14,85	9,60	5,90	<b>13,98</b>
Barika Seltzer 1914 -1938	T (°C)	7,95	10,00	13,00	16,70	21,30	26,85	30,95	29,85	25,30	19,05	13,25	8,60	<b>18,57</b>

Source : ONM (2018) et SELTZER (1946).

L'analyse au préalable des données thermiques des trois stations (Ain S'khouna, Ain Touta et Barika) montre l'existence d'un hiver froid très vigoureux comportant une moyenne des minimas du mois le plus froid de 0,07, -0,12 et 2,3 °C en janvier et un été chaud durant la saison estivale avec une moyenne des maxima du mois le plus chaud de 35,73, 36,33 et 38,6 °C en juillet.

La comparaison des températures moyennes entre les données SELTZER (1946) et les données ONM (2018) actuelles montrent une augmentation significative de 1,5 °C pour la station de Batna et une augmentation légère pour celle de Barika.

### 1.2.1.2. Précipitations (pluviométrie)

Les pluies constituent une forme de précipitation, elles agissent selon leur intensité sur la répartition et sur le développement de la végétation.

**Tableau. 04 :** Les précipitations moyennes mensuelles.

Station \ Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	P annuelle (mm)
Ain Skhouna 1989 - 2017	31,76	23,74	31,01	36,34	41,71	18,09	6,69	20,79	33,70	24,24	24,42	28,64	<b>321,13</b>
Ain Touta 1990 - 2017	23,45	14,91	24,14	30,60	23,81	12,41	4,79	9,84	32,47	24,67	21,99	28,18	<b>251,26</b>
Barika 1989 - 2016	21,02	14,66	19,49	26,30	20,89	8,09	4,18	7,20	30,57	21,81	19,55	19,92	<b>213,68</b>
Batna Seltzer 1913 -1937	40,00	30,00	43,00	28,00	39,00	23,00	7,00	20,00	21,00	29,00	36,00	30,00	<b>346</b>
Barika Seltzer 1914 -1938	25,00	24,00	26,00	14,00	21,00	13,00	2,00	3,00	24,00	20,00	30,00	22,00	<b>224</b>

Source : ONM (2018) et SELTZER (1946).

D'après le tableau 04, la station d'Ain Skhouna enregistre des précipitations relativement abondantes au printemps et présentent un maximum au mois de mai avec 41,71 mm de pluie avec un hiver moins pluvieux avec 28,64 mm au mois de décembre. Pour la station d'Ain Touta et de Barika, les précipitations sont relativement abondantes à l'automne et présentent un maximum au mois de septembre avec plus de 30 mm de pluie avec un hiver moins pluvieux. En voit clairement la différence des précipitations entre les trois stations avec une moyenne annuelle de 321,15 mm pour Ain Skhouna, 248,97 mm pour Ain Touta et 212,59 mm pour Barika.

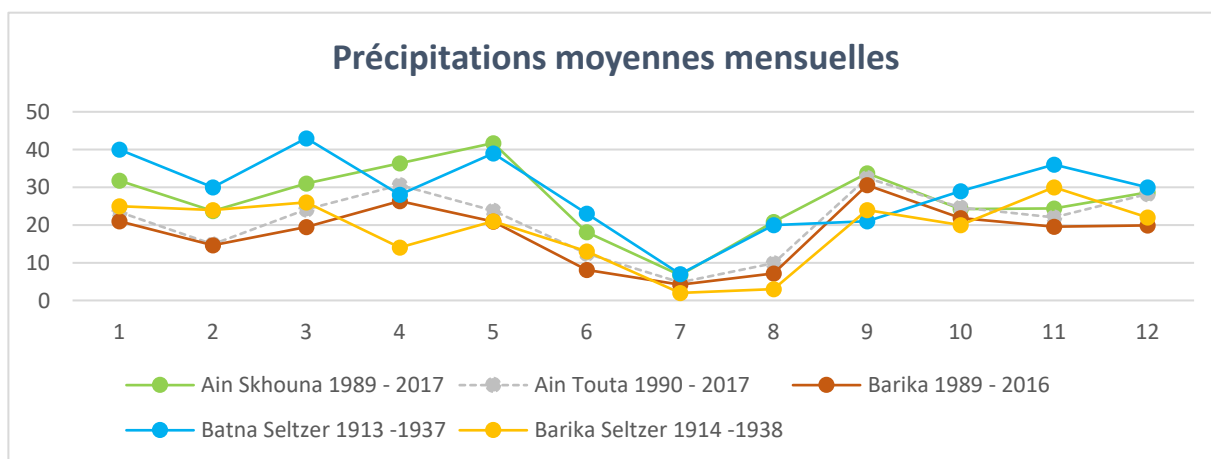


Figure. 15 : Répartition des précipitations moyennes mensuelles.

La comparaison des précipitations annuelles moyennes entre les données SELTZER (1946) et les données ONM (2018) actuelles montre une diminution globale des précipitations annuelles avec une diminution dans la saison humide (hivernale et automnale) et une légère augmentation dans la saison printanière (Figure. 15), ce qui influe sur le cycle de développement de toutes les formations végétales de la zone d'étude.

## 1.2.2. Répartition spatiale des variables climatiques températures et précipitations

### 1.2.2.1. Extrapolations des données

Afin de mieux cerner les caractéristiques bioclimatiques de massif de Belezma, nous avons procédé à des extrapolations virtuelles des données provenant des trois stations de référence (Tableau. 02), pour avoir les différentes extrémités d'altitudes et d'expositions : La station d'Ain Skhouna est la station de référence pour l'exposition Nord, tandis que les stations d'Ain Touta et de Barika sont les stations de référence pour l'exposition Sud.

### 1.2.2.2. Les Températures

Les températures jouent un rôle crucial en tant que facteur limitant, elles contrôlent l'ensemble des phénomènes métaboliques, et conditionnent de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère (RAMADE, 1984).

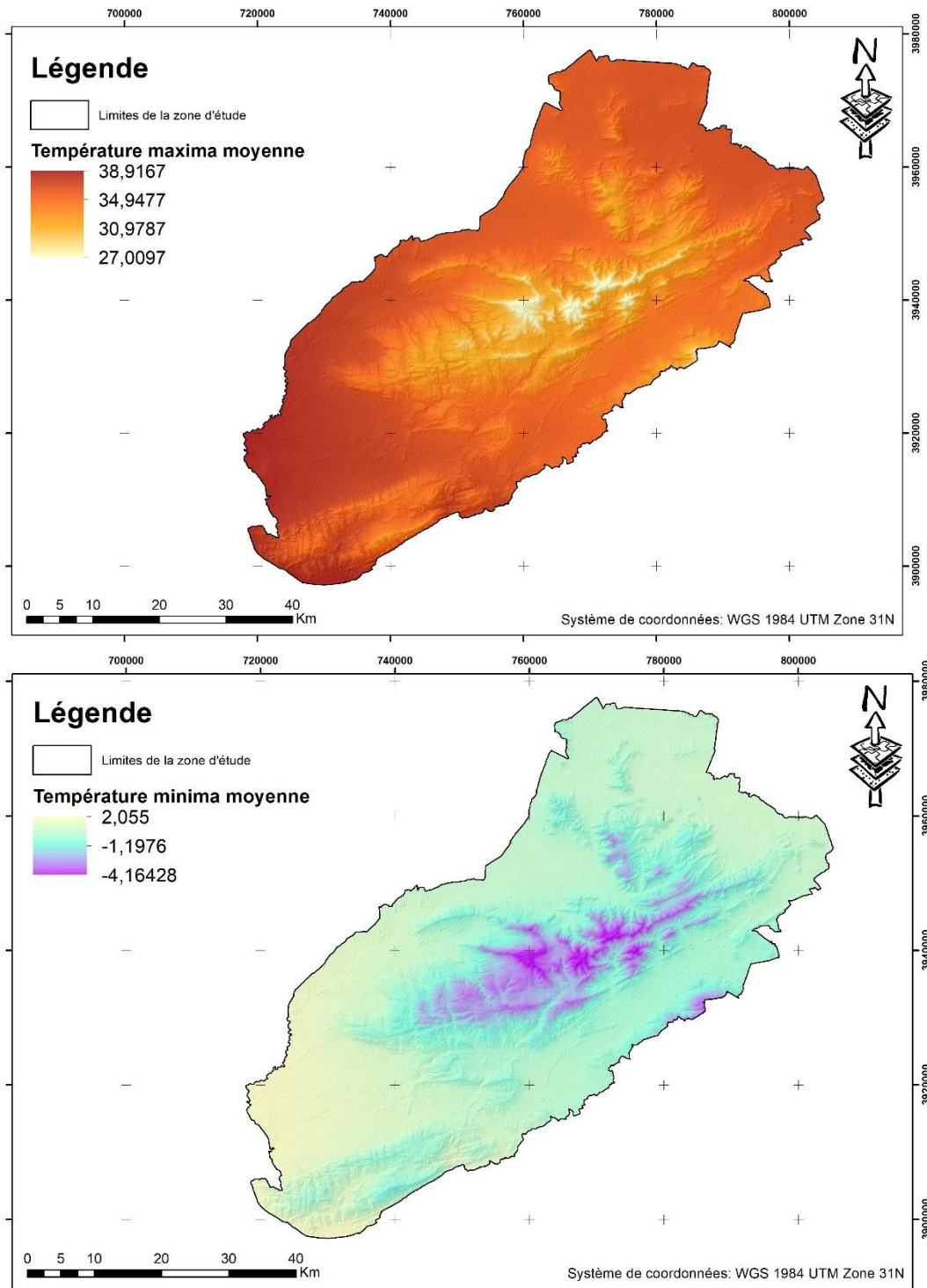


Figure. 16 : Températures maximas et minimas moyennes pour la zone d'étude, (carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).

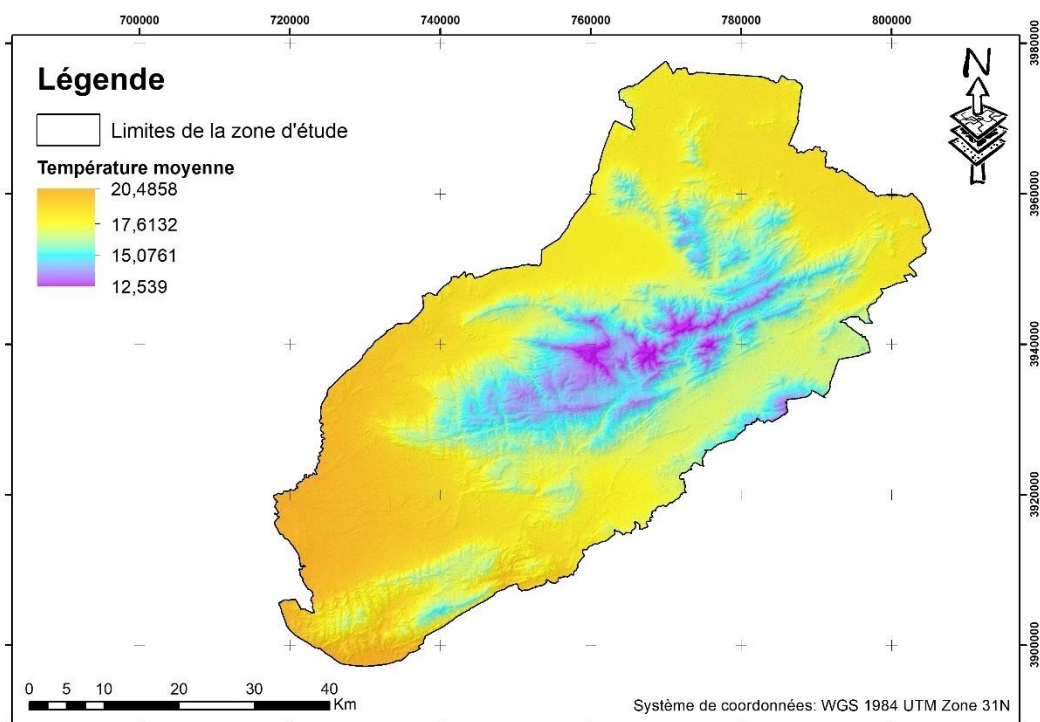
Les données thermométriques caractérisant la zone d'étude durant les périodes entre 1989-2017 sont reportées après extrapolation dans le Tableau 06.

- **Gradient thermique**

C'est le gradient thermique de SELTZER (1946), qu'on a utilisé pour l'extrapolation des données :

- Baisse de  $0,45^{\circ}$  C tous les 100 m d'altitude pour les températures moyennes minimales mensuelles.
- Baisse de  $0,7^{\circ}$  C tous les 100 m d'altitude pour les températures moyennes maximales mensuelles.

On a obtenu les cartes des températures moyennes, minimales et maximales des trois stations calculées par l'outil Raster calculator dans ArcMap, utilisant le gradient thermique de SELTZER (1946), le modèle numérique du terrain, les minimas et les maximas, les altitudes et la localisation géographique des trois stations. Enfin, la moyenne des trois stations pour les minimas et les maximas est calculée et présentée dans la figure 16.



**Figure. 17 :** Température moyenne par extrapolation 1989-2017 (source : ONM, 2018), (carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).

La figure 17 montre la répartition spatiale des températures moyennes par la méthode d'extrapolation des données des trois stations météorologiques, pour la période 1989-2017.

### 1.2.2.3. Les précipitations

La pluviosité moyenne annuelle est la donnée la plus utilisée pour caractériser la quantité de pluie dans un lieu, en effet, la quantité d'eau reçue annuellement est un élément essentiel pour la vie végétale.

#### - Gradient pluviométrique

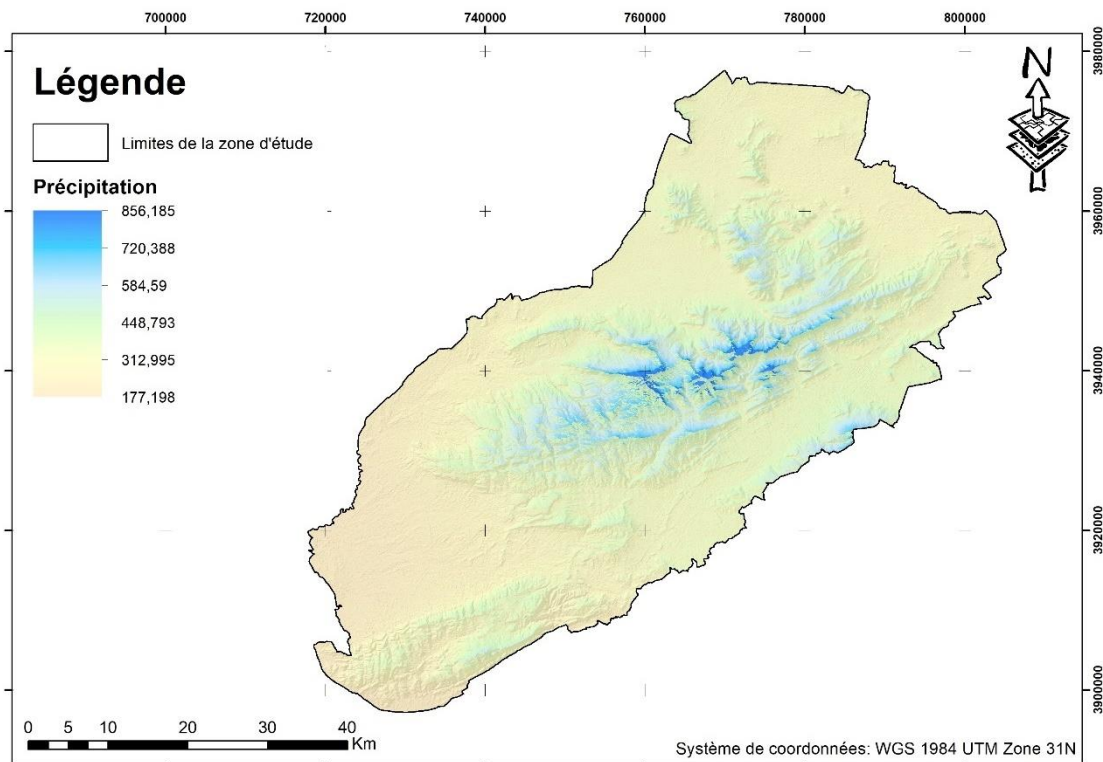
C'est également le gradient pluviométrique de SELTZER (1946) qu'on a pris en considération pour l'extrapolation des données :

- Augmentation de 40 mm pour une élévation de 100 m d'altitude pour le versant à exposition Nord.
- Augmentation de 20 mm pour une élévation de 100 m d'altitude pour le versant à exposition Sud.

**Tableau. 05** : Précipitation moyenne annuelle (ONM, 2018).

Station	Précipitation moyenne annuelle (mm)
P (mm) 1989- 2017 Ain Skhouna	321,13
P (N) 2178 m	<b>863,13</b>
P (mm) 1990- 2017 Ain Touta	251,26
P (S) 2178 m	<b>493,26</b>
P (mm) 1989- 2016 Barika	213,68
P (S) 2178 m	<b>556,88</b>

L'extrapolation des précipitations se fait à partir du modèle numérique de terrain avec l'outil Raster calculator dans ArcGIS. La station d'Ain Skhouna pour le versant Nord et la moyenne des stations d'Ain Touta et de Barika pour le versant Sud. La combinaison des données des deux versants Nord et Sud (tableau 05) avec la carte des expositions permet d'avoir une carte globale des précipitations (Figure. 18).



**Figure. 18 :** Précipitations annuelles moyennes 1989-2017 (Source : ONM, 2018).

Les précipitations présentées dans la figure 18 montrent que les précipitations peuvent atteindre les 850 mm dans les hautes altitudes du versant Nord.

### 1.2.3. Synthèse climatique

Tous les éléments du climat agissent en même temps pour former un milieu climatique.

Pour l'estimation rapide de l'influence des principaux éléments, divers systèmes sont proposés, les plus utilisés en région méditerranéenne sont :

- Le diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN.
- Le climagramme pluviométrique d'EMBERGER.

Ces deux systèmes résument le bioclimat d'une station donnée par trois éléments fondamentaux : les précipitations (mm), les températures maximales et minimales (°C).

#### 1.2.3.1. Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN

Le diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN permet de déterminer les périodes sèches et humides de n'importe quelle région à partir de l'exploitation des données des précipitations mensuelles et des températures moyennes mensuelles.

BAGNOULS et GAUSSEN (1953) considèrent qu'un mois est sec quand le total de précipitations exprimées en mm est égal ou inférieur au double de la température exprimée en degrés Celsius ( $P \leq 2 T$ ).

Pour localiser les périodes humides et sèches des trois stations, nous avons tracé le diagramme ombrothermique pour la période 1989-2017 en utilisant les données thermométriques et pluviométriques disponibles (Figure. 19).

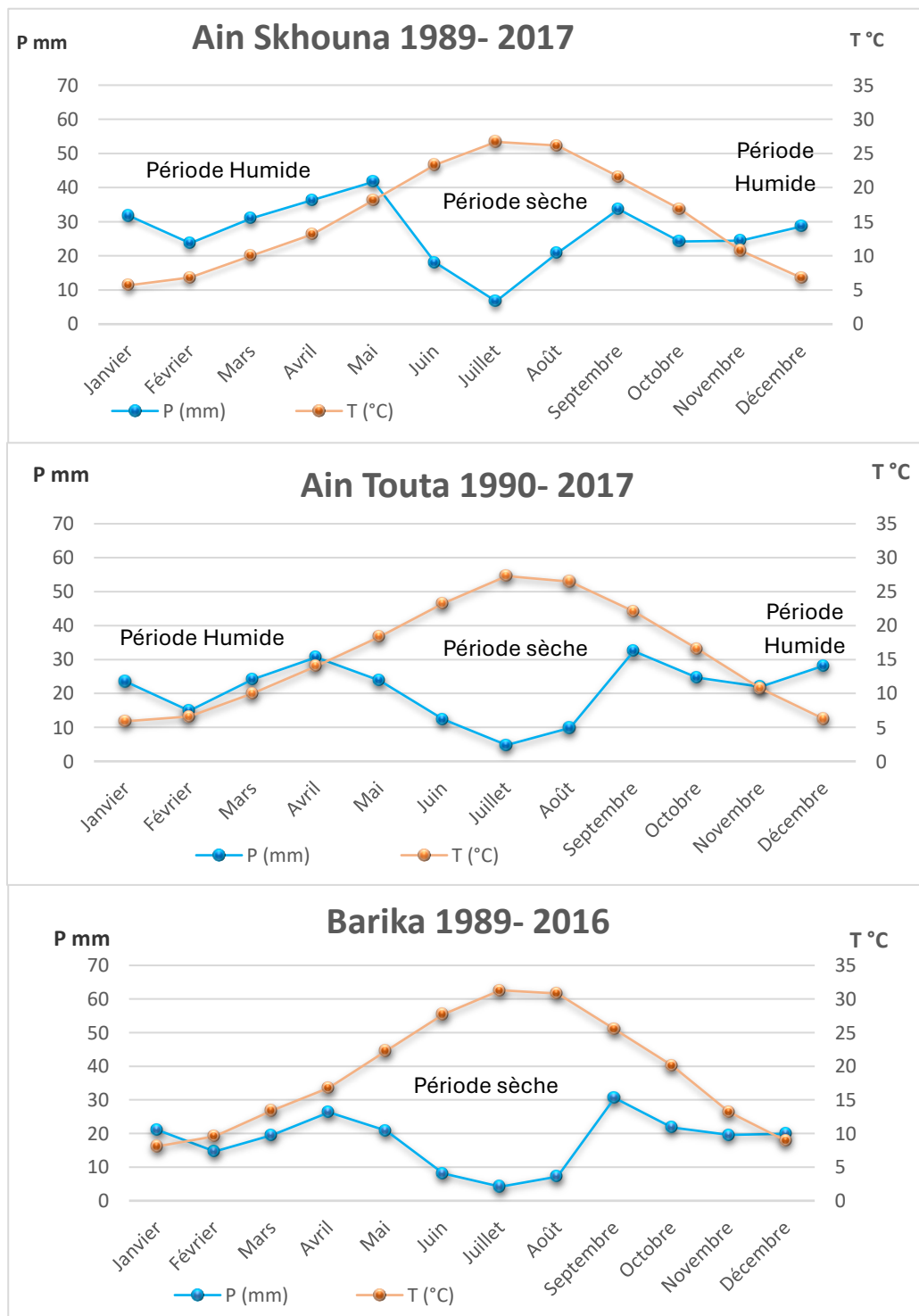


Figure. 19 : Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN.

À partir des diagrammes ombrothermiques de BAGNOULS et GAUSSEN, nous pouvons faire les observations suivantes :

- Le diagramme ombrothermique de la région d'Ain Skhouna fait apparaître deux périodes bien distinctes, l'une sèche et chaude, et l'autre humide et froide. La période sèche s'étale sur plus de 6 mois, allant de fin d'avril jusqu'à la fin du mois d'octobre, alors que la période humide et froide débute en novembre jusqu'à la fin du mois d'avril.
- Le diagramme Ombrothermique de la région d'Ain Touta fait apparaître deux périodes bien distinctes, l'une sèche et chaude, et l'autre moins humide et froide. La période sèche s'étale sur 7 mois allant de début d'avril jusqu'à la fin du mois d'octobre, alors que la période humide et froide débute en novembre jusqu'à la fin du mois de mars.
- Le diagramme Ombrothermique de la région de Barika fait apparaître deux périodes, la période principale est sèche et très chaude, et l'autre est presque négligeable ; moins humide et un peu froide. La période sèche s'étale sur plus de 11 mois allant de mi-janvier jusqu'à la fin du mois de novembre, alors que la période humide et froide débute en décembre jusqu'à la mi-janvier.

### 1.2.3.2. Climagramme d'EMBERGER

La formule du quotient d'EMBERGER s'exprime comme suit :

$$Q = \frac{100P}{2 \left( \frac{M+m}{2} \right) (M - m)}$$

P : pluviosité moyenne annuelle.

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en ° Kelvin

m : moyenne des minima du mois le plus froid en ° Kelvin.

M-m : amplitude thermique extrême moyenne.

$(M + \frac{m}{2})$  : température moyenne

Le quotient modifié d'EMBERGER est défini par la formule :

$$Q_2 = \frac{2000 P}{M^2 - m^2}$$

Q<sub>2</sub> : quotient pluviothermique modifié d'EMBERGER.

M : moyenne des maxima (températures maximales journalières) du mois le plus chaud, en Kelvins.

m : moyenne des minima (températures minimales journalières) du mois le plus frais, en Kelvins.

P : cumul pluviométrique annuel, en millimètres.

En Algérie, STEWART (1969) a développé une reformulation du quotient pluviothermique d'EMBERGER, 1952 :

$$Q_2 = K \frac{P}{M-m}$$

La valeur  $(M + m) / 2$  exprimée en kelvins varie peu. On suppose que  $(M + m) / 2 \approx 291$  kelvins et donc,  $M + m \approx 582$ .

On obtient alors  $2000 / 582 = 3,436$ . La formule devient alors la formule de STEWART avec K : constante qui égale 3,43.

Les températures en degrés Celsius pour M et m. La pluviosité P en mm.

Donc, les valeurs de  $Q_2$  des différentes stations pour les deux périodes 1913-1938 et 1989-2017 sont présentées dans le tableau 06.

**Tableau. 06 :** Les valeurs  $Q_2$  des stations.

Station	Altitude (m)	Exposition	Pluviométrie moyenne annuelle (mm)	m °C	M °C	M-m	P/M-m	Q2	Étage Bioclimatique
Ain Skhouna	821	Nord-Est	321,13	0,07	35,73	35,66	9,01	<b>30,89</b>	Semi-aride à hiver frais
Batna Seltzer	1040	/	346	0,3	33,3	33	/	<b>35,96</b>	/
Nord 2178 m (Réf. Ain Skhouna)	2178	Nord	863,13	-6,03	26,25	32,28	26,74	<b>91,71</b>	humide à hiver très froid
Ain Touta	966	Sud	251,26	-0,12	36,33	36,45	6,89	<b>23,64</b>	Aride à hiver froid
Sud 2178 m (Réf. Ain Touta)	2178	Sud	493,26	-5,57	27,86	33,43	14,76	<b>50,61</b>	Subhumide à hiver très froid
Barika	460	Sud-Ouest	213,68	2,3	38,6	36,3	5,89	<b>20,19</b>	Aride à hiver frais
Barika Seltzer	/	/	224	2,8	39,2	/	/	<b>21,11</b>	/
Sud 2178 m (Réf. Barika)	2178	Sud	556,88	-5,42	26,59	32,01	17,40	<b>59,67</b>	Subhumide à hiver très froid
Sud 2178 m (Réf. Ain Touta et Barika)	2178	Sud	525,07	-5,495	27,225	32,72	16,05	<b>55,04</b>	Subhumide à hiver très froid

D'après les valeurs du quotient pluviothermique du tableau ci-dessus, on constate que le territoire de la zone d'étude est situé à divers étages bioclimatiques où l'altitude et l'exposition jouent un rôle prépondérant dans la classification de ces étages bioclimatiques (Figure. 20).

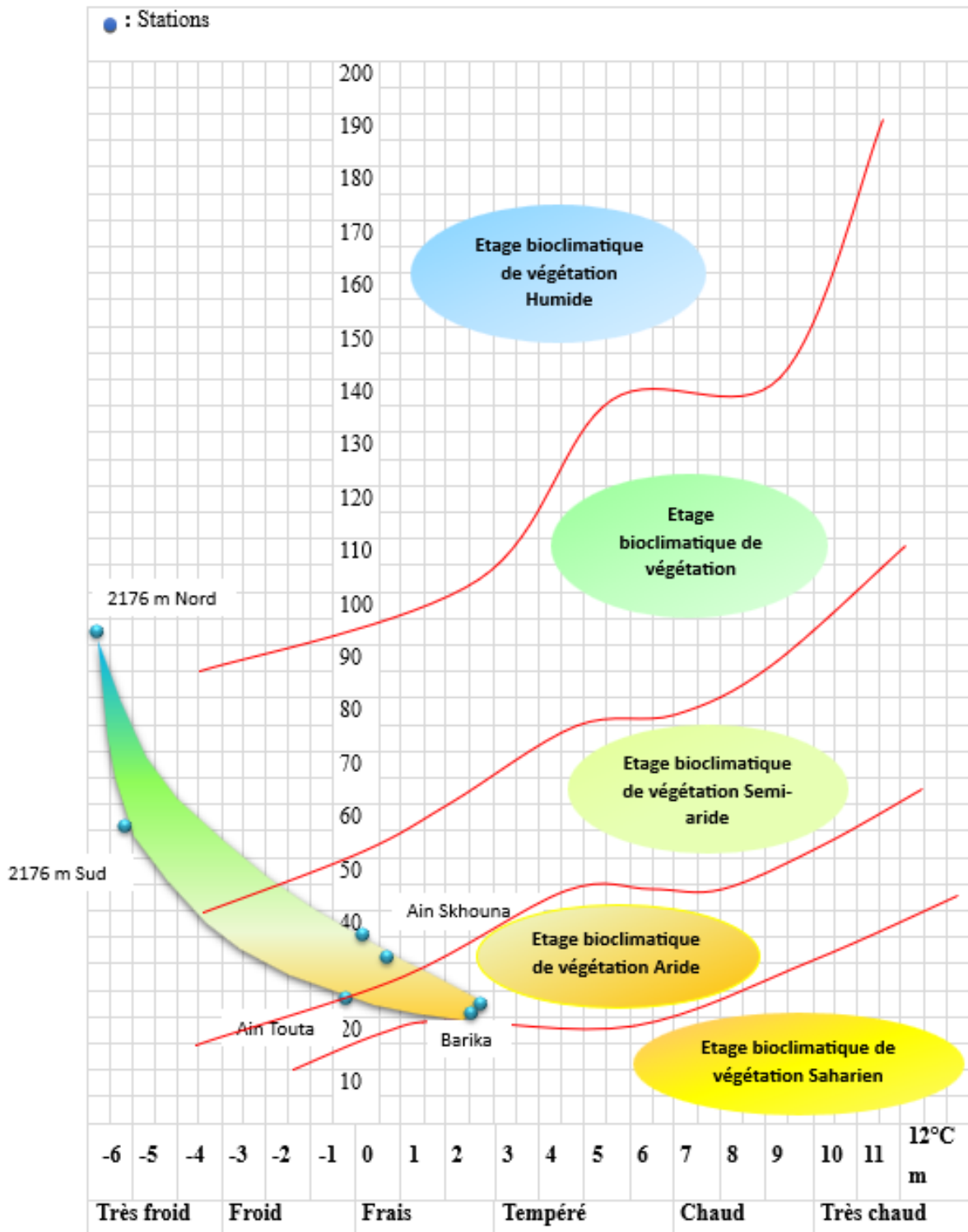
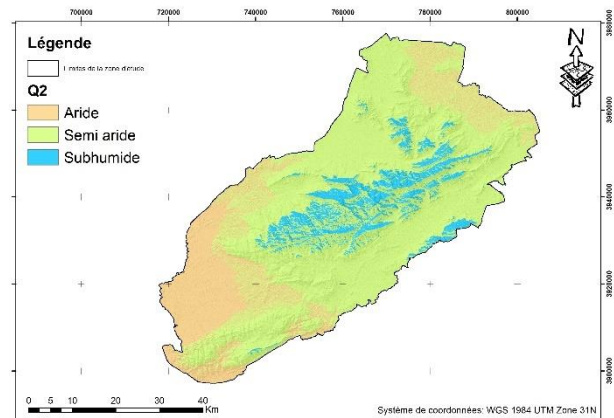


Figure 20. : Climagramme d'EMBERGER.

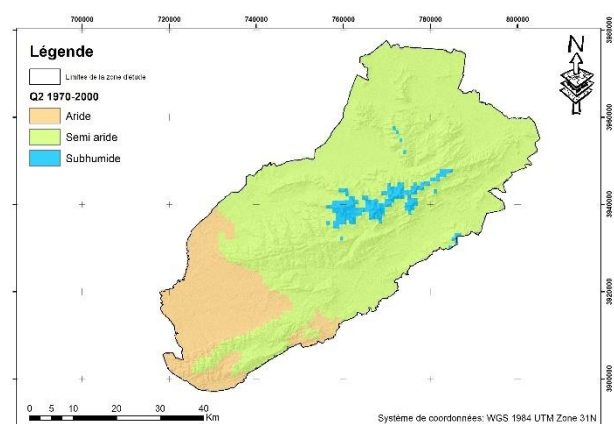
Pour avoir la carte des étages bioclimatique, il a fallu réaliser la carte de la moyenne des températures maximales (la moyenne des maxima du mois le plus chaud), et la carte de la

moyenne des températures minimales (la moyenne des minima du mois le plus froid) des trois stations en degrés Celsius.

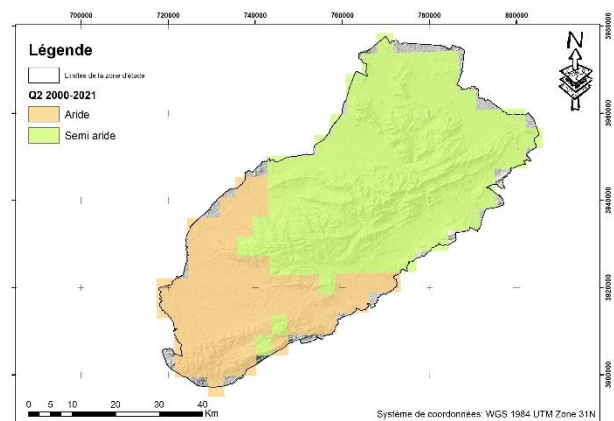
**Figure. 21 :** Carte des étages bioclimatiques Extrapolation 1989-2017 (carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 22 :** Carte des étages bioclimatiques WorldClim 1970-2000 (carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 23 :** Carte des étages bioclimatiques WorldClim 2000-2021 (carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).



La figure 21 montre, par la méthode d'extrapolation des données climatiques et selon le quotient pluviothermique d'EMBERGER (1952), la distribution des étages bioclimatiques de la zone d'étude par un climat qui passe du subhumide à hiver froid dans les hautes altitudes vers l'aride à hiver frais en basses altitudes. Alors que les données de WorldClim reflètent de manière générale un glissement vers l'aridité des étages bioclimatiques, notamment après l'an 2000 (Figures. 22 et 23).

### 1.2.4. L'indice d'aridité de DE MARTONNE

L'indice d'aridité de DE MARTONNE (1926), se base sur le régime des précipitations et des températures pour caractériser le climat d'une région selon la formule suivante :

$$I_{DM} = \frac{P}{T + 10}$$

Où :

**I<sub>DM</sub>** : indice d'aridité annuelle. **P** : les hauteurs annuelles des précipitations en mm.

**T** : les températures moyennes annuelles en °C. **10** : constante utilisée pour éviter les valeurs négatives lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0 °C.

Lorsque le climat est sec, cet indice prend des valeurs plus faibles et lorsqu'il fait plus humide, il prend des valeurs plus élevées. DE MARTONNE a proposé la classification des climats en fonction des valeurs de cet indice, qui sont représentées dans le tableau suivant :

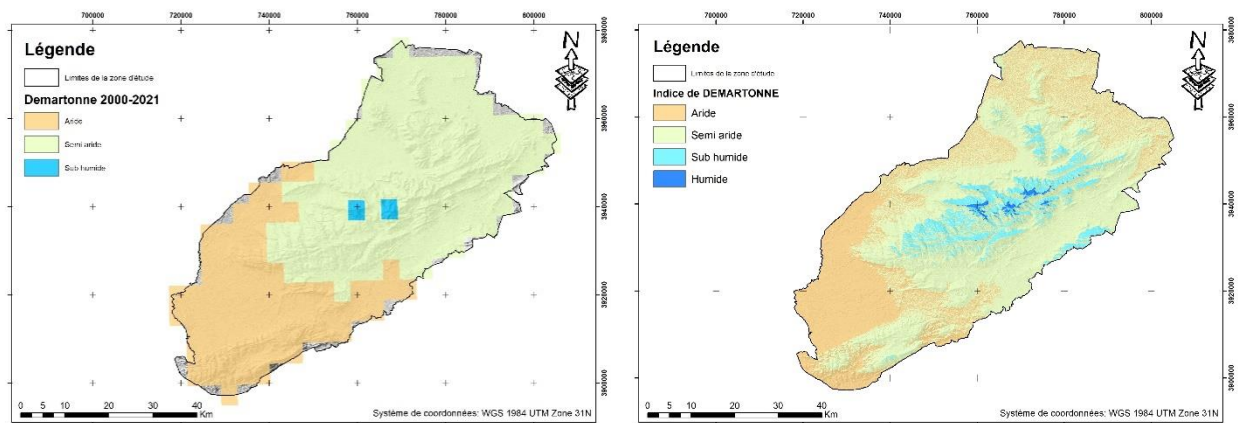
**Tableau. 07** : Classification du climat selon l'indice de DE MARTONNE.

Valeur d'indice	Type de climat
0 < I <sub>dm</sub> < 5	Hyper aride
5 < I <sub>dm</sub> < 10	Aride
10 < I <sub>dm</sub> < 20	Semi-aride
20 < I <sub>dm</sub> < 30	Sub-humide
30 < I <sub>dm</sub> < 50	Humide

Les résultats obtenus par l'application de la formule de l'indice de DE MARTONNE sur les données climatiques disponibles des trois stations, sont récapitulés dans le tableau suivant :

**Tableau. 08** : Valeurs de l'indice d'aridité annuel de DE MARTONNE pour les stations étudiées.

Station	P (mm)	T (°C)	I <sub>DM</sub> Types du climat	Types du climat
Ain Skhouna 1989- 2017	321,13	15,50	12,59	Semi-aride
Batna Seltzer	346	13,98	14,43	Semi-aride
(Nord) 2178 m	<b>863,13</b>	7,75	48,63	Humide
Ain Touta 1990- 2017	251,26	15,63	9,80	Aride
(Sud) 2178 m	<b>493,26</b>	8,71	26,36	Sub-humide
Barika 1989- 2016	213,68	18,97	7,38	Aride
Barika Seltzer	224	18,57	7,84	Aride
(Sud) 2178 m	<b>556,88</b>	9,14	29,10	Sub-humide
WorldClim 2000-2021 (2178 m)	470	8,53	25,35	Sub-humide



**Figure. 24 :** Indice d'aridité de DE MARTONNE (carte réalisée par AIT MEDJBER Rachid).

Dans cette synthèse climatique, on s'est limité à l'étude de la pluie et de la température. Ce qui a permis de conclure que les monts de Belezma constituent un microclimat local qui glisse du subhumide vers le semi-aride, alors que les couloirs des steppes de Barika, des plaines de Belezma, Ain Touta, Batna et de Zana glissent du semi-aride vers l'aride.

### Conclusion

En conclusion, la synthèse climatique obtenue montre une augmentation des températures moyennes annuelles et une diminution de la moyenne annuelle des précipitations accompagnée de longues périodes de sécheresse qui s'observent durant toutes les saisons. La combinaison des données climatiques extrapolées et les données World Clim v2,1 nous a permis d'obtenir une vision complète et approfondie des tendances actuelles en matière de changement climatique. Les résultats confirment le glissement vers les étages bioclimatiques semi-arides et arides.

Ces données offrent une meilleure compréhension de l'ampleur des changements environnementaux en cours, soulignant l'urgence d'adopter des mesures significatives pour atténuer les impacts négatifs sur notre environnement. Il est impératif que les décideurs, les communautés et les individus collaborent de manière concertée pour mettre en œuvre des solutions durables, afin de préserver la biodiversité et de garantir un avenir plus résilient face aux défis climatiques.

**CHAPITRE II :**  
CARTOGRAPHIE DE L'ÉTAT DES CHANGEMENTS  
D'OCCUPATION DU SOL DANS LA RÉGION DE  
BELEZMA

## **Introduction**

La connaissance des transformations actuelles des surfaces terrestres représente un enjeu important pour l'évaluation des problèmes environnementaux. Dans un pays méditerranéen comme l'Algérie, les formations végétales subissent des changements d'un rythme inquiétant en raison des activités humaines ainsi que des facteurs naturels. Les études sur le changement d'occupation du sol sont d'une grande importance, car elles permettent de connaître les tendances actuelles dans les processus de déforestation, de dégradation, de désertification et de perte de la biodiversité d'une région déterminée (LAMBIN *et al.*, 2001).

La télédétection permet de surveiller notre environnement sur une large étendue et de faire des comparaisons dans le temps et dans l'espace afin de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes (TIDJANI *et al.*, 2009). Une évolution régressive est observée dans certains écosystèmes forestiers : on note par exemple, le dépérissement massif de la cédraie du Belezma et des Aurès qui connaissent un déclin majeur de leurs superficies d'origine (MEDDOUR, 2012).

Au cours des dernières décennies, un nombre de travaux ont été réalisés sur l'évaluation de l'occupation du sol en Algérie, parmi lesquels on peut citer : ABDESSEMED, 1981 ; BENSALID, 2006 ; BENMESSAOUD, 2009 ; BOUIADJRA *et al.*, 2011 ; CHERET, 2016 et BEZZIH *et al.*, 2021.

Ce chapitre a pour objectif principal de réaliser et d'analyser des cartes d'occupation du sol dans un territoire de grande étendue où culminent tous les facteurs climatiques et anthropiques, afin d'identifier et de comprendre l'évolution et les changements spatiotemporels de treize classes d'occupation du sol et des formations végétales pour une période de 35 années entre 1986, 2001 et 2021, en utilisant les outils de télédétection à partir d'une classification supervisée effectuée sur les images satellitaires de Landsat américain. Cela permet d'avoir l'évolution de treize classes et de détecter la résilience des formations végétales par rapport aux facteurs naturels et anthropiques.

### **2.1. Localisation de la zone d'étude**

Géographiquement, la zone choisie se localise dans la partie Nord-Est de l'Algérie au Nord-Ouest de la wilaya de Batna sur une superficie de 339.870 ha, en prenant compte le territoire des 22 communes, y compris la ville de Batna.

La position géographique près du désert dans l'Atlas saharien, exposée aux différents impacts climatiques et anthropiques, est caractérisée par un système orographique accidenté qui forme une transition de paysages allant des forêts aux altitudes telles que la cédraie de Belezma, ensuite des matorrals de chêne vert et de genévrier passant par des parcours et enfin les terres agricoles et les plaines de Belezma et de Zana au Nord, de Batna, Ain Touta et Barika au Sud avec des villes et des villages tout autour du massif (Figure.01, page 05).

La zone d'étude est caractérisée par une opposition entre les influences climatiques de la mer méditerranéenne qui se trouve à 100 Km à vol d'oiseau passant par l'Atlas tellien au Nord et les influences sahariennes au Sud.

La zone d'étude est caractérisée par un climat qui passe du subhumide à hiver froid dans les hautes altitudes aux versants Nord vers un climat aride à hiver frais en basses altitudes et qui glisse vers l'aridité des étages bioclimatiques, notamment après l'an 2000.

## **2.2. Matériel et méthodologie**

La démarche adoptée dans ce chapitre est reposée sur l'utilisation des données de la télédétection avec des mesures et des observations faites sur le terrain, où on a utilisé les seules images satellitaires disponibles sur 35 ans avec une résolution spatiale moyenne de 30 mètres de Landsat, qui sont acceptables pour réaliser une étude d'analyse diachronique détaillée sur les différents types d'occupations de sol et des formations végétales.

Le principe de cette méthode est basé sur la méthode de la classification supervisée de ces images. Il est à noter que la méthodologie choisie a été déjà adoptée dans la région des Aurès par BENMESSAOUD *et al.*, (2009) ; BEZZIH *et al.*, (2021). Pour la région de Belezma, c'est la première fois que cette méthode est adoptée de cette façon avec treize classes d'occupation du sol et la prise en considération de tout l'environnement socioéconomique.

Un ensemble de matériel et de logiciel est utilisé pour avoir et analyser l'information, soit sur le terrain, comme un GPS Garmin Oregon 650 et un appareil photographique, soit dans le bureau, tel qu'un ordinateur puissant et des logiciels de traitement et d'analyse des images satellitaires ArcMap, ENVI, Google Earth, Excel et Word.

Pour l'utilisation des images de télédétection dans le traitement et l'analyse diachronique de l'occupation du sol, nous avons maintenu cinq principales étapes :

- a.** Le téléchargement des images satellitaires disponibles avec minimum de nuages sont toutes prises en saison de printemps en pleine activité photosynthétique, où on peut distinguer les

différents types d'occupation et d'utilisation du sol : le 19 mai 1986 (Thematic Mapper TM/ LT05), le 02 avril 2001 (Capteur Enhanced Thematic Mapper ETM+ / LE07), le 19 mai 2021 (Capteur Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) LC08 Landsat Collection 8). Le téléchargement de ces images satellitaires est fait à partir du site : <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques des images utilisées :

**Tableau. 09 :** Caractéristiques des images satellitaires de Landsat.

Satellite	Path	Row	Date d'acquisition	Capteur	Mode	Cycle de répétition Date de lancement	Bandes spectrales		
							Bande spectrale	Longueur d'onde $\mu\text{m}$	Résolution spatiale (m)
Landsat 5	194	36	19/05/1987	TM Thematic Mapper / MSS Multispectral Scanner	Multi spectral	16 jours 1984-2011	1 (Bleu)	0,45 - 0,52	30
							2 (Vert)	0,52 - 0,60	30
							3 (Rouge)	0,63 - 0,69	30
	194	35	19/05/1987				4 (Infrarouge)	0,76 - 0,90	30
							5 (Infrarouge)	1,55 - 1,75	30
							6 (Infrarouge thermique)	10,42 - 12,50	60
Landsat 7	194	35	02/04/2001	ETM+ Enhanced Thematic Mapper Plus	Multi spectral	16 jours 1999	7 (Infrarouge)	2,08 - 2,35	30
							1 (Bleu)	0,45 - 0,515	30
							2 (Vert)	0,52 - 0,605	30
							3 (Rouge)	0,63 - 0,69	30
	194	36	02/04/2001				4 (Infrarouge)	0,76 - 0,90	30
							5 (Infrarouge)	1,55 - 1,75	30
							6 (Infrarouge thermique)	10,42 - 12,50	60
							8 (Panchromatique)	0,50 - 0,90	15
Landsat 8	194	35	19/05/2021	OLI Operational Land Imager	Multi spectral	16 jours 2013	1 (Aérosols)	0,433 - 0,453	30
							2 (Bleu)	0,450 - 0,515	30
							3 (Vert)	0,525 - 0,600	30
							4 (Rouge)	0,630 - 0,680	30
							5 (Infrarouge)	0,845 - 0,885	30
							6 (Infrarouge)	1,560 - 1,660	30
							7 (Infrarouge)	2,100 - 2,300	30
							8 (Panchromatique)	0,500 - 0,680	15
							9 (Cirrus)	1,360 - 1,390	30
							TIRS Thermal Infrared Sensor	10 (Infrarouge Thermique TIRS 1)	10,6 - 11,19
				11 (Infrarouge Thermique TIRS 2)			11,5 - 12,51	100	

Source : [Landsat.gsfc.nasa.gov](https://landsat.gsfc.nasa.gov)

b. Selon JOFACK (2016), une série de prétraitements géométriques, atmosphériques, radiométriques ont permis de corriger les déformations géométriques et radiométriques des plateformes et des capteurs spécifiques et d'améliorer la lisibilité des images en supprimant tous les effets atmosphériques qui conduisent à une première photo-interprétation des

différents types d'occupation du sol dans la zone. On a appliqué la correction atmosphérique avec l'outil FLAASH sur toutes les images avec l'ENVI 5.3 et une mosaïquage sur les images de Landsat 5 et 7 afin de recouvrir toute la zone faisant l'objet de l'étude avec ArcGIS 10.8.

- c. La composition colorée et le choix des canaux multispectraux : En télédétection, chaque objet naturel est identifié par sa signature spectrale. Il ne réagit pas de la même façon le long du spectre électromagnétique. L'analyse de la signature spectrale des différents objets de l'occupation du sol est une étape importante pour le choix des canaux (BENSAID, 2006). Chaque plan-image correspond à une bande spectrale précise, c'est-à-dire à une longueur d'onde dans laquelle l'image a été acquise.

La composition colorée résulte de la superposition des trois bandes spectrales, dont chacune est affectée de l'une des trois couleurs fondamentales (Rouge, Vert, Bleu). Par convention, on attribue la couleur rouge à la bande spectrale rouge, la couleur verte à la bande verte et la couleur bleue à la bande bleue.

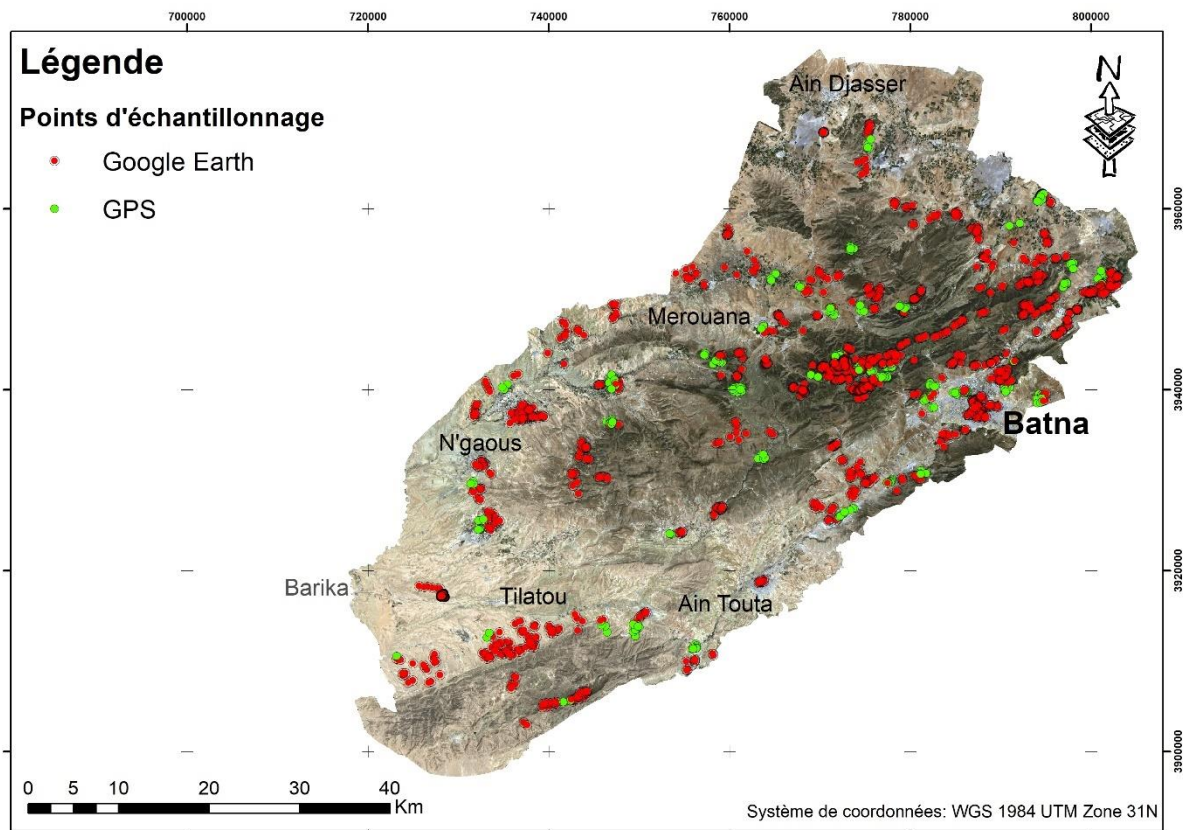
L'utilisation de compositions colorées permet de mettre en évidence de manière distincte les différents types d'occupation des sols. Elle est ainsi considérée comme un élément fondamental pour la sélection des échantillons utilisés dans le traitement des images.

La combinaison des bandes spectrales utilisée dans notre étude sont les bandes qui ont la même résolution pour chaque image, principalement l'infrarouge à ondes courtes, le proche infrarouge, le rouge, le vert, et le bleu. Pour faciliter les tâches et les traitements et pour permettre de faire ressortir d'une façon nette les différentes classes d'occupation des sols et de formations végétales.

À partir des limites administratives des 22 communes de la zone d'étude et des images satellitaires, on a pu découper et extraire notre zone d'étude. Cette opération est réalisée à l'aide du logiciel ArcGIS 10,8.

- d. Plus de trente missions de reconnaissance et de prise d'échantillon sur le terrain ont été effectuées, pour le repérage et la connaissance d'un certain nombre de parcelles représentatives des différents types d'occupation du sol, que l'on rencontre dans la zone d'étude. Ces missions de terrain ont été effectuées dans la période 2016-2021 dans la saison de printemps. Elle comprend la collecte d'un ensemble des points sur le terrain par le GPS (GARMIN 76CX et Garmin Oregon 650).

On a utilisé le programme Google Earth professionnel afin de compléter notre connaissance de terrain pour les endroits difficiles d'accès par les causes d'insécurité et d'inaccessibilité du terrain. Les points d'échantillonnage comprennent les points GPS relevés et les points complémentaires de Google Earth présentés dans la figure 25.



**Figure. 25 :** Carte des points d'échantillonnage.

Ces échantillons ont pour objectif de faire la classification supervisée, en l'occurrence d'autres échantillonnages sont nécessaires pour valider chaque classification. Pour chaque image Landsat, on a utilisé des échantillons différents pour les classes d'occupation du sol qui changent. La prise de 300 points utilisant le GPS et 1390 par Google Earth professionnel comme points d'échantillonnages et de références pour la classification et la validation de cette dernière.

Les sorties sur le terrain et les points d'échantillonnage jouent un rôle fondamental dans la collecte d'informations cruciales sur l'occupation du sol. Ces expéditions sur le terrain représentent une étape essentielle de notre recherche axée sur la diversité écosystémique présente dans la zone d'étude en 13 classes d'occupation du sol pertinentes par rapport à nos objectifs d'étude, telles que présentées dans la figure 26.

Ces points d'échantillonnage servent de fenêtres sur la réalité environnementale, offrant une vision détaillée de l'occupation du sol, en treize différentes classes. Cette approche

méthodologique nous a permis de cartographier avec précision les différentes composantes écologiques de la zone d'étude ainsi que leur évolution spatio-temporelle.



1- Arboriculture



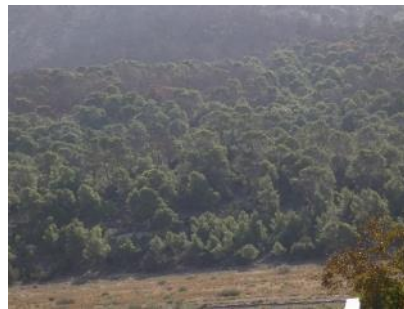
5- Forêt du cèdre de l'Atlas



9- Parcours



2- Céréaliculture



6- Forêt du pin d'Alep



10- Parcours steppique



3- Culture maraichère



7- Matorral du chêne vert



11- Zone urbaine



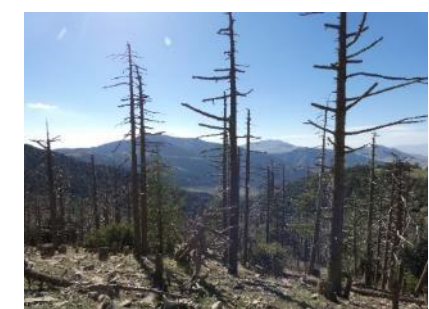
4- Sol nu



8- Matorral du genévrier



12- Zone humide



13- Forêt déperis

**Figure. 26 :** Les différentes classes d'occupation du sol (photos : AIT MEDJBER R. 2021).

e. Une classification supervisée a été effectuée sur la zone d'étude extraite de trois images Landsat 5, 7 et 8 utilisant la méthode de vraisemblance maximale de ArcMap. Cette méthode de classification consiste à classer les pixels en fonction de leur ressemblance avec les valeurs numériques des échantillons de référence, établis préalablement sur l'image (parcelles d'entraînement) et validés par des relevés sur le terrain à l'aide de la matrice de confusion, qui est une représentation tabulaire qui compare les classes réelles d'occupation des sols avec les classes prédites par ce modèle de classification.

Enfin, une mise en évidence des changements d'occupation du sol des trois dates choisies, cette démarche est schématisée dans la figure 27.

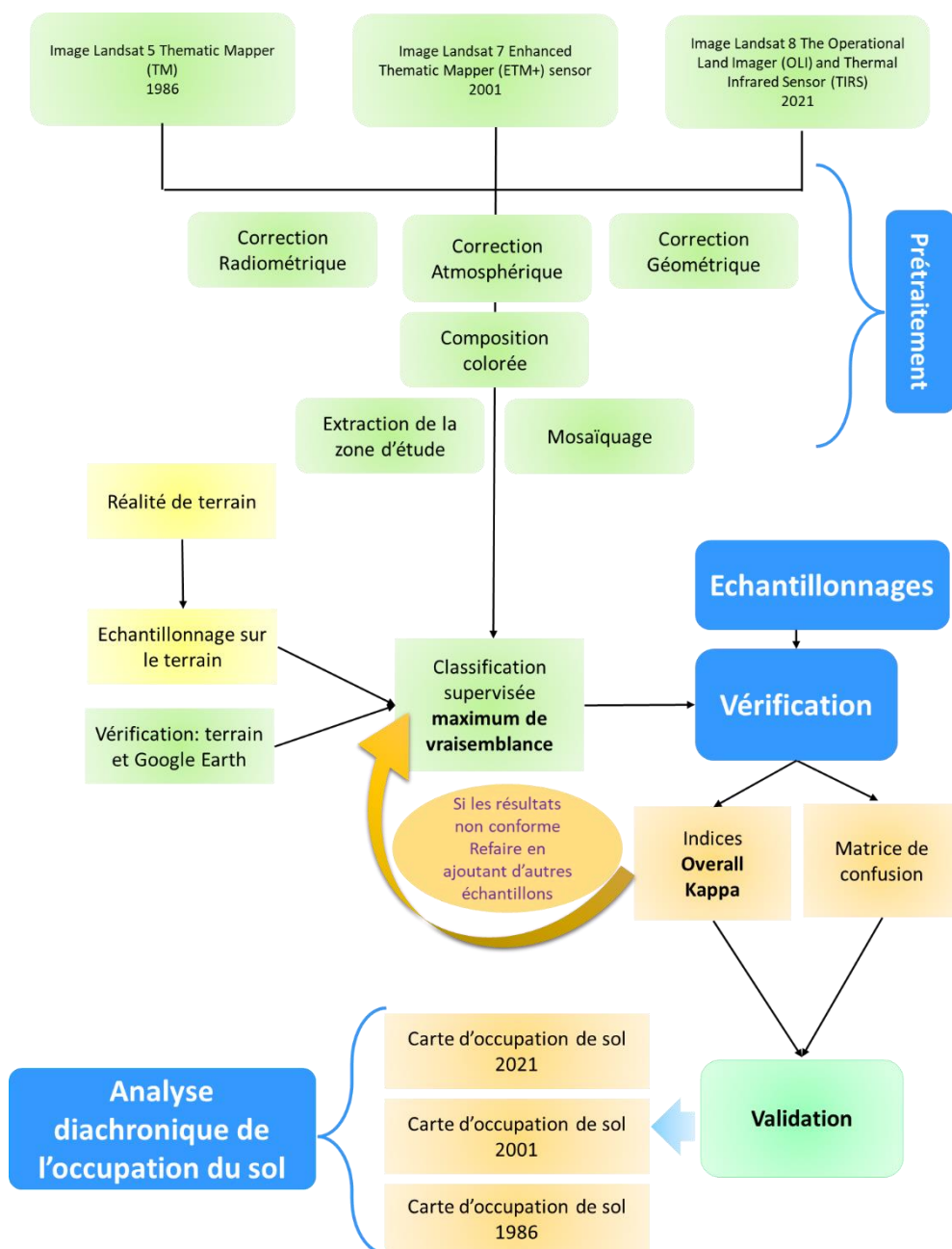
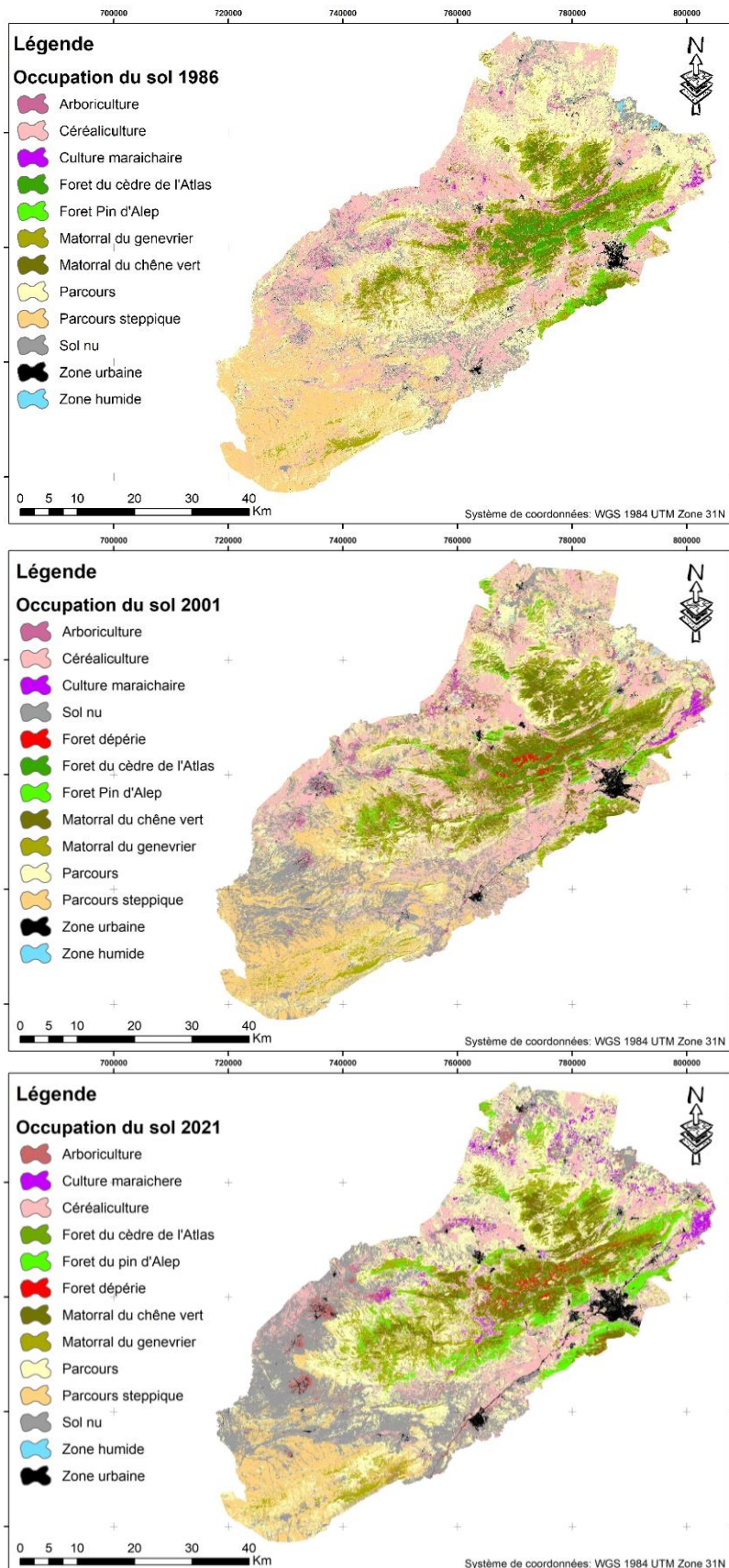


Figure. 27 : Organigramme méthodologique.

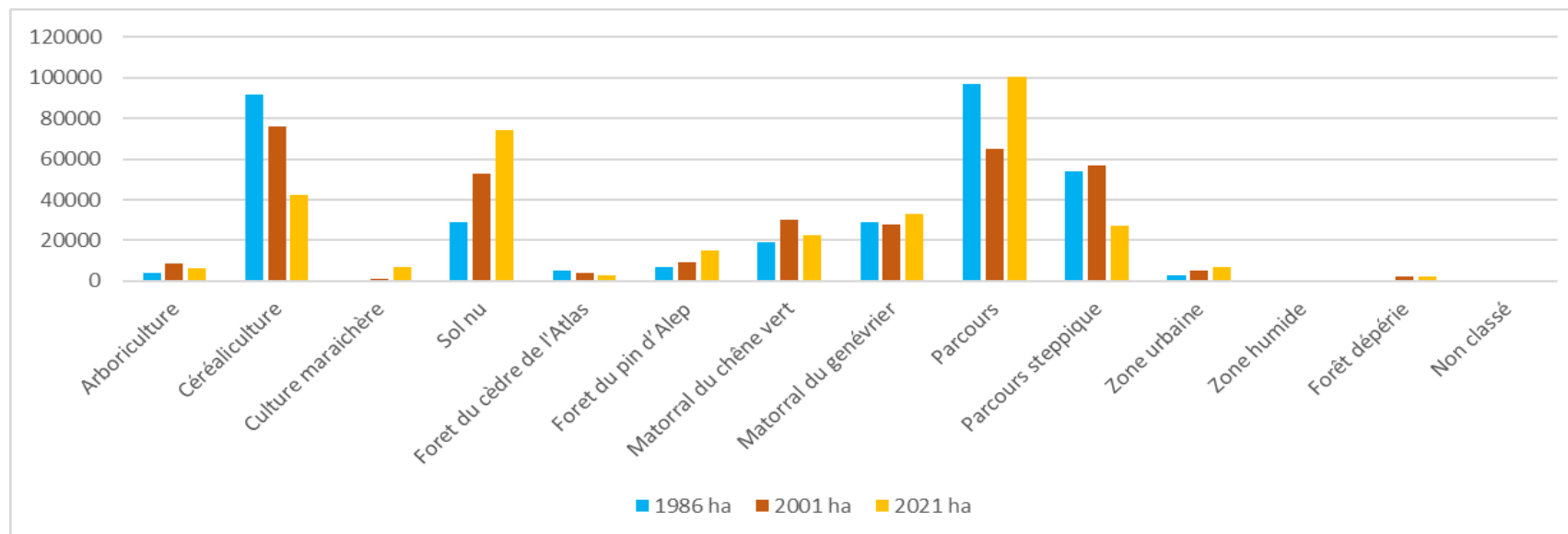
**2.3. Résultats et discussion :** les résultats obtenus montrent des valeurs Kappa (97 %, 91 % et 75 %) voir annexes 1, 2 et 3 que nous avons eues respectivement pour les dates 1986, 2001 et 2021, ce qui nous a permis de conclure que les résultats de ces classifications sont statistiquement très acceptables (figure. 28).



**Figure. 28 :** Cartes d'occupation du sol 1986, 2001 et 2021.

**Tableau. 10** : Superficie de différentes classes d'occupation du sol 1986, 2001 et 2021 en hectare

Classe	1986		2001		2021	
	ha	(%)	ha	(%)	ha	(%)
Arboriculture	4117,95	1,21	8845,65	2,60	6171,84	1,82
Céréaliculture	91706,4	26,98	76236,3	22,43	42106,77	12,39
Culture maraichère	720,72	0,21	1218,42	0,36	6746,04	1,98
Sol nu	28740,42	8,46	52854,39	15,55	74202,3	21,83
Foret du cèdre de l'Atlas	5271,93	1,55	4185,27	1,23	3012,39	0,89
Foret du pin d'Alep	7042,5	2,07	8912,79	2,62	14718,24	4,33
Matorral du chêne vert	18929,34	5,57	29858,58	8,79	22787,28	6,70
Matorral du genévrier	29090,34	8,56	27618,21	8,13	33079,5	9,73
Parcours	96894,9	28,51	65087,37	19,15	100473,21	29,56
Parcours steppique	53874,72	15,85	56910,87	16,74	27454,68	8,08
Zone urbaine	2863,53	0,84	5127,75	1,51	6637,77	1,95
Zone humide	618,03	0,18	721,08	0,21	15,12	0,00
Forêt déperie	0	0	2294,1	0,67	2465,64	0,73
Non classé	0	0	0	0	0	0
Total	339870,78		339870,78		339870,78	



**Figure. 29** : Le diagramme de l'évolution des différentes classes d'occupation du sol 1986, 2001 et 2021.

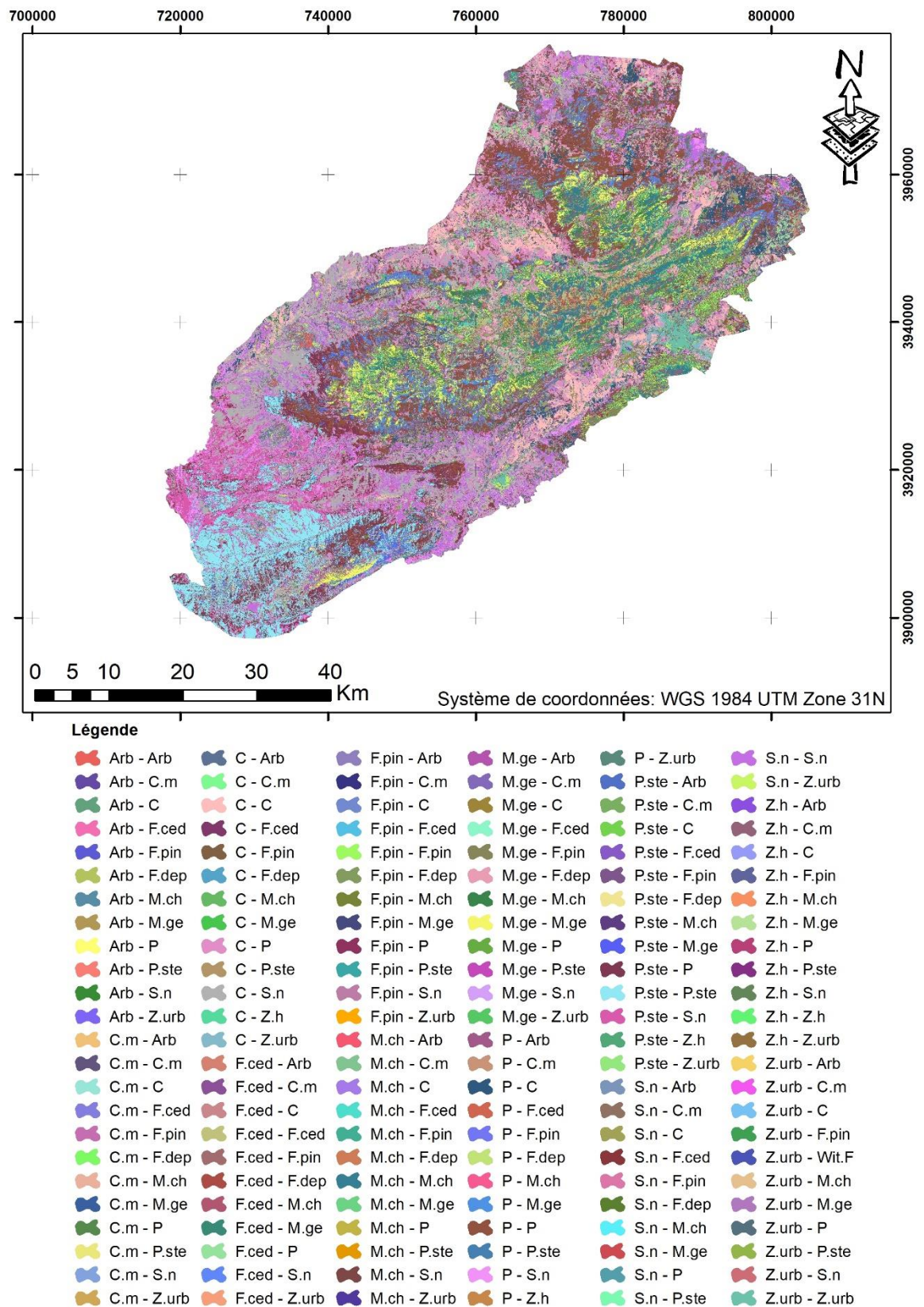
L'analyse des données de télédétection par la classification supervisée et à travers l'analyse diachronique de trois cartes d'occupation du sol permet de mentionner les différents changements entre les années 1986, 2001 et 2021 à travers 13 classes, sur une période de 35 ans. Le tableau 10 et les figures 28, 29 et 30 montrent les changements suivants :

- Dans cette région, la politique du gouvernement algérien a modifié les pratiques agricoles pour qu'elles soient adaptées aux conditions climatiques locales défavorables. Ce qui est recensé sur le terrain par l'augmentation des superficies de l'arboriculture de 4.117 ha en 1986 à 8.845 ha en 2001, puis une diminution à 6.171 ha en 2021.
- En revanche une diminution continue de la céréaliculture de 91.706 ha en 1986, à 76.236 ha en 2001 et à 42.106 ha en 2021, la superficie des céréalicultures est diminuée de 54% dans 35 ans à cause de la fluctuation des précipitations, de l'expansion des zones urbaines et de changement d'utilisation des sols vers l'arboriculture, les cultures maraichères et le délaissement des terres.
- Les cultures maraichères ont connu une augmentation rapide et continue, de 720 ha en 1986 à 1.218 ha en 2001 et à 6.746 ha en 2021. Cette classe a connu une augmentation de 836 % en 35 ans au détriment des autres classes, spécialement les zones humides.
- Le sol nu a connu une augmentation significative, passant de 28.740 ha en 1986 à 52.854 ha en 2001 et à 74.202 ha en 2021. Ce changement est dû aux conditions climatiques défavorables et à la dégradation continue des autres classes, telles que les parcours steppiques. Aussi, l'augmentation du nombre des carrières par 35 unités d'extraction des agrégats et une cimenterie géante a provoqué l'expansion de sol nu, spécialement dans la partie Sud et Sud-Ouest de la zone d'étude.
- La forêt du cèdre de l'Atlas est en régression et en dégradation continue de 5.271 ha en 1986 à 4.185 ha en 2001 et à 3.012 ha en 2021. Cette dégradation est liée directement au déficit hydrique selon SLIMANI *et al.*, 2021. Le phénomène a été principalement déclenché par la période de sécheresses récurrentes survenue entre 1999 et 2002 (TOUCHAN *et al.*, 2008, 2016 ; KHERCHOUCHE *et al.*, 2013 ; SLIMANI *et al.*, 2021).
- Les forêts du pin d'Alep ont eu une augmentation, de 7.042 ha en 1986 à 8.912 ha en 2001 et à 14.718 ha en 2021, liée à la maturité des anciens reboisements et l'expansion de cette formation au détriment des autres classes, grâce à ses caractéristiques élastiques, telles que la pinède qui se propage au détriment de la cédraie dépérie dans le Djebel du Boumerzoug.
- Le matorral du chêne vert a eu une augmentation très importante de 18.929 ha en 1986 à 29.858 ha en 2001, puis une diminution en 2021 vers 22.787 ha.

- Le matorral du genévrier est passé de 29.090 ha en 1986 à 27.618 ha en 2001, puis à 33.079 ha en 2021.
- Malgré la rusticité des forêts de pin d'Alep, des matorrals du chêne vert et du genévrier, ils restent sensibles à la sécheresse continue et aux incendies répétitives.
- Les parcours en général restent stables, ils ont subi une diminution de 96.894 ha en 1986 à 65.087 ha en 2001, puis une augmentation en 2021 vers 100.473 ha.
- La sécheresse, en alliance avec les activités anthropiques néfastes et continues, jouent un rôle important dans la régression de l'aire de la steppe qui a eu une diminution de 53.874 ha en 1986 à 27.454 ha en 2021.
- La zone urbaine a connu une augmentation continue depuis 1986 de 2.863 ha à 5.127 ha en 2001 et à 6.637 ha en 2021, la surface urbaine est triplée, à la suite de l'exode rural dans les années 90 et de l'explosion démographique de la population de cette zone de 375.955 habitants en 1987 à 760.912 habitants en 2021 (DPSB, 2021).
- Les zones humides ont connu une légère augmentation de 618 ha en 1986 à 721 ha en 2001, puis une régression très importante en 2021, il ne reste que 15 ha.

Aussi :

- L'apparition de la classe de forêts dépéries, est estimé de 2.294 ha en 2001 et de 2.465 ha en 2021, liée directement à la sécheresse qui a joué un rôle important dans la régression de l'aire du cèdre à travers le dépérissement massif. Trois grandes périodes de sécheresse sévère ont généré autant d'épisodes de dépérissements forestiers, qui ont frappé de plein fouet la cédraie algérienne, avec un impact plus intense au niveau de l'Atlas saharien, limite méridionale de l'aire de répartition de l'espèce. La première a eu lieu entre 1876 et 1881, la deuxième de 1977 à 1978 et la dernière, la plus intense, a été enregistrée entre la fin du XXe et le début du XXIe siècle (KHERCHOUCHE *et al.*, 2021).



**Figure. 30 :** Carte des changements d'occupation du sol de la région du Belezma entre 1986 et 2021. Arb (Arboriculture), C (Céréaliculture), C.m (Culture maraichère), S.n (Sol nu), F.ced (Forêt du cèdre de l'Atlas), F.p (Forêt du pin d'Alep), M.ch (Matorral du chêne vert), M.ge (Matorral du génevrier), P (Parcours), P.ste (Parcours steppique), Z.urb (Zone urbaine), Z.h (Zone humide), F.dep (Forêt dépeuplée)

La figure 31 montre que 61,86 % de cette zone a connu des changements dans les trois dernières décennies et que 38,14 % reste stable, ces changements sont présentés dans la figure 30 comme suit :

Les classes qui ont connu une progression importante sont :

1. Culture maraîchère +836 % ;
2. Sol nu +158 % ;
3. Zones urbaines +131 % ;
4. Arboriculture +50 % ;
5. Pin d'Alep +108 %.

Les classes qui ont connu une progression moyenne sont :

1. Matorral de chêne vert +20 % ;
2. Matorral de genévrier +13 % ;
3. Parcours +3 %.

Les classes qui ont connu une grave dégradation sont :

1. Céréaliculture -54 % ;
2. Forêt de cèdre -42 % ;
3. Zone humide -97 % ;
4. Parcours steppique -49 %.

Nous avons constaté que la dégradation des milieux naturels est en relation inverse avec l'évolution anthropique :

La dégradation du milieu naturel, notamment la cédraie, la steppe et les zones humides, et en contrepartie la progression du milieu anthropique tels que l'urbanisation, les cultures maraîchères, l'arboriculture et le sol nu.

Cette régression des milieux naturels tels que la forêt de cèdre, les zones humides et la steppe est causée principalement par les changements climatiques telle que la sécheresse, et l'évolution anthropique essentiellement l'urbanisation, l'extension de l'agriculture, le surpâturage, les travaux de défrichement et les incendies qui jouent un rôle majeur dans la dégradation de ces milieux naturelles.

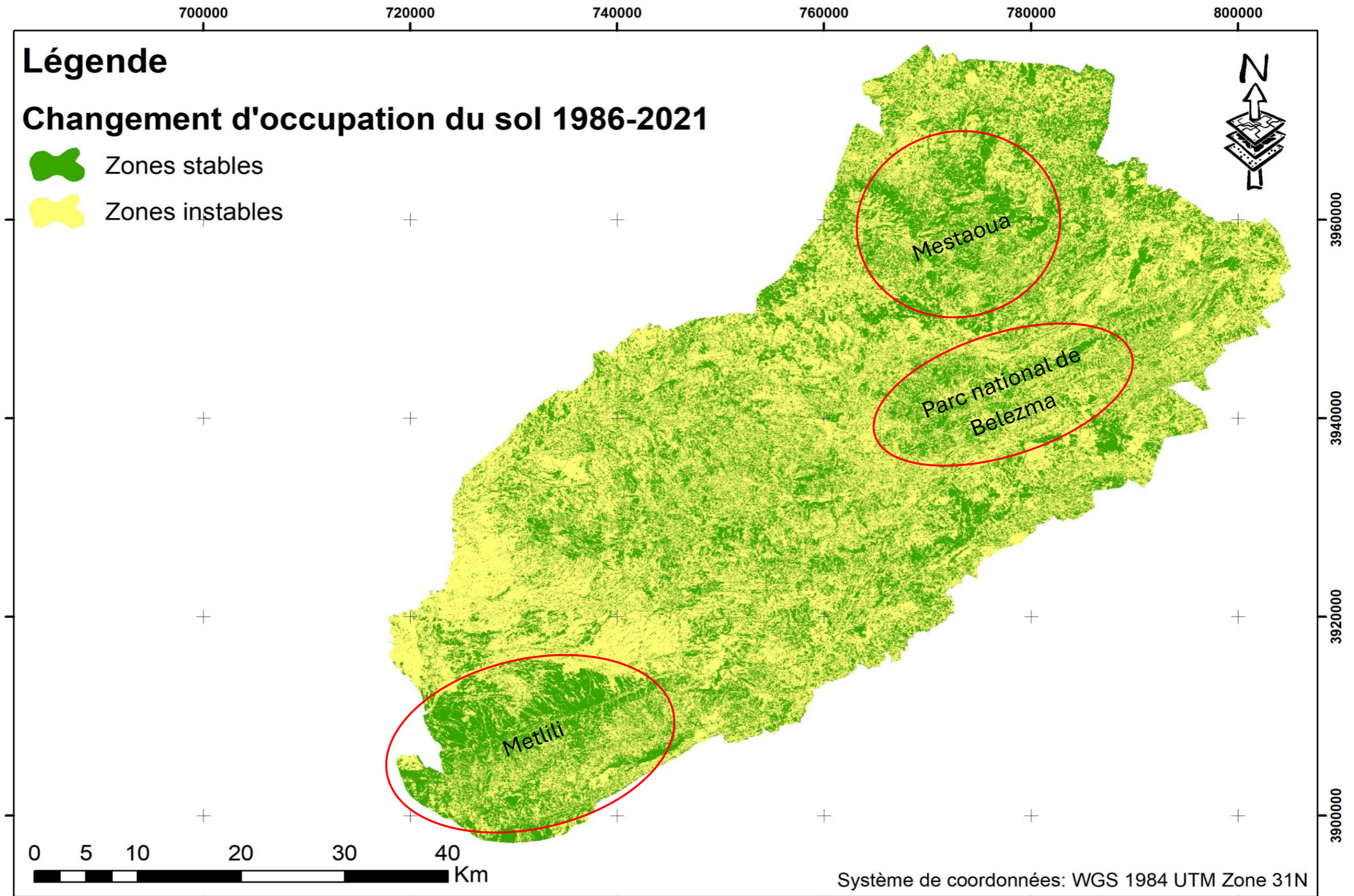


Figure. 31 : Carte représente les zones stables et les zones variables de la région du Belezma entre 1986 et 2021.

## **Conclusion**

L'analyse diachronique de l'évolution d'occupation du sol, dans la zone d'étude ayant une superficie de 340.000 ha, utilisant les images Landsat 1986, 2001 et 2021, nous a permis de détecter des changements profonds d'occupation du sol comme suit :

Les cultures maraichères, le sol improductif et les zones urbaines, ont connu une expansion significative. Alors que les forêts du cèdre, la steppe et les zones humides ont connu une dégradation grave au profit des classes de forêts dépériées et de sol nu. Bien que les matorrals de chêne vert et de genévrier et les parcours sont en général stables et que le pin d'Alep a connu une expansion ; les derniers feux de forêts et la sécheresse accrue ont eu un impact négatif sur tout le couvert végétal.

L'activité agricole dans cette région s'oriente vers les cultures maraichères et l'arboriculture, sinon abandonnées vers le sol nu et l'urbanisation, qui sont en augmentation constante.

L'homme, par ses actions irresponsables, affecte directement l'environnement par la déforestation, les feux de forêts, la pollution de l'air et de l'eau, l'utilisation excessive des ressources naturelles, l'urbanisation non contrôlée, l'agriculture intensive, ...etc., ce qui le rend le premier responsable de tous ces changements.

Enfin, les changements climatiques en interaction avec les facteurs anthropiques font la cause principale de la dégradation du milieu naturel, qui peut entraîner des dommages importants aux écosystèmes, à la biodiversité et aux ressources naturelles.

L'utilisation d'imagerie satellitaire permet d'améliorer les connaissances sur l'occupation du sol dans l'espace et dans le temps, et de mieux comprendre l'évolution de ces écosystèmes terrestres et leurs interactions.

Cette étude transmet la réalité du terrain, ce qui aidera les décideurs à réagir sagement pour la sauvegarde de la biodiversité par une gestion fiable et durable.

**CHAPITRE III :**

CARTOGRAPHIE ET MODÉLISATION DU  
RISQUE DES INCENDIES DANS LE MASSIF DE  
BELEZMA

## **Introduction**

Le feu est un des risques qui menace la biodiversité, spécialement les forêts et les zones boisées du bassin méditerranéen. Chaque année, les feux ravagent plus de 700.000 hectares de terres au niveau mondial, causant d'énormes dommages sur tous les plans (KAZAKIS et GHOSN, 2008).

Selon MADOUÏ (2002), au fil du temps, les forêts algériennes ont été gravement affectées par de nombreux incendies, qui sont sans aucun doute le principal facteur de dégradation de ces forêts. Ces incendies entraînent des pertes écologiques (disparition d'espèces rares), des pertes économiques et parfois des pertes humaines.

Pour mieux comprendre cette menace, il est crucial d'identifier et de cartographier précisément les zones à haut risque, afin de mieux contrôler et lutter contre cette menace. Dans les systèmes actuels d'estimation du risque des feux de forêt, le type de végétation ainsi que son biovolume, les facteurs anthropiques, les facteurs topo-morphologiques et les facteurs climatiques représentent des facteurs importants de prédisposition au feu.

Diverses méthodes peuvent être mises en œuvre pour modéliser et localiser ce risque. Celles-ci varient selon les objectifs, les moyens et les différentes formes de modélisation utilisées.

L'objectif du présent chapitre est de proposer une méthodologie basée sur l'analyse multicritères hiérarchique des processus (AHP) intégrée au système d'information géographique (SIG), qui ont été appliqués à la modélisation et à la cartographie du risque d'incendie de forêt dans le massif du Belezma.

### **3.1. Localisation du massif forestier de Belezma**

Le massif de Belezma, caractérisé par sa couverture forestière diverses (cédraie, chênaie, pinède, juniperaie...), occupe une vaste surface (Figure. 32) et est constamment exposé aux divers risques, notamment les feux de forêt.

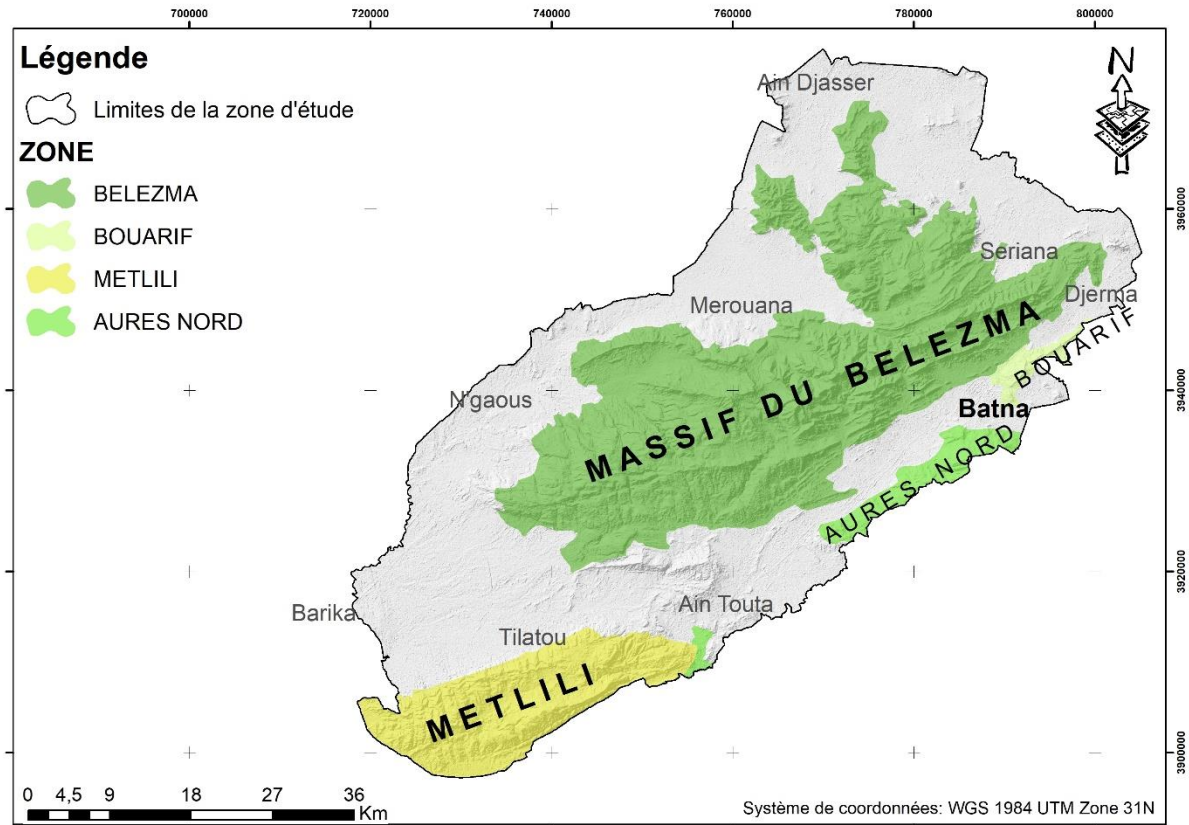


Figure. 32 : Carte de localisation du massif forestier de Belezma.

### 3.2. Matériel et méthodologie

Notre méthodologie est basée sur l'intégration du système d'information géographique (SIG) et de la démarche multicritère « Processus hiérarchique analytique, AHP » de SAATY pour estimer les zones à risque d'incendie de forêt dans le massif du Belezma.

Pour évaluer le risque d'incendie, il est nécessaire de modéliser chaque élément de risque. Dans ce modèle, on a utilisé quatre éléments principaux pour une évaluation précise de ce risque, à savoir : le biovolume de la végétation, les notes calorifiques des espèces, la topo-morphologie et l'indice humain.

Les indices et les facteurs qui nous ont intéressés dans ce travail sont issus de la formule (1) proposée par DAGORNE *et al.*, (1994), de la formule (2) proposée par ERTEN *et al.*, (2004) et de la formule (3) proposée par ALEXANDRIAN (1982).

$$\text{Equation (1) : } IR = 5. IC + 2. IH + IM$$

Où : IR est l'indice de risque aux incendies de forêts ; IC est l'indice de combustibilité ; IH est l'indice de l'homme ; IM est l'indice topo morphologique.

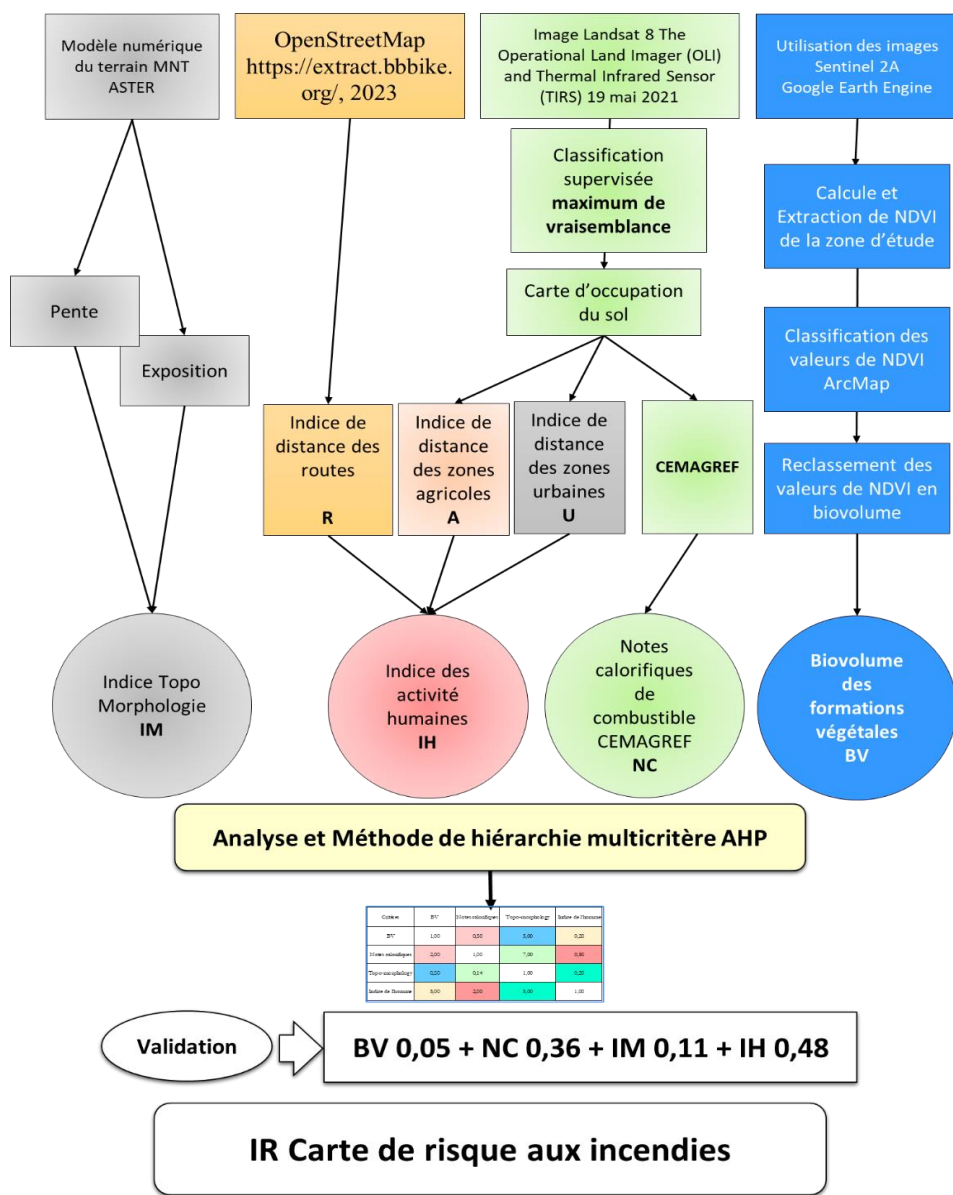
$$\text{Equation (2) } RC = 7*VT + 5*(S+A) + 3*(Dr+Ds)$$

Où : RC : l'indice numérique de risque d'incendies ; Vt : l'indice de végétation ; S : l'indice de pente ; A : l'indice de l'exposition ; Dr : l'indice de distance à partir des routes ; Ds : l'indice de distance à partir des agglomérations.

Les deux premiers paramètres représentant le couvert végétal, sont issus de l'équation (3), une méthode mise au point par ALEXANDRIAN (1982), en France, au niveau du CEMAGREF (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture).

$$\text{Equation (3) : IC} = 39 + 0.23 \text{ BV (E1 + E2 - 7.18)}.$$

Dans le présent modèle, on a utilisé les paramètres issus des trois modèles de DAGORNE *et al.*, (1994), ERTEN *et al.*, (2004) et ALEXANDRIAN (1982), présentés dans l'organigramme méthodologique suivant (Figure. 33) :



Validation du modèle (Superposition des incendies de 20 dernières années)

Figure. 33 : Organigramme méthodologique.

**3.2.1. Le biovolume BV :** est calculé par l'addition des taux de couverture de chacune des quatre strates de végétation (haute, basse, herbacée et litière), auxquels s'ajoutent éventuellement les pourcentages de couverture des débris et du bois mort, s'il y a lieu.

Chacun de ces taux de recouvrement est compris entre 0 (absence de strate) et 10 (strate formant un couvert fermé) ; selon ARFA (2019), le biovolume est donc compris entre 0 et 50. Dans ce modèle, l'estimation du biovolume global de la végétation, se fait à partir de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) pendant la période du pic d'activité photosynthétique dans la saison printanière, utilisant les images satellitaires Sentinel-2, du 16 mai 2021. Cet indice est calculé par l'équation (4) utilisant la plateforme Google Earth Engine code editor, et extrait dans l'ArcGIS. Cet indice est sensible à la densité de la végétation.

$$\text{Equation (4) : } IR (\text{Band8}) - R (\text{Band4}) / IR (\text{Band8}) + R (\text{Band4})$$

Le biovolume nécessite de mettre en place une échelle de conformité entre les valeurs du biovolume et les valeurs de l'NDVI. Étant donné que le biovolume peut théoriquement varier entre 0 et 50 ; concernant la végétation, les valeurs de l'NDVI sont comprises entre 0,1 et 1, il suffit donc de faire correspondre ces deux intervalles. Dans ce cas, la valeur 0,1 de l'NDVI correspondra à la valeur 0 du biovolume et celle de 1 sera équivalente à 50 (ARFA, 2019).

**3.2.2. Les notes calorifiques :** d'après l'équation (3), **E1** et **E2** représentent les deux notes calorifiques des espèces existantes dans la région du Belezma. Ces valeurs ont été extraites de celles établies par le CEMAGREF, 1990 ou adoptées aux valeurs des espèces les plus proches.

**E** représente la combustibilité moyenne de chaque type de peuplement. Elle est égale à la somme de la note de combustibilité de l'essence prédominante du relevé (**E1**) et de la moyenne des notes de combustibilité des espèces abondantes du relevé (**E2**), pour cela une carte des notes calorifiques du combustible des différents types de formations végétales a été établie.

En utilisant les valeurs du CEMAGREF (1990) et la carte d'occupation du sol de 2021 réalisée par une classification supervisée des images satellitaires Landsat 8, nous avons élaboré une carte des notes calorifiques des espèces dominantes dans chaque classe. Cette carte a pour objectif d'évaluer la capacité calorifique de chaque espèce végétale.

**3.2.3. L'indice topo-morphologique IM :** la caractérisation de cet indice est basée sur la variabilité spatiale du risque d'incendie dont la détermination est le résultat des paramètres physiques impliqués dans le modèle choisi.

Dans le modèle proposé, l'indice topo-morphologique (IM), deux paramètres topographiques interviennent : la pente et l'exposition. Ces paramètres sont déduits du modèle numérique de terrain (MNT\_ASTER\_GDEM) de la région disponible dans la plateforme <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Cet indice est exprimé par la relation suivante :

$$\text{Equation (5) : } IM = P + E$$

**3.2.4. L'indice des activités humaines IH :** les activités humaines ont un impact très important sur l'éclosion des feux de forêt. En fait, le risque de l'éclosion d'un feu est étroitement lié à la proximité des zones urbaines, des zones agricoles et des routes avoisinant les forêts. À partir de la carte d'occupation du sol de 2021, on a pu avoir les différentes occupations anthropiques, les zones urbaines et les zones agricoles. Concernant le réseau routier, il est disponible et téléchargeable à partir de la plateforme open source (OSM, 2023) avec l'addition des pistes praticables à partir des cartes de l'état-major de la région (INCT, 2004). Les trois paramètres sont utilisés pour calculer l'indice de distance de l'homme par l'outil de distance euclidienne d'ArcMap, et enfin la somme des trois critères (indice de distance des routes R, indice de distance des zones agricoles A et l'indice de distance des zones urbaines U), pour avoir l'indice des activités humaines IH selon l'équation (6).

$$\text{Equation (6) : } IH = R + U + A$$

**3.2.5. L'indice de risque aux incendies de forêts IR :** basé sur le principe de la somme pondérée, cet indice est conçu comme un modèle attribuant à chaque paramètre un coefficient de pondération issu du processus de hiérarchie analytique (AHP) basé sur son influence sur la propagation du feu.

### **3.2.6. La démarche multicritère AHP de SAATY**

La méthode AHP, développée pour résoudre les problèmes multicritères, a été appliquée à des problèmes de décision. Elle a l'avantage de décomposer un problème complexe en parties plus simples, organisées en une structure hiérarchique de critères et d'alternatives.

Selon SAATY (1986), son application correcte se fait en quatre étapes principales :

- Identification de la problématique et de l'objectif : cela implique de clarifier l'objectif principal à atteindre et de définir clairement le problème à résoudre.
- Décomposition du problème : cette étape consiste à structurer le problème en une hiérarchie, en identifiant les critères de décision principaux et leurs sous-critères qui, ensemble, forment les alternatives à considérer.

-Évaluation des poids relatifs : à travers des combinaisons binaires, cette phase permet de déterminer l'importance relative de chaque élément de la hiérarchie, en attribuant des poids à chaque critère et sous-critère.

-Synthèse et analyse : en calculant les poids globaux à l'aide du vecteur propre de la matrice de comparaison, cette dernière étape vise à intégrer les priorités déterminées pour obtenir une évaluation globale. Elle inclut également l'analyse de la cohérence des jugements et l'évaluation des résultats obtenus.

### 3.3. Résultats et discussion

**3.3.1. Le biovolume :** la figure 34 représente les valeurs de l'NDVI entre -0,378298 et 0,828094. Seules les valeurs supérieures à 0,1 sont utilisées dans l'estimation des valeurs de biovolume correspondantes dans la figure 35.

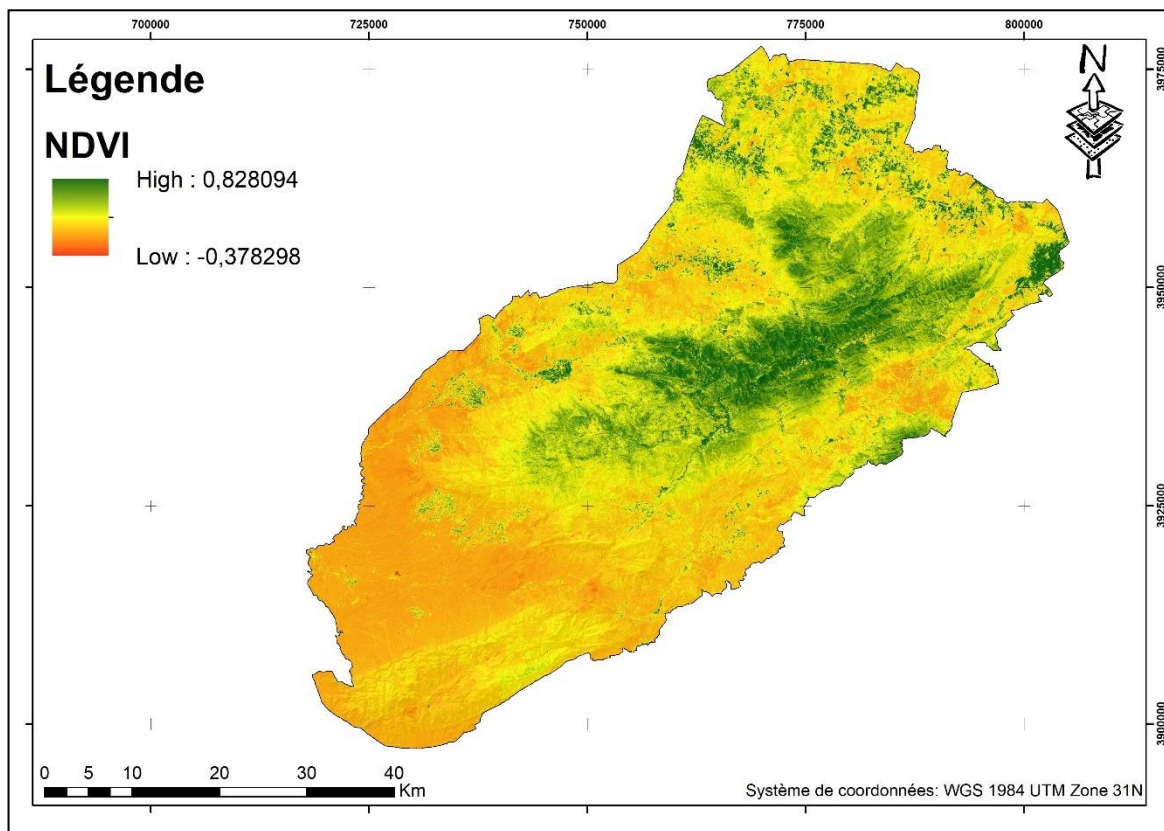


Figure. 34 : Carte de l'indice de végétation par différence normalisée NDVI, 16 mai 2021.

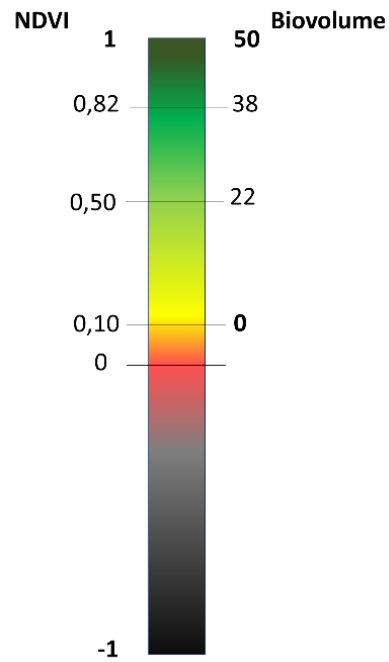


Figure. 35 : Les valeurs de biovolume correspondantes aux valeurs de NDVI (ARFA, 2019).

Les valeurs de biovolume estimées à partir des indices NDVI, qui représentent la densité de la végétation, sont illustrées dans la figure 36. Ces valeurs sont réparties en cinq classes sur l'ensemble du massif forestier, selon le tableau 11.

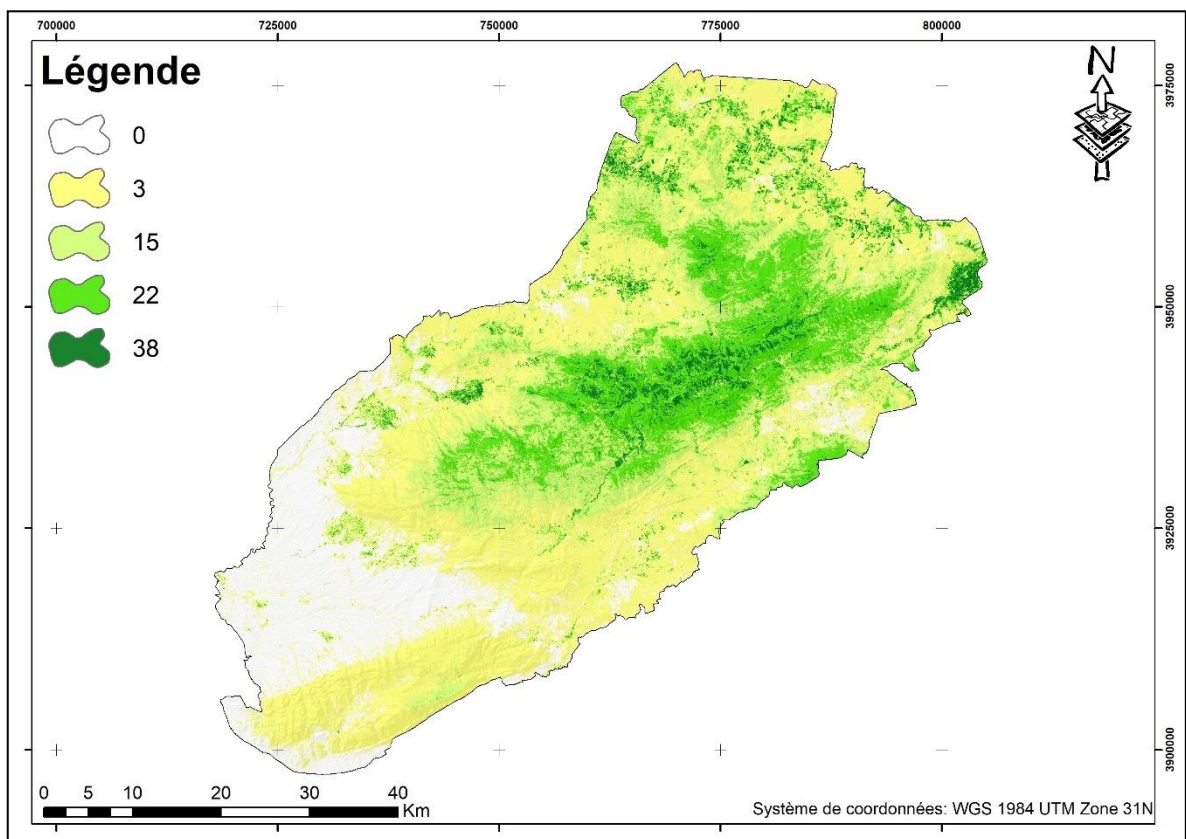


Figure. 36 : Carte de répartition de biovolume.

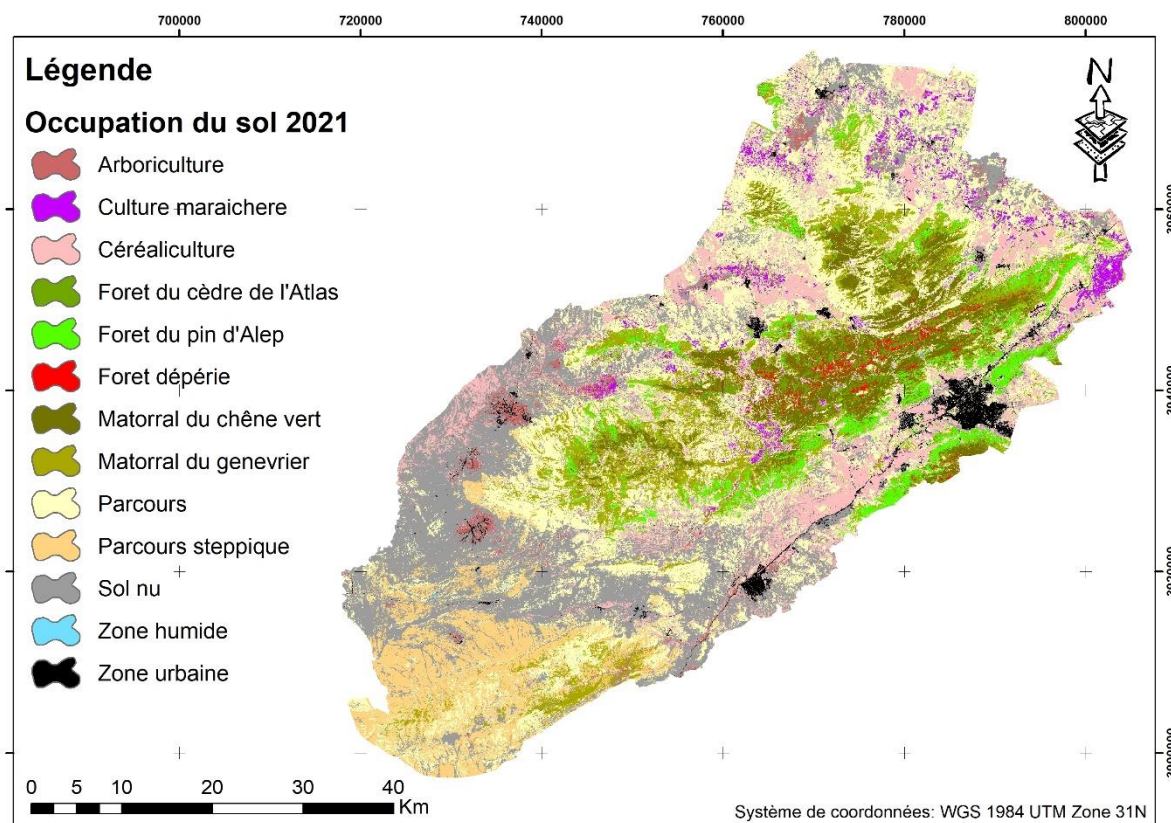
**Tableau. 11** : Les classes de biovolume et leurs poids.

Indice	Valeurs	Poids
<b>Biovolume</b>	0	1
	3	2
	15	3
	22	4
	38	5

Le poids de chaque classe de biovolume est estimé en fonction de l'importance de ce dernier. Il est important de noter que le biovolume peut contribuer à créer des conditions propices à la propagation du feu, notamment dans la saison estivale.

### 3.3.2. Les notes calorifiques

La classification supervisée des images satellites du massif du Belezma a permis d'extraire treize classes d'occupation du sol présentées dans la figure 37, ces 13 classes sont utilisées dans l'extraction du paramètre de la note calorifique des formations végétales selon CEMAGREF (1990) présenté dans le tableau 12.

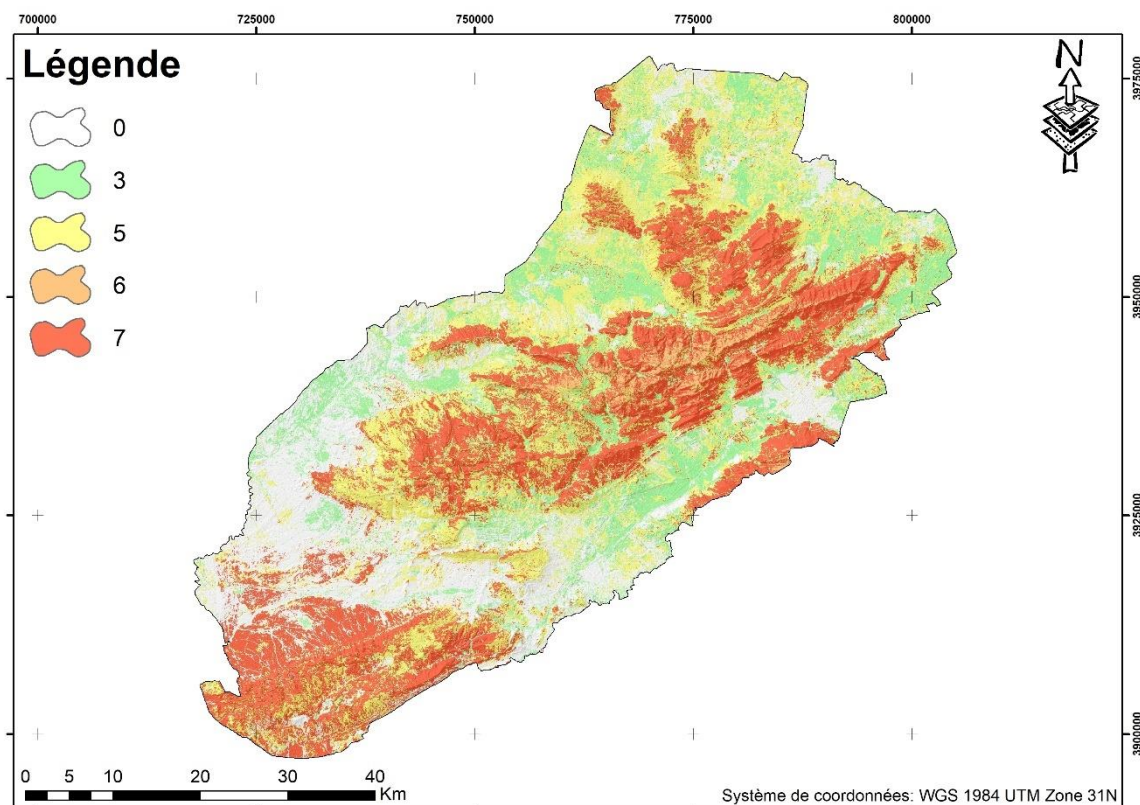


**Figure. 37** : Carte d'occupation du sol 2021.

**Tableau. 12 :** Les différentes classes d'occupation du sol, et les formations végétales et leurs notes calorifiques (CEMAGREF, 1990).

Classes	Superficies (ha)	Espèces dominantes	Notes calorifiques	Poids
Arboriculture	6.171,84	/	3	2
Céréaliculture	42.106,77	/	3	2
Culture maraîchère	6.746,04	/	3	2
Sol nu	74.202,3	/	0	1
Forêt du cèdre de l'Atlas	3.012,39	Cèdre de l'Atlas	6	4
Forêt du pin d'Alep	14.718,24	Pin d'Alep	7	5
Matorral du chêne vert	22.787,28	Chêne vert	7	5
Matorral du genévrier	33.079,5	Genévrier de Phénicie	7	5
Parcours	100.473,2	Romarin, ciste, armoise, thym	5	3
Parcours steppique	27.454,68	Alfa	7	5
Zone urbaine	6.637,77	/	0	1
Zone humide	15,12	/	0	1
Forêt déperis	2.465,64	Cèdre de l'Atlas	6	4

La note du combustible de chaque type de peuplement est la note de combustibilité de l'espèce représentative et abondante du peuplement. Les différentes occupations du sol et de formations végétales sont réparties en cinq classes de notes calorifiques de combustible, présentées dans la figure 38.



**Figure. 38 :** Carte des notes calorifiques du combustible.

La majorité des formations végétales du massif de Belezma ont un degré de combustibilité élevé, sauf quelques espèces à faible dominance.

### 3.3.3. Indice des activités humaines

À la suite de la classification supervisée effectuée sur les images satellitaires Landsat 8 du mai 2021, on a pu extraire les différents types d'activités anthropiques :

Les zones urbaines sont présentées dans la figure 39 ; Les zones agricoles sont présentées dans la figure 40 ; Le réseau routier téléchargé à partir de la plateforme open source (OSM, 2023) présenté dans la figure 41.

Figure. 39 : Carte de répartition des zones urbaines.

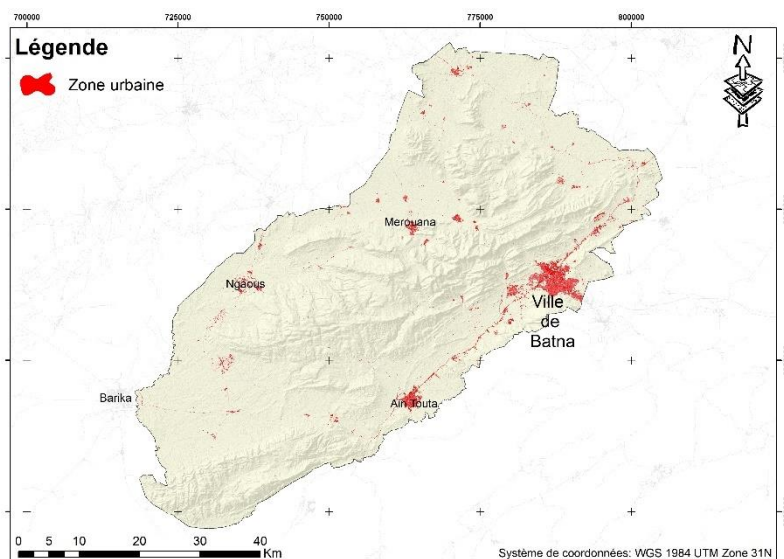
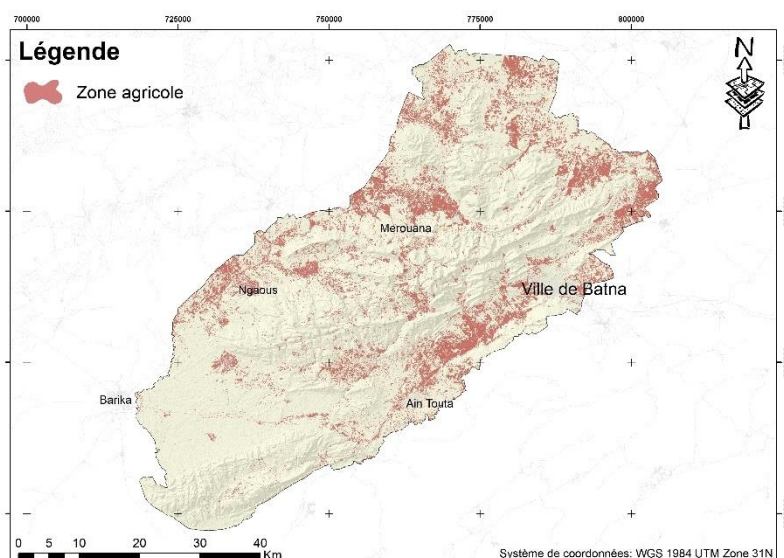
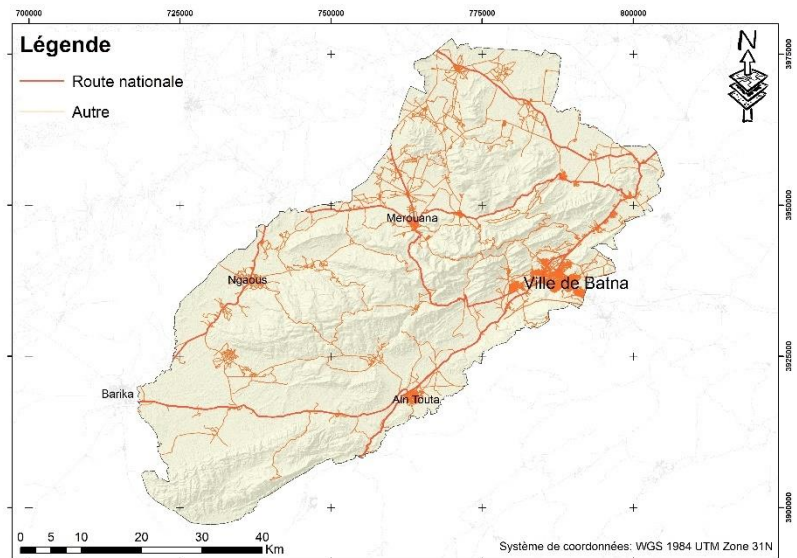


Figure. 40 : Carte de répartition des zones agricoles.



**Figure. 41 :** Carte de répartition du réseau routier.



L'urbanisation est l'un des premiers critères anthropiques qui cause de multiples perturbations sur les écosystèmes et pose un problème sérieux qui menace la biodiversité. Cette urbanisation met en place des structures anthropiques qui provoquent de profonds changements dans les écosystèmes naturels, le critère de proximité aux zones urbaines est présenté selon le tableau 13 (ERTEN *et al.*, 2004) dans la figure 42.

**Tableau. 13 :** Classification des distances des agglomérations (ERTEN *et al.*, 2004).

Critère	Classe	Poids	Risque
Distance à partir des zones urbaines en mètre (m)	< 1000	5	Très élevé
	1000 - 2000	4	Elevé
	2000 - 3000	3	Moyen
	> 3000	2	Faible

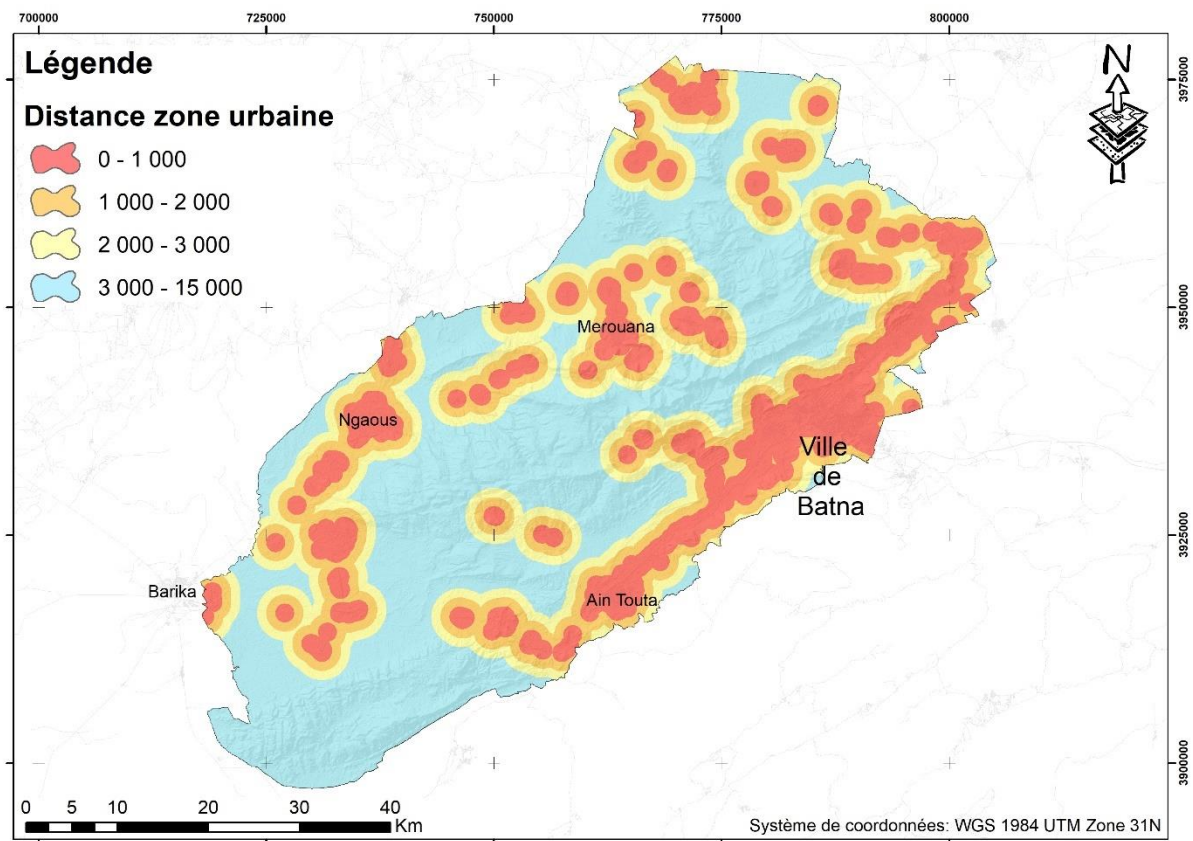


Figure. 42 : Carte de distance des zones urbaines.

La carte de proximité des zones agricoles est un critère important dans le déclenchement des feux de forêts du voisinage, présenté selon le tableau 14 dans la figure 43.

Tableau. 14 : Classification des distances des zones agricoles (ERTEN *et al.*, 2004).

Critère	Classe	Poids	Risque
Distance à partir des zones urbaines en mètre (m)	< 100	5	Très élevé
	100-200	4	Elevé
	200 - 300	3	Moyen
	300-500	2	Faible
	> 500	1	Très faible

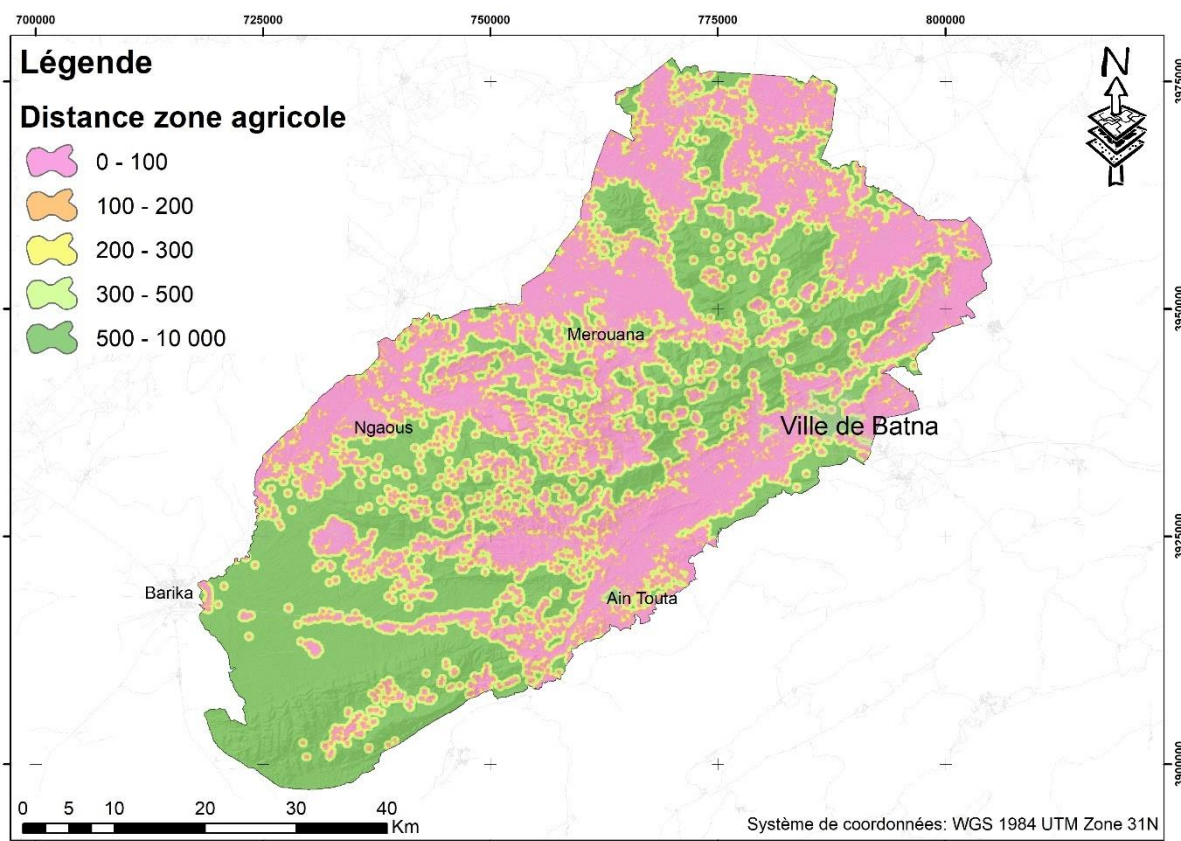


Figure. 43 : Carte de distance des zones agricoles.

La carte de proximité aux réseaux routiers a été élaborée par la technique de l'analyse spatiale, cette technique est appliquée sur les données vectorielles linéaires de tout le réseau routier, routes nationales, wilayales, communales, et pistes, présentées selon le tableau 15 (ERTEN *et al.*, 2004) dans la figure 44.

Tableau. 15 : Classification des distances des routes et pistes (ERTEN *et al.*, 2004).

Critère	Classe	Poids	Risque
Distance à partir des zones urbaines en mètre (m)	< 100	5	Très élevé
	100 - 200	4	Elevé
	200 - 300	3	Moyen
	300 - 400	2	Faible
	> 400	1	Très faible

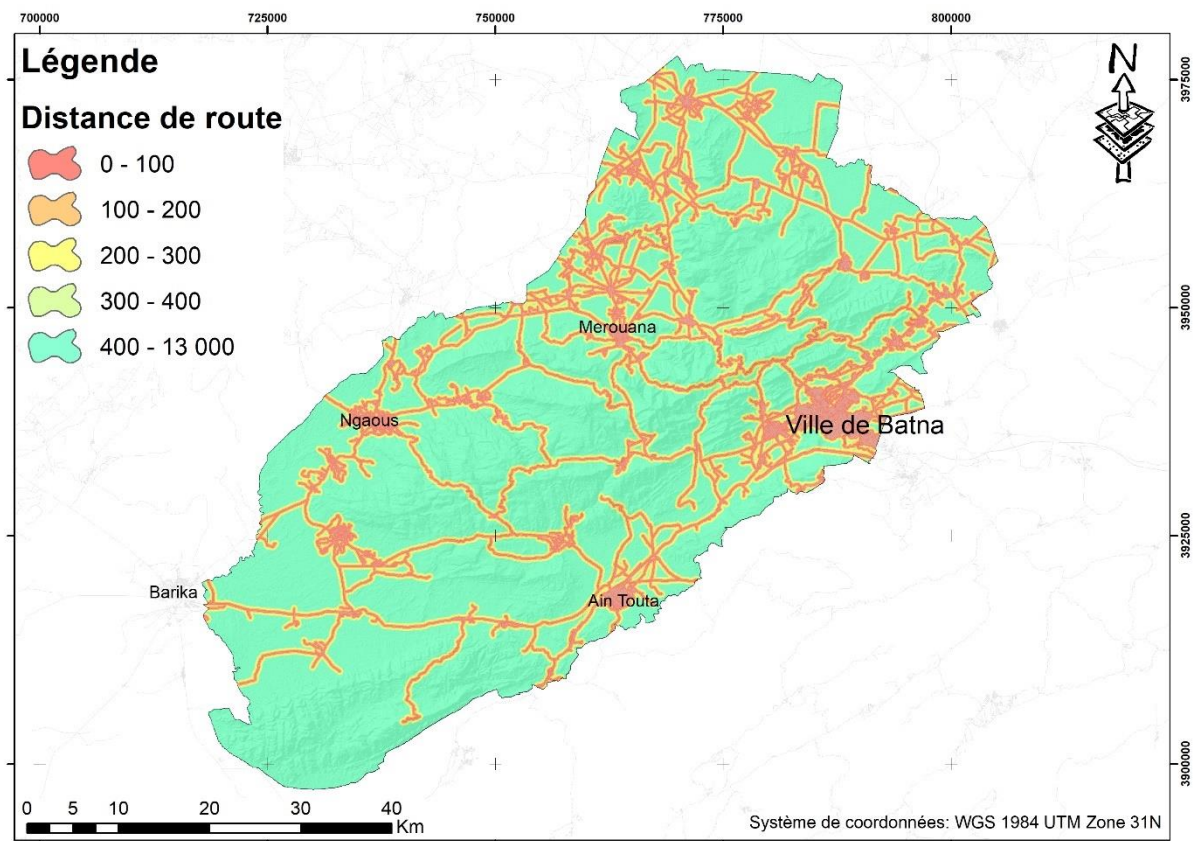


Figure. 44 : Carte de distance du réseau routier.

L'addition des trois paramètres de l'activité humaine nous a permis de calculer l'indice de distance de l'homme IH par l'outil Raster Calculator d'ArcMap selon l'équation (6).

À la suite du tableau 13, 14 et 15, on a pu présenter les quatre degrés de contribution à la création des conditions propices à la propagation du feu de l'indice de distance de l'homme IH selon le tableau 16 dans la figure 45.

Tableau. 16 : Classification de l'indice de distance de l'homme IH.

Indice	Valeur	Degré	Poids
Indice des activités humaines	4-6	Faible	2
	7-9	Moyen	3
	10-12	Elevé	4
	13-15	Très élevé	5

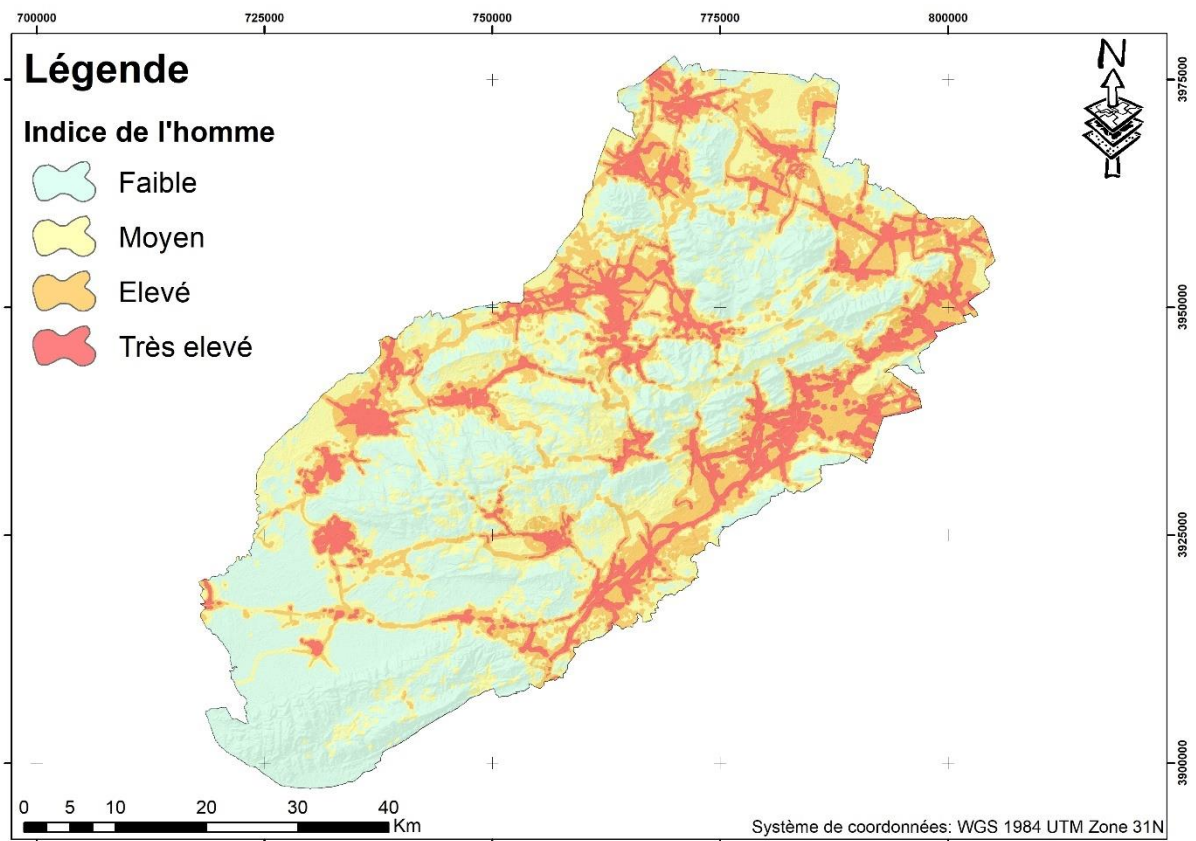


Figure. 45 : Indice de distance de l'homme IH.

**3.3.4. Indice topo-morphologie :** Les deux paramètres sont calculés à partir du modèle numérique de terrain (MNT) à l'aide des outils d'ArcGIS.

L'indice topo-morphologie est calculé par l'équation (5) utilisant l'indice de pente (Figure. 46) et l'indice d'exposition (Figure. 47) qui sont ensuite classés par les normes du modèle adopté (Tableau. 17).

Tableau. 17 : Classification de l'indice des pentes et des expositions (ERTEN *et al.*, 2004).

Indice	Paramètres	Valeurs	Degré	Poids
Indice de pente	Pente « P »	Plaine $P < 5 \%$	Très faible	1
		Piémont bas $5 < P < 10 \%$	Faible	2
		Piémont moyen $10 < P < 25 \%$	Moyen	3
		Haut piémont $25 < P < 35\%$	Elevé	4
		Montagne $P > 35\%$	Très élevé	5
Indice d'exposition	Exposition « E »	Plat	Très faible	1
		Nord	Faible	2
		Ouest	Moyen	3
		Est	Elevé	4
		Sud	Très élevé	5
Indice topo-morphologie	Topo morphologie « IM » <b>P+E</b>	2	Très faible	1
		3-4	Faible	2
		5-6	Moyen	3
		7-8	Elevé	4
		9-10	Très élevé	5

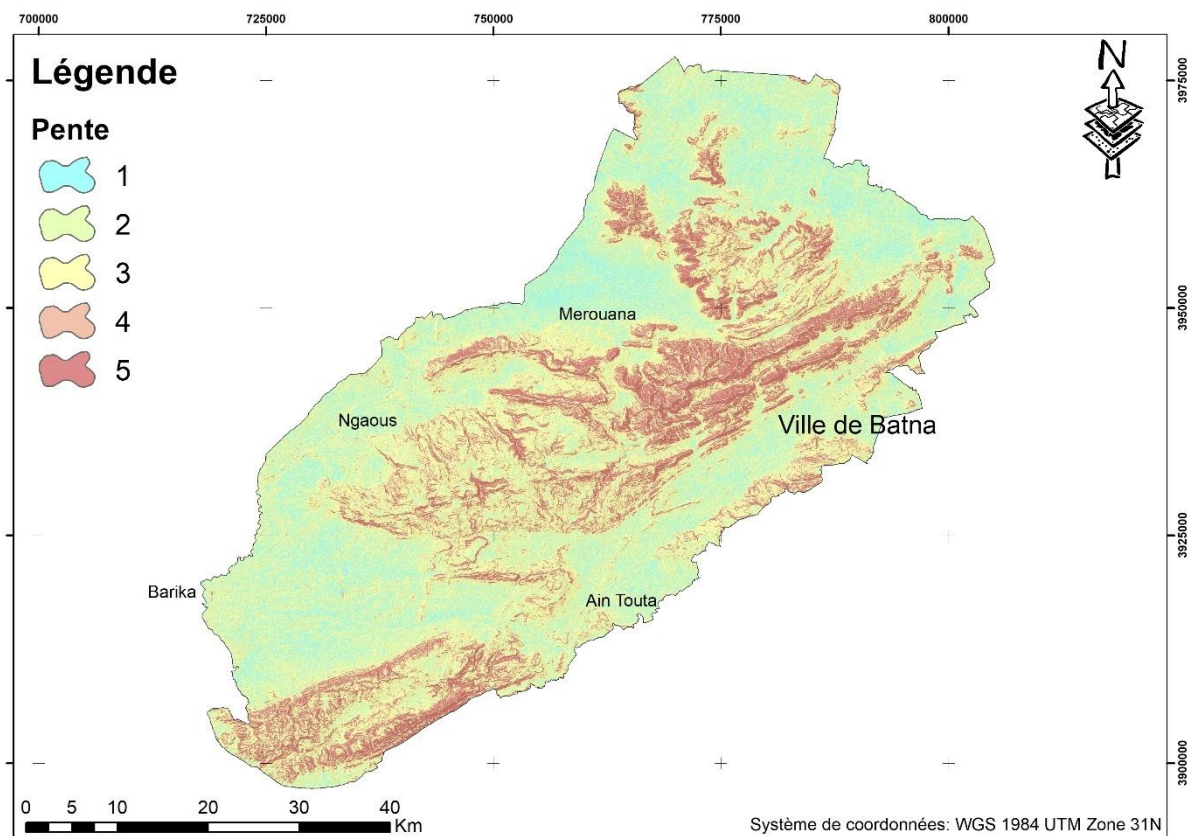


Figure. 46 : Carte d'indice des pentes.

La figure 46 de l'indice des pentes, nous informe que 77,54 % de la zone d'étude présente un risque très faible à moyen, tandis que les zones à risque élevé et très élevé couvrent 22,46 % de la surface totale.

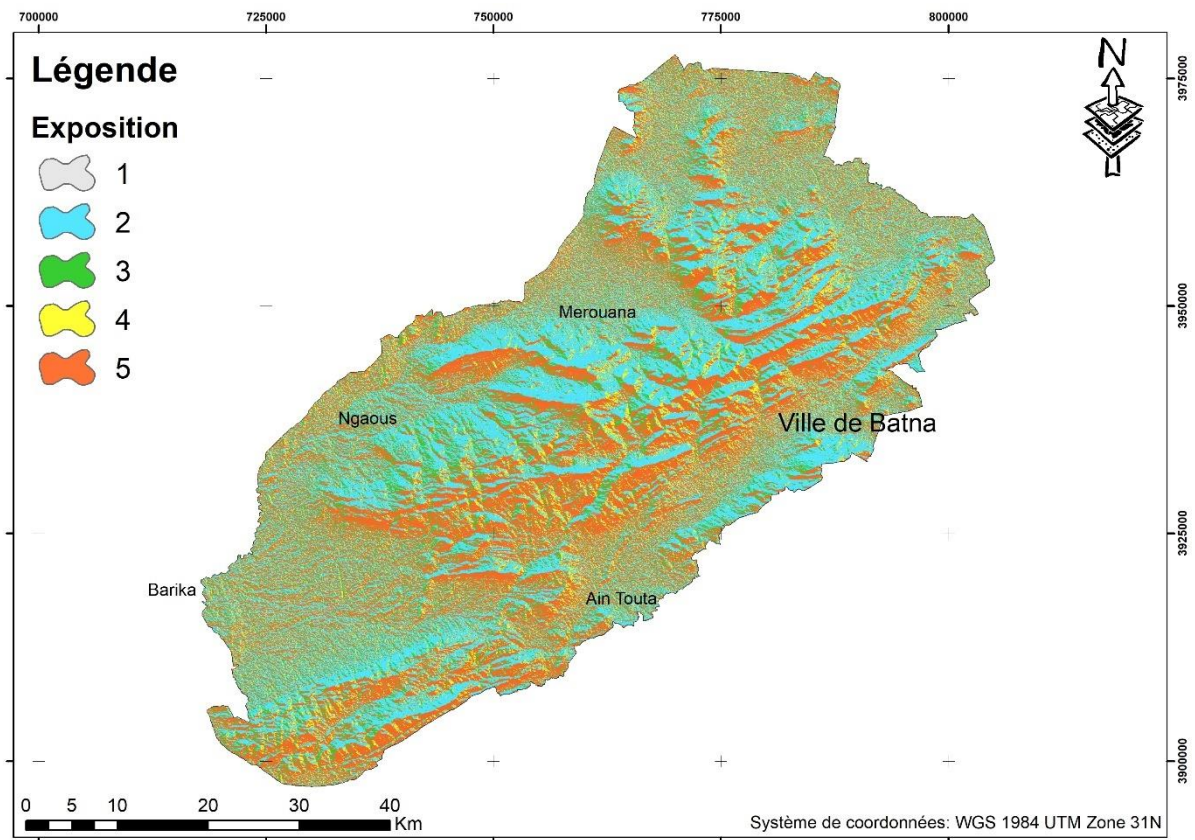


Figure. 47 : Carte d'indice des expositions.

La figure 47 de l'indice des expositions montre que 51,62 % de la zone d'étude présente un risque allant de très faible à moyen pour les terrains plats ainsi que pour les expositions Nord et Ouest. 10,18 % de la zone d'étude est occupée par un risque élevé pour l'exposition Est. Et 38,20 % de la surface totale est occupée par un risque très élevé pour l'exposition Sud.

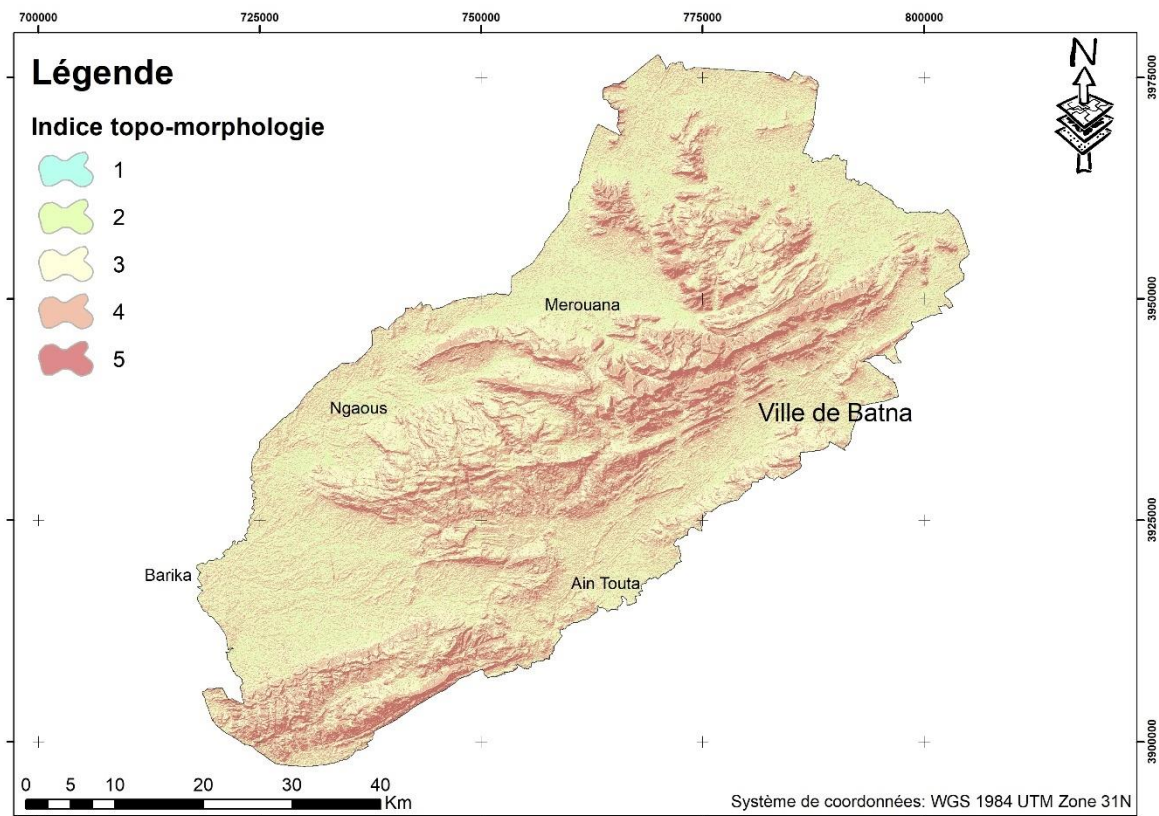


Figure. 48 : Carte d'indice topo morphologie.

La figure 48 d'indice topo morphologie montre que 55,49 % de la zone d'étude est occupée par un risque d'incendie très faible à moyen. 34,76 % est occupée par un risque élevé. Et 9,76 % de la surface totale est occupée par le risque très élevé.

### 3.3.5. L'indice de risque aux incendies de forêts IR

Dans cette étape du traitement, on dispose de toutes les couches d'informations géographiques, en mode Raster, avec la même résolution spatiale et le même système de coordonnées, associées à chacun des paramètres du modèle.

Avant de développer l'agrégation des différents critères qui interviennent dans le déclenchement et la propagation d'un incendie, nous avons suivi l'analyse hiérarchique multicritère, méthode (Analytical Hierarchy Process, AHP) développée par SAATY.

Cette méthode permet de produire des poids standardisés dont la somme est égale à "1". Elle est basée sur une série de comparaisons par paires de ces critères à partir de la construction d'une matrice carrée prenant en compte l'importance relative d'un critère par rapport à un autre, pour l'établissement de telles mesures à l'aide de l'échelle de SAATY (Tableau, 18) qui prend les valeurs de 1 à 9, ces valeurs permettant de remplir une matrice pour une comparaison par paire (Tableau, 19) (BOUZEKRI *et al.*, 2016).

**Tableau. 18 :** Critères de comparaison par paire de l'échelle numérique (SAATY, 1986).

Expression d'un critère par rapport à un autre	Degrés d'importance
Importance égale des deux critères	1
Un critère est un peu plus important que l'autre	3
Un critère est plus important que l'autre	5
Un critère est bien plus important que l'autre	7
Un critère est absolument plus important que l'autre	9
Un critère est un peu moins important que l'autre	1/3
Un critère est moins important que l'autre	1/5
Un critère est bien moins important que l'autre	1/7
Un critère est absolument moins important que l'autre	1/9

**Tableau. 19 :** Matrice pour une comparaison par paire (SAATY, 1986).

Critères	Biovolume BV	Notes calorifiques	Topo-morphologie	Indice de l'homme
Biovolume BV	1,00	0,14	0,50	0,11
Notes calorifiques	7,00	1,00	5,00	0,50
Topo-morphologie	2,00	0,20	1,00	0,33
Indice de l'homme	9,00	2,00	3,00	1,00

Dans cette étape, les critères de décision ont été agrégés, le biovolume, la note calorifique, la topo-morphologie et l'indice de l'homme, qui ont été compilés par la méthode de la somme pondérée en fonction de leurs poids. Chaque couche normalisée a été multipliée par son coefficient de pondération correspondant dans le tableau 20.

**Tableau. 20 :** Le poids des critères utilisés.

Critères	Poids
Biovolume BV	0,05
Note	0,36
Topo-morphologie	0,11
l'indice de l'homme	0,48

La dernière étape consiste à calculer un taux de cohérence (CR) pour mesurer la cohérence des jugements par rapport à de grands échantillons de jugements purement aléatoires. SAATY suggère que, si ce rapport dépasse 0,1 l'ensemble des jugements peut être trop incohérent et peu fiable. Si le rapport de cohérence CR vaut 0 alors cela signifie que les jugements sont

parfaitement cohérents (SAATY, 1977). Le rapport de cohérence (CR) dans cette étude est égal à 0,04.

L'indice de risque d'incendie de forêt dans la zone d'étude est calculé par la combinaison des couches, par la méthode de la somme pondérée, en fonction de leur poids. La couche résultante a été utilisée pour déterminer le niveau de risque aux incendies de forêt, dans la zone d'étude présenté dans la figure 49.

**Tableau. 21 :** Superficie et pourcentage des classes de risque.

Classes du risque	Pourcentage %
Faible	10,76
Moyen	43,76
Elevé	42,98
Très élevé	2,50

D'après la figure 49 et le calcul des superficies de chaque niveau de risque, présenté dans la figure 50 et le tableau 21, on peut dire que la carte met en évidence les classes à risque élevé et très élevé qui occupent 45,48 % de la superficie totale. Ces deux classes présentent les zones recouvertes de forêts, de matorrals et de parcours avoisinant les routes, les zones urbaines ainsi que les terres agricoles.

La classe de risque moyenne couvre 43,76 % de la superficie totale. Cette classe présente les parcours et les forêts d'altitude de cèdre notamment dans l'exposition Nord, qui sont loin des perturbations anthropiques.

La classe de risque faible couvre 10,76 % de la superficie totale, couvre les terrains nus et les zones urbaines.

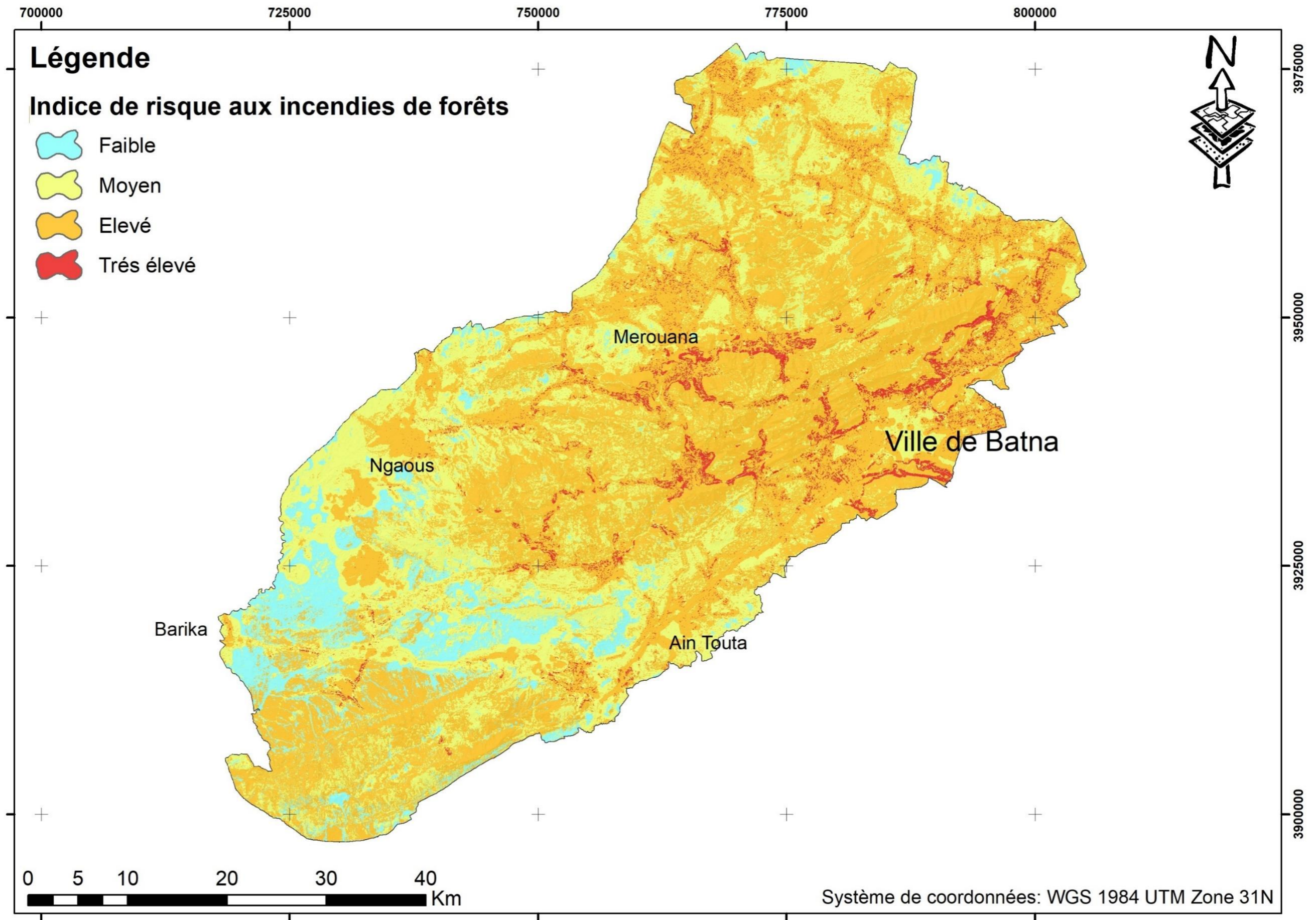


Figure. 49 : Carte de risque aux incendies de forêts.

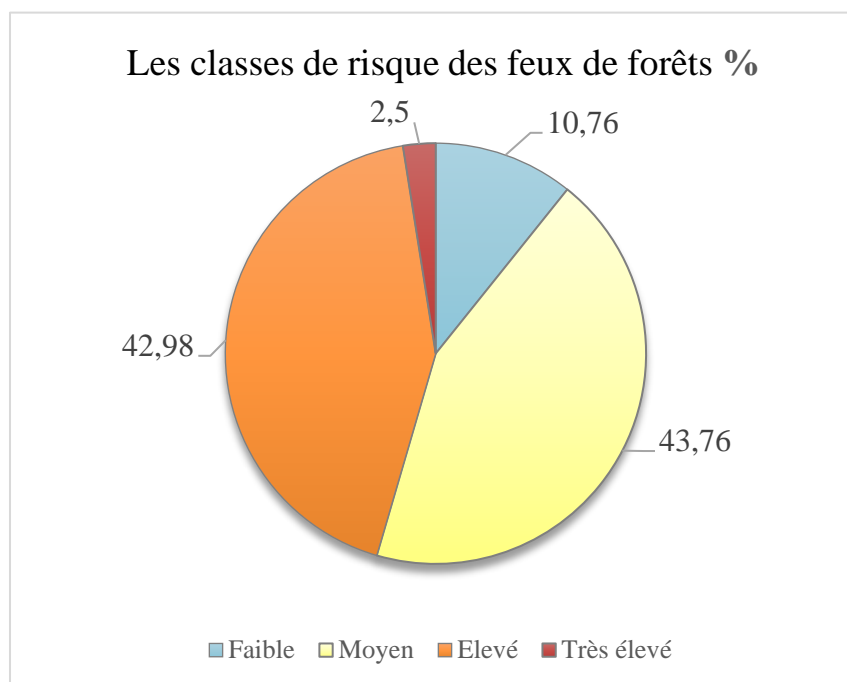


Figure. 50 : Pourcentage des classes de risque.

### 3.3.6. Validation du modèle

La superposition des zones incendiées des 22 dernières années, entre 2000 et 2021, importées d'EFFIS (2022) The European Forest Fire Information System, disponible dans (<https://effis.jrc.ec.europa.eu/>), présentées dans la figure 51 et le tableau 22.

Tableau. 22 : La superficie des incendies enregistrés dans la zone d'étude entre 2000 et 2021 (EFFIS, 2022).

N°	Début d'incendie	Fin d'incendie	Superficie (ha)
1	01/08/2005	05/08/2005	1614
2	28/07/2009	28/07/2009	4026
3	08/08/2009	08/08/2009	2149
4	26/08/2009	26/08/2009	366
5	28/07/2009	28/07/2009	362
6	28/07/2009	28/07/2009	2192
7	31/07/2010	31/07/2010	1518
8	28/08/2010	28/08/2010	2124
9	22/07/2011	22/07/2011	33
10	11/08/2012	11/08/2012	109
11	13/08/2012	13/08/2012	1788

12	17/07/2012	17/07/2012	543
13	24/06/2012	24/06/2012	107
14	24/08/2012	24/08/2012	381
15	01/07/2012	01/07/2012	256
16	23/08/2013	23/08/2013	171
17	14/07/2017	17/07/2017	96
18	16/07/2018	18/07/2018	376
19	01/08/2020	01/08/2020	216

Le système européen d’information sur les incendies de forêt, ne déclare que les incendies d’une superficie assez grande et détectables par les images satellitaires de MODIS, VIIRS et Sentinel. La plupart des incendies, sont enregistrés dans les mois de juillet et d’août. Le massif a connu 19 incendies, d’une superficie totale de 18.427 ha, soit 24,24 % de la superficie forestière, avec une moyenne d’environ 850 ha/an, ce qui indique le degré élevé, de sensibilité du couvert végétal aux incendies dans cette zone.

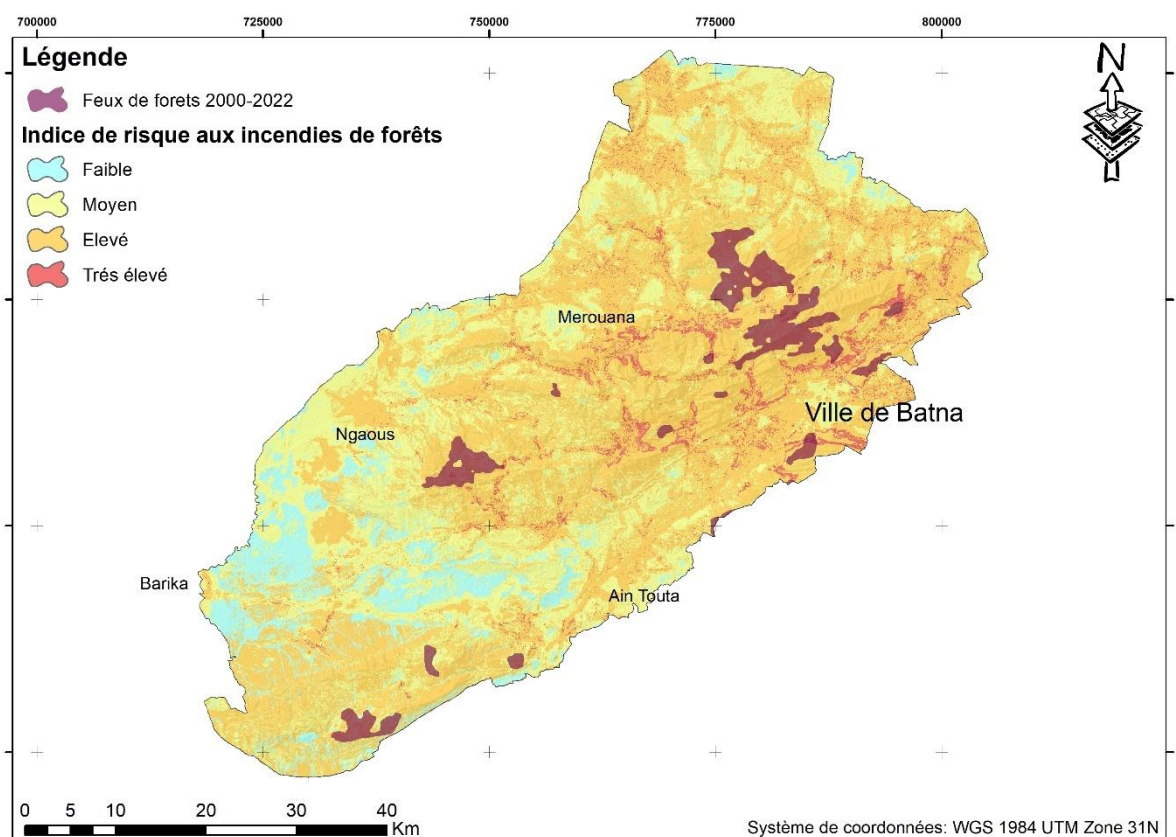


Figure. 51 : Carte de répartition des incendies dans les années 2000-2021 (EFFIS, 2022).

La figure 51 présente clairement que tous les incendies déclarés entre 2000 et 2021, sont localisés dans les classes de sensibilité élevée et très élevée, ce qui nous a permis de valider ce modèle pour cette zone.

### **Conclusion**

La télédétection et les SIG sont des techniques à apport considérable, dans le cadre de la gestion durable des ressources naturelles. Le SIG et les méthodes d'analyse multicritère hiérarchique (AHP) ont été utilisés dans cette étude. Nous avons pris en compte les critères de topographie, de combustibilité et de biovolume des formations végétales et du facteur anthropique, car l'intégration de ces quatre paramètres dans le SIG peut être très utile pour déterminer la carte des risques aux incendies, et pour planifier la gestion forestière pour prévenir les incendies.

La carte finale montre la vulnérabilité de la zone d'étude aux incendies de forêt. Nous avons constaté que les classes à risque élevé et très élevé occupent 45,48 % de la surface totale. Cette superficie représente la majeure partie du couvert forestier.

Les résultats de cette étude montrent les différents degrés de vulnérabilité dans la zone d'étude, par sa composition végétale hautement combustible, les activités anthropiques et la topomorphologie, mais il reste encore d'intégrer d'autres facteurs météorologiques tels que la température, l'humidité de l'air et la vitesse et la direction du vent.

Enfin, le renforcement du dispositif de lutte contre les incendies revêt une importance cruciale, en particulier dans les zones à risque élevé et très élevé. Cela englobe toutes les actions de prévention et de lutte contre ce risque.

**CHAPITRE IV :**  
CARTOGRAPHIE ET MODÉLISATION DES  
RISQUES D'ÉROSION HYDRIQUE DANS  
LA RÉGION DE BELEZMA

## **Introduction**

L'érosion hydrique des sols est à l'origine de multiples enjeux environnementaux et socio-économiques tels que la diminution de la productivité des terrains agricoles, l'envasement des barrages, l'augmentation du risque d'inondation (TOUAHIR *et al.*, 2018). Il est donc impérativement primordial d'établir une évaluation détaillée de ce processus avant tout aménagement.

La modélisation et la cartographie des risques potentiels de l'érosion hydrique des sols a une grande importance, car elles permettent d'évaluer spatialement et quantitativement les effets de l'érosion des sols et de faire face à ce phénomène, ainsi de proposer les meilleures stratégies de lutte et de conservation des ressources naturelles et d'aménagement des terrains. Elles sont nécessaires pour déduire l'étendue et l'ampleur des problèmes d'érosion des sols afin d'assurer la stabilité à long terme des sols et de contribuer à la protection de la biodiversité par des stratégies de gestion efficaces.

Cependant, la complexité de ce phénomène rend difficile son estimation. L'avancement des technologies spatiales, et des outils de collecte d'informations géographiques à distance, a enrichi les approches traditionnelles, offrant des moyens plus performants pour la mesure, l'analyse et la gestion des données.

Dans ce chapitre, on a calculé les différents facteurs du modèle RUSLE en tenant compte des données existantes. La méthodologie adoptée doit atteindre l'objectif d'offrir une possibilité pour la cartographie rapide et à moindre coût le risque de l'érosion hydrique à l'échelle de notre zone d'étude.

Vu l'importance de l'application de cette méthode conjuguée à l'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG), et l'équation universelle de pertes en sol (WISCHMEIER et SMITH, 1978), USLE est composée de six facteurs qui permettent d'obtenir une estimation de l'érosion hydrique. Cette approche contribue également à la priorisation des zones pour la conservation.

### **4.1. Matériel et méthodologie**

#### **4.1.1. Données utilisées**

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé les données suivantes :

- Données climatiques de trois stations (Ain Skhouna, Ain Touta et Barika) obtenues de la station météorologique de Batna 1989-2017 (ONM, 2018).

- Modèle numérique de terrain (MNT) SRTM ; d'une résolution de 30 mètre, qui a été téléchargé gratuitement de la plateforme Earth Explorer sur le site : <https://earthexplorer.usgs.gov/> (2022).
- Image satellitaire LANDSAT 8. OLI\_TIRS, qui a été téléchargée gratuitement sur le site : <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Carte pédologique téléchargée à partir de la base des données HWSD (<https://gaez.fao.org/pages/hwsd>, 2022), c'est une base de données mondiale harmonisée sur les sols (HWSD), qui a été créée en 2008 par l'Institut international d'analyse des systèmes appliqués (IIASA) et la FAO. La saisie et l'harmonisation des données au sein d'un système d'information géographique (SIG) ont été réalisées à l'IIASA, avec une vérification de la base de données entreprise par tous les partenaires. HWSD a été mis à jour en 2013 (HWSD, 2013).
- Cartes d'état-major de la zone d'étude (Institut national de la cartographie et de la télédétection (INCT, 2004).
- Logiciels utilisés : ArcMap 10.8 en utilisant les outils d'analyse spatiale.

#### **4.1.2. Méthodologie de travail**

La démarche méthodologique proposée dans ce travail consiste à effectuer une estimation des pertes de sol moyennes annuelles dans la zone d'étude, à l'aide du modèle empirique des pertes en sols RUSLE.

Les paramètres de ce dernier sont calculés grâce au traitement et à l'analyse spatiale des données concernant les précipitations, le type du sol, l'occupation du sol, la géomorphologie et les données dérivées telles que les pentes.

L'équation a été intégrée dans le SIG en utilisant ArcMap 10,8. Ce dernier a permis la numérisation de toutes les couches de l'information requises avec l'évaluation du taux annuel moyen d'érosion hydrique sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure. 52).

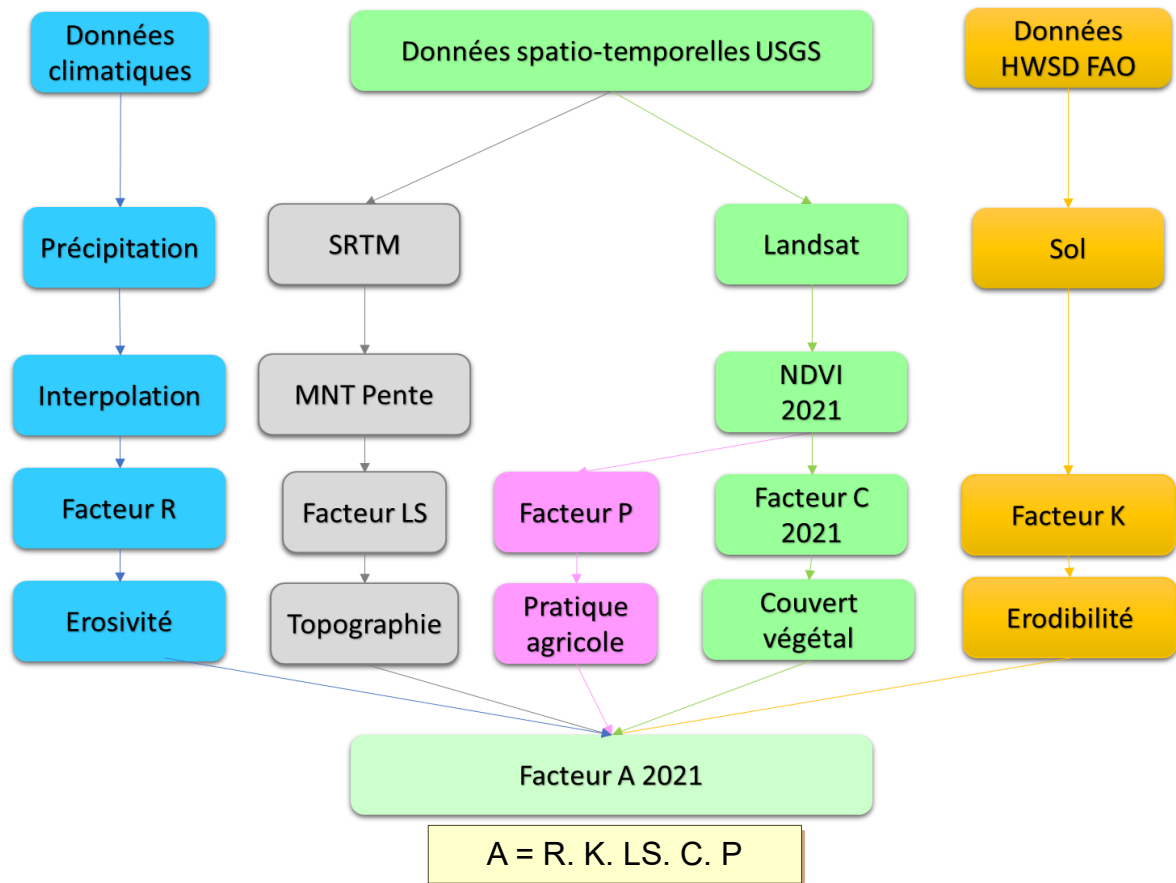


Figure. 52 : Organigramme méthodologique.

Le modèle utilisé est celui du RUSLE, qui est une abréviation pour Revised Universal Soil Loss Equation. C'est un modèle empirique qui a pour objectif de quantifier l'érosion des sols qui reprend les termes de USLE.

L'équation universelle de pertes en sol (WISCHMEIER et SMITH, 1978) s'applique à la quantification des pertes en sol par l'érosion hydrique, en utilisant l'équation 1.

$$\text{Equation (1) : } A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Où :

- A : exprime les pertes en sol annuelles moyennes possibles à long terme (t/ha/an) ;
- R : exprime l'indice d'érosivité des pluies (MJ.mm/ha/h/an) ;
- K : exprime l'indice d'érodibilité des sols, et dépendant de la granulométrie, de la quantité de la matière organique, de la perméabilité et de la structure du sol (t.ha.h/ha/MJ.mm) ;
- LS : exprime le facteur de déclivité (topographie) ;
- C : exprime le facteur de végétation ;
- P : exprime le facteur de pratique de soutien, c'est un rapport qui tient en compte des techniques culturales antiérosives telles que le labour en courbe de niveau.

## 4.2. Résultats et discussion

### 4.2.1. Indice d'érosivité potentielle des précipitations (R)

Le facteur R reflète l'interaction entre la surface du sol et l'énergie cinétique des gouttes de pluie, déterminé par la quantité de précipitations dans une certaine période (WISCHMEIER et SMITH, 1978).

Les précipitations jouent un rôle initial pour provoquer l'érosion. WISCHMEIER et SMITH (1978) ont corrélé plus de 40 facteurs climatiques ou météorologiques (hauteur de précipitation, différentes intensités caractéristiques, les conditions antécédentes de précipitations ou d'humidité, etc.) et leur relation avec l'érosion sur des parcelles standards nues et cultivées dans le sens de la pente.

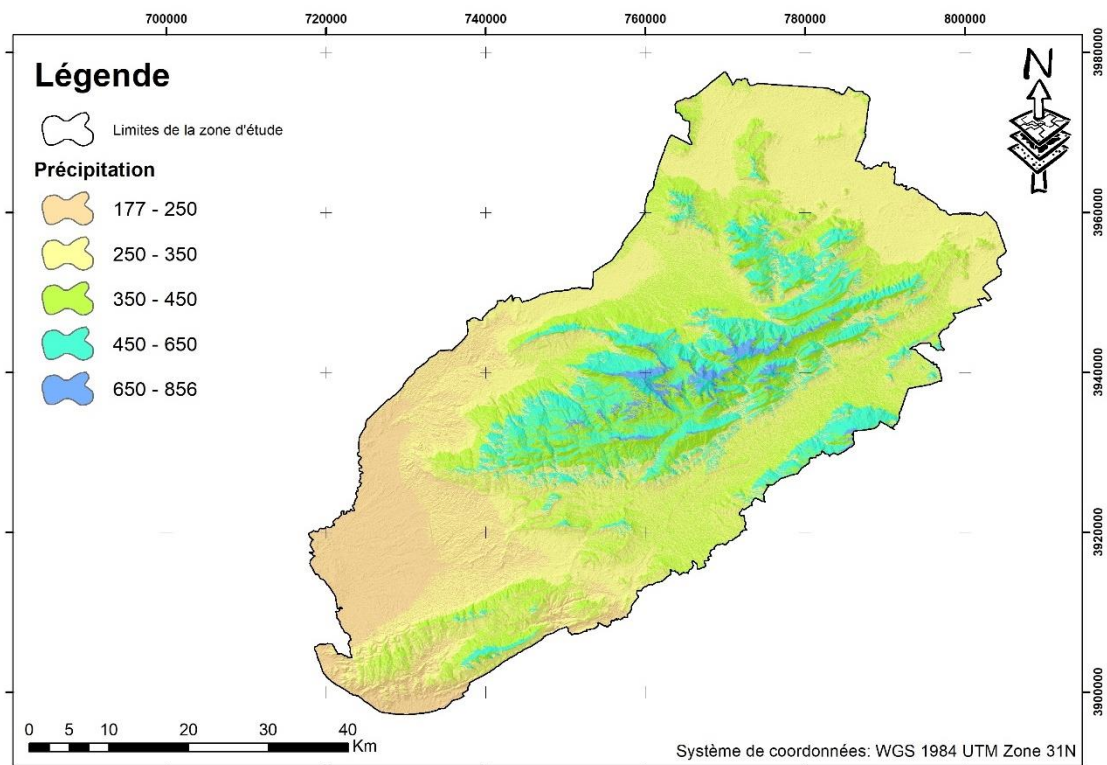


Figure. 53 : Carte des précipitations moyennes annuelles.

Les seules données disponibles concernant les précipitations dans les stations d'Ain Skhouna, d'Ain Touta et de Barika, sont des moyennes annuelles qui couvrent la zone d'étude. Où la carte des précipitations a été réalisée par la méthode de l'extrapolation. Certains auteurs (RENARD et FREIMUND, 1994) ont utilisé des formules basées sur les précipitations annuelles pour déterminer le facteur R. Les valeurs du facteur R sont déterminées pour la zone d'étude à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Equation (2) : } R=0,0483 P^{(1,610)} \text{ si } P < 850 \text{ mm}$$

Où P : les précipitations moyennes annuelles (mm), ONM 2018.

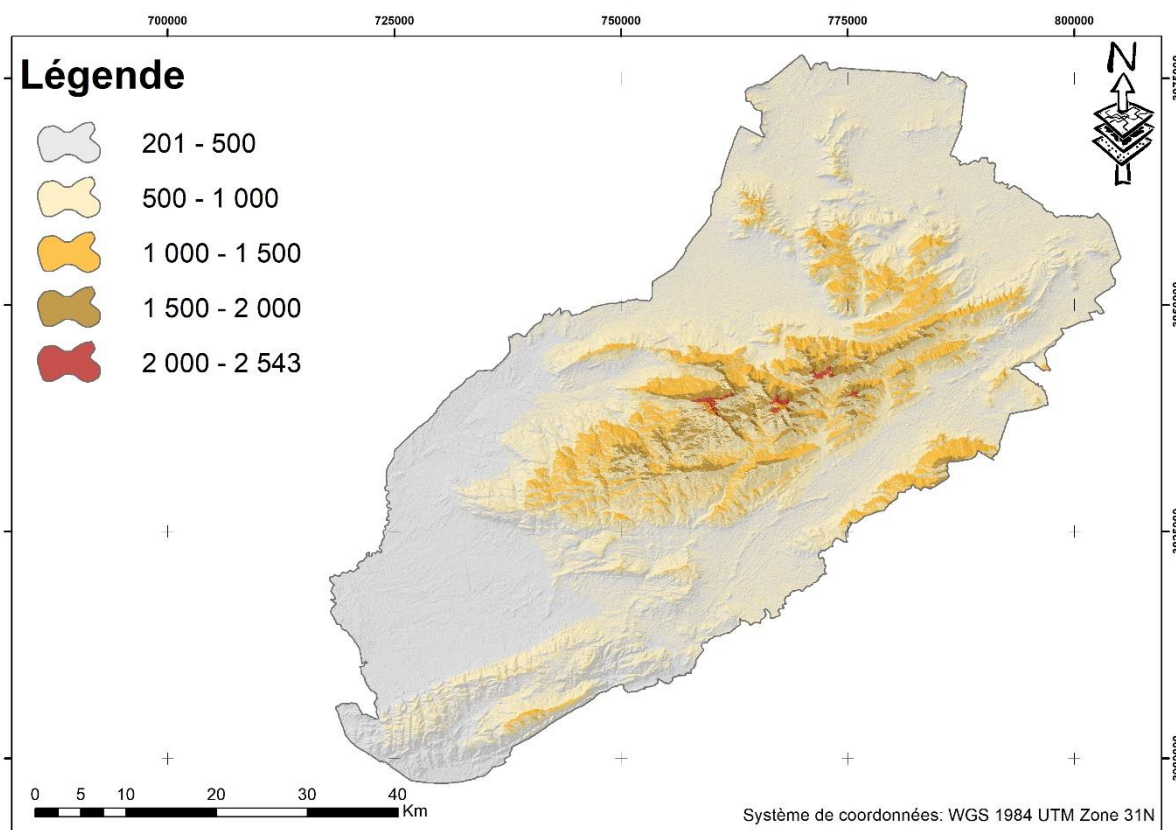


Figure. 54 : Carte d'indice d'érosivité potentielle des précipitations R.

La carte obtenue dans la figure 54, présente le facteur R avec des valeurs qui varient de 201 à 2.543 MJ mm/ha/h/an, les valeurs les plus élevées se localisent dans les altitudes au Nord et au Nord-Ouest de la région.

#### 4.2.2. Indice d'érodibilité des sols (K)

Les sols diffèrent selon leur résistance à l'érosion en fonction de la texture, de la structure, de la rugosité, de la teneur en matière organique et du degré d'humidité du sol. L'érodibilité du sol K est la susceptibilité du sol à l'érosion. Le facteur d'érodibilité des sols et le taux d'érosion sont déterminés expérimentalement sous des conditions normalisées.

Le facteur K a été extrait à partir de la base de données HWSD présentée par la FAO.

La zone d'étude a été découpée de la couche globale HWSD de la FAO, ensuite nous avons extrait les propriétés physiques (limon, sable, argile et matière organique (le taux organique carbone)) à travers la base de données HWSD.

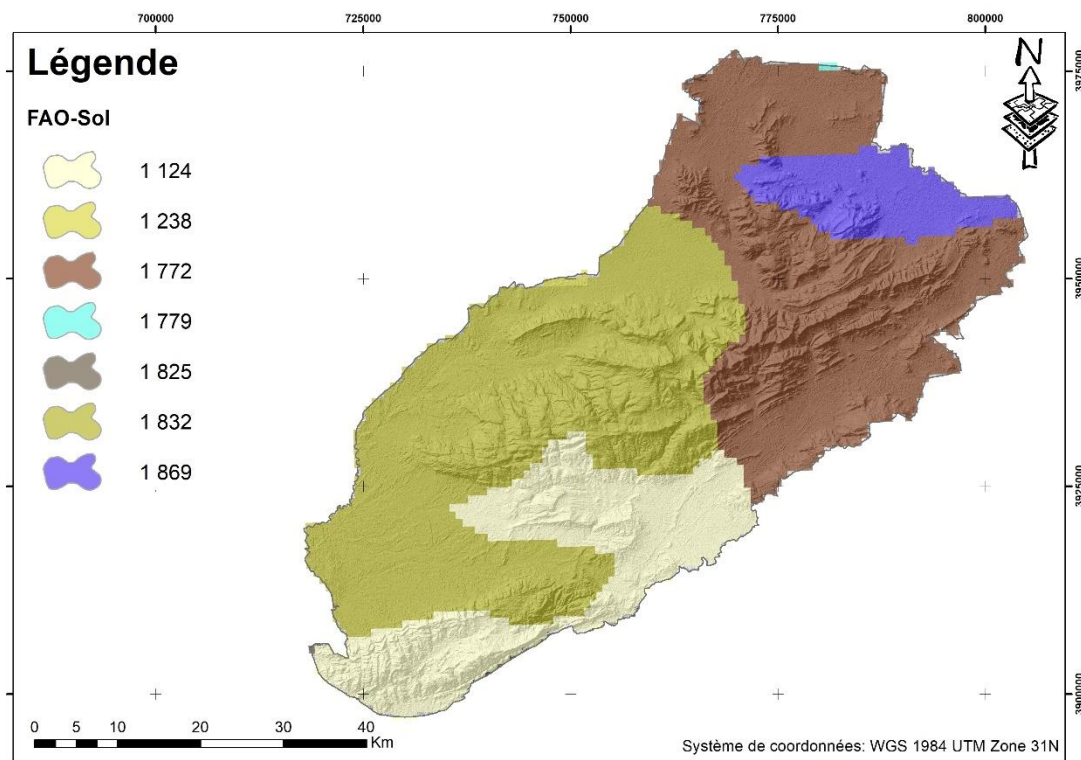


Figure. 55 : Carte des différents types de sol selon les propriétés physiques (HWSD, 2013).

Tableau. 23 : Les propriétés physiques des différents types de sol.

ID	FAO sol-code	% Sable	% Limon	% Argile	% Matière Organique	Texture classe	K
38459	1124	38	41	21	1,0836	Limoneux	0,34
38725	1238	43	34	23	2,408	Limoneux	0,26
40002	1772	39	40	21	1,204	Limoneux	0,34
40014	1779	40	37	23	0,9632	Limoneux	0,34
40115	1825	41	39	20	0,7052	Limoneux	0,34
40131	1832	39	37	24	0,6364	Limoneux	0,34
40209	1869	16	31	53	0,9976	Argileux	0,24

Source : (HWSD, 2013).

La figure 55 et le tableau 23 illustrent la répartition des sols à texture limoneuse dans la majeure partie de la zone d'étude, à l'exception de la partie Est, où l'on observe la présence de sols à texture argileuse.

Les valeurs du facteur K ont été prises à partir d'un tableau d'estimation de l'érodibilité du sol, en fonction de la texture du sol et de la présence de la matière organique.

Tableau. 24 : Estimation de l'érodibilité du sol en fonction de la texture du sol et de la présence de matière organique.

Classe texturale	Composition du sol			Moyenne K basé sur le % de la matière organique		
	Sable	Limon	Argile	Inconnu	< 2%	≥ 2%
Argile	0-45	0-40	40-100	0,22	0,24	0,21
Argile sableux	45-60	0-20	35-55	0,2	0,2	0,2
Argile limoneux	0-20	40-60	40-60	0,26	0,27	0,26
Sable	86-100	0-14	0-10	0,02	0,03	0,01
Limon sableux	50-70	0-50	0-20	0,13	0,14	0,12
Argile limoneux	20-45	15-52	27-40	0,3	0,33	0,28
Limon	23-52	28-50	7-27	0,3	0,34	0,26
Sable limoneux	70-86	0-30	0-15	0,04	0,05	0,04
Limon argile sableux	45-80	0-28	20-35	0,2	0,2	0,2
Argile limon limoneux	0-20	40-73	27-40	0,32	0,35	0,3
Limon	0-20	88-100	0-12	0,38	0,41	0,37
Limon limoneux	20-50	74-88	0-27	0,38	0,41	0,37

Source : (ROOSE, 1996).

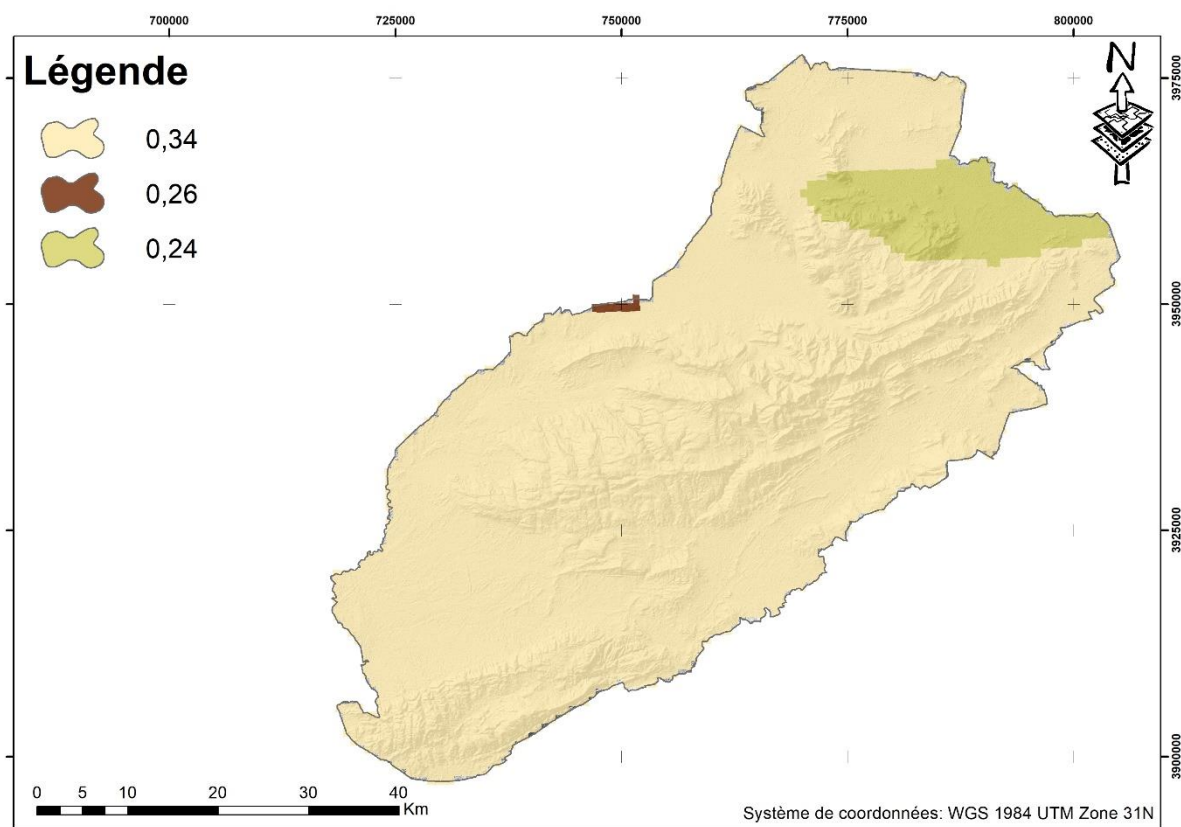


Figure. 56 : Carte du facteur K de la zone d'étude.

La figure 56 illustre la répartition de l'érodibilité du sol en fonction de la texture du sol et de la présence de la matière organique. K est compris entre 0,24 et 0,34 t.ha.h/ha/MJ.mm.

Les propriétés physiques du sol étant légèrement variables, K varie en fonction des sols dans cette région. Les textures limoneuses et argileuses ont été identifiées.

### 4.2.3. Facteur topographie LS

Le facteur topographique est l'un des principaux facteurs de l'érosion. Le degré de pente, joue un rôle important dans le processus de détachement, de transport et de dépôt des particules de sol. Le facteur LS fait référence à la topographie de la région, qui se manifeste par deux sous-facteurs : la longueur de la pente (L) et le degré de la pente (S), la valeur LS pour évaluer globalement l'influence de la pente sur la vitesse de l'érosion. Les facteurs L (longueur de pente) et S (angle de la pente en %) sont le plus souvent combinés en un facteur unique adimensionnel LS afin de définir l'effet de l'érosion en nappe et en rigoles.

L'angle et la longueur de pente peuvent être calculés selon l'équation de WISCHMEIER, basée sur des parcelles expérimentales. Elle constitue l'équation de référence développée par MOORE et BURCH (1986) (Équation 3), la plus utilisée, permettant de définir le facteur LS par :

$$\text{Equation (3) : } LS = ((\text{flow accumulation} * \text{résolution}/22,13)^m) * (0,065 + 0,045 * S + 0,0065 * S^2)$$

S= La pente en %

La valeur de m, faisant référence à un coefficient lié à la pente, variait de 0,2 à 0,5. Le facteur m est définie précédemment selon le tableau 25. Pour notre cas, la majorité des pentes de la zone d'étude sont de plus de 5 %. Le facteur m est égal à 0,5 (SOMPRASONG *et al.*, 2015).

**Tableau. 25 :** Les valeurs de facteur (m) qui dépend de pourcentage de pente.

Pourcentage de la pente (%)	Facteur (m)
> 5	0,5
3,5 < $\theta$ < 5	0,4
1 < $\theta$ < 3,5	0,3
< 1	0,2

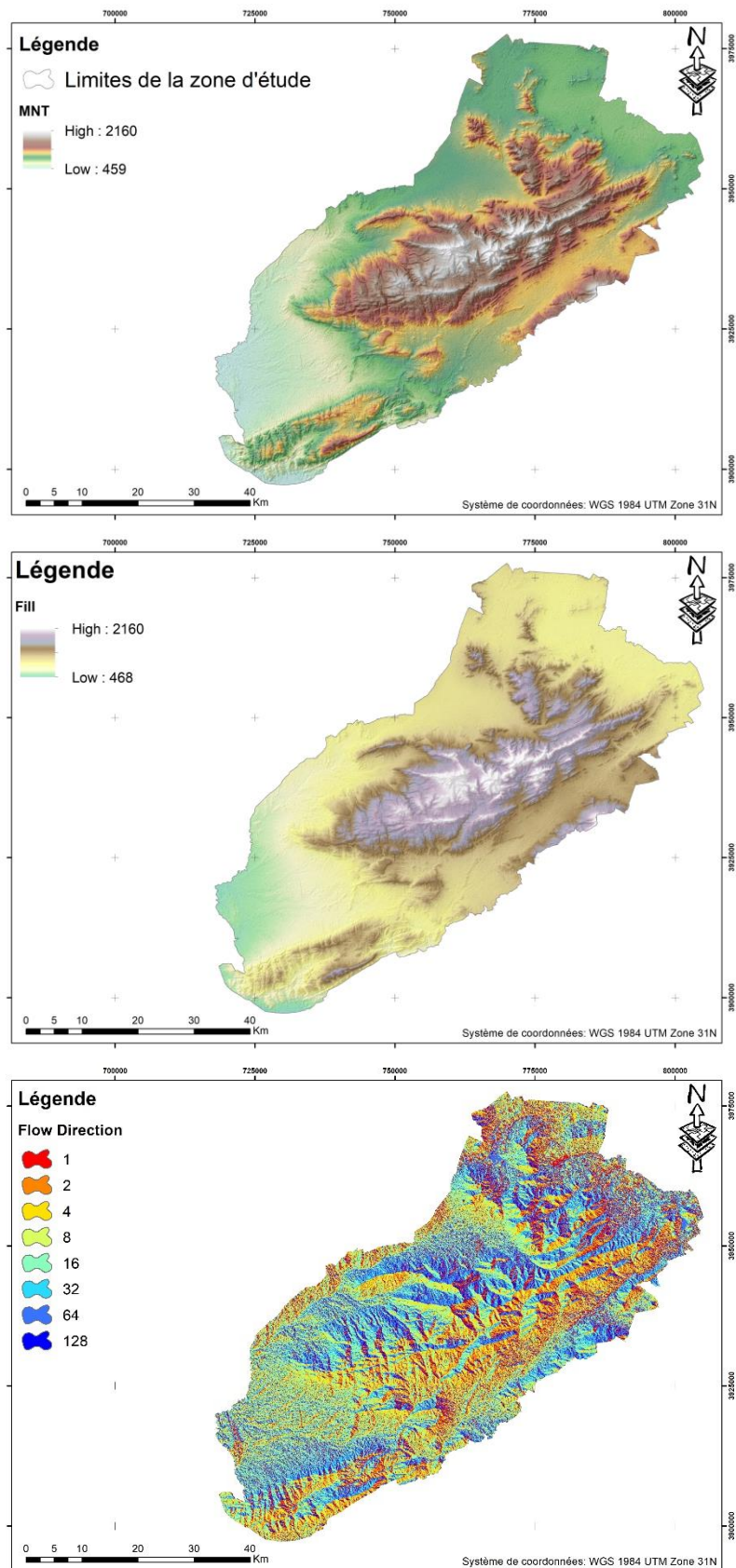


Figure. 57 : Carte des altitudes, du fill et du sens d'écoulement.

La figure 57 représente les cartes d'altitudes, du fill (remplissage) et du sens d'écoulement qui sont essentielles pour calculer et réaliser la carte d'accumulation des flux L (Figure. 58).

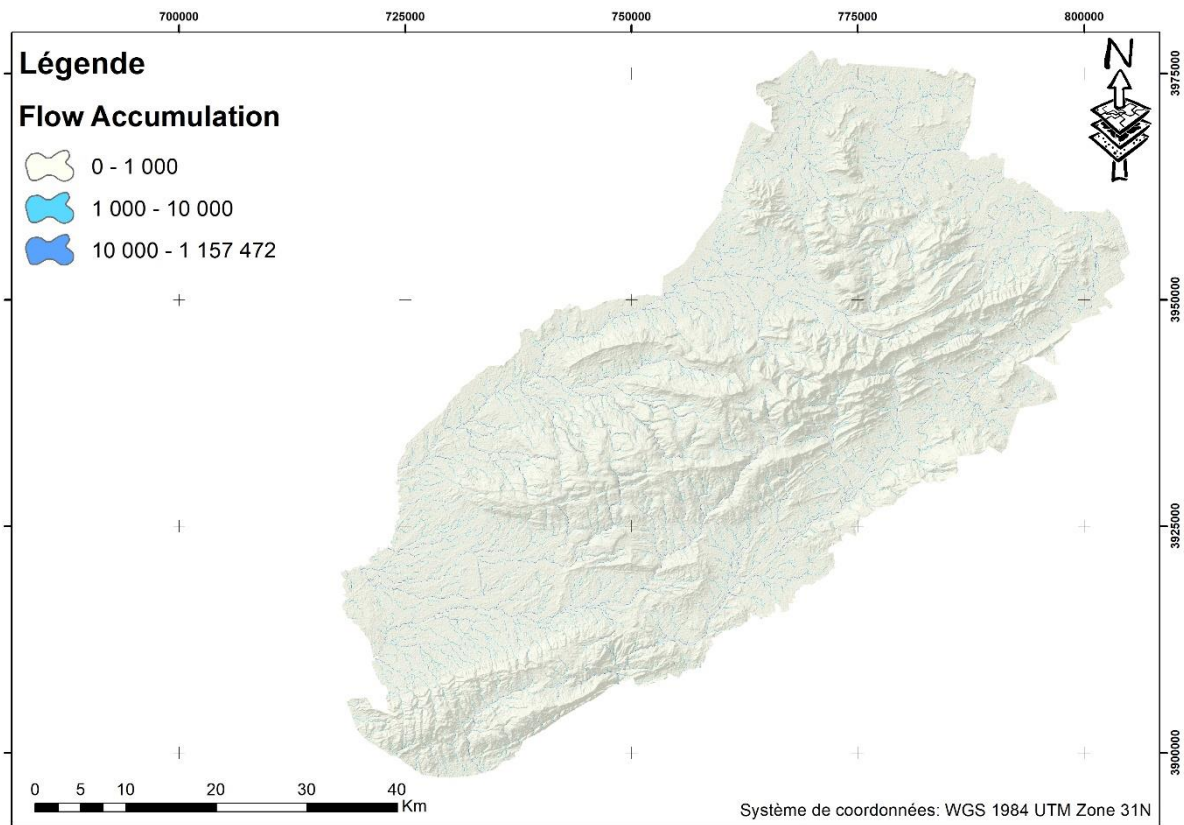


Figure. 58 : Carte de l'accumulation des flux.

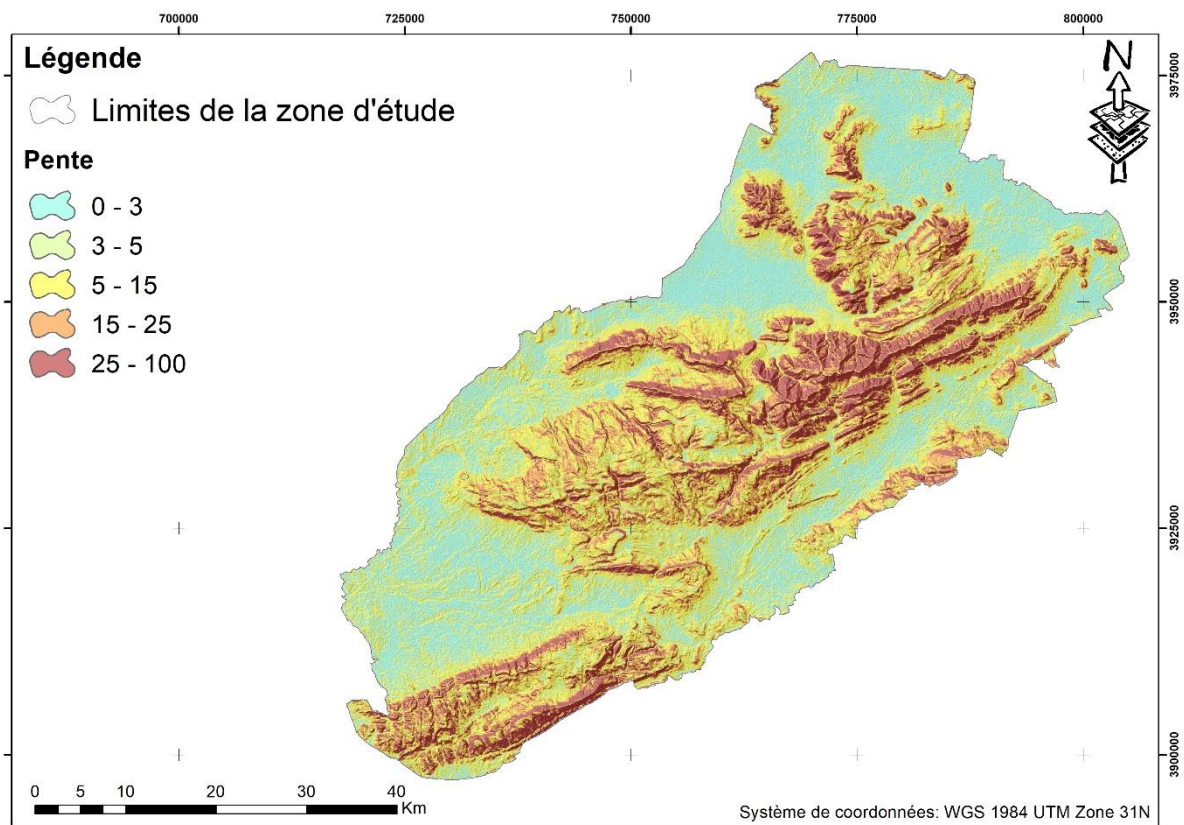
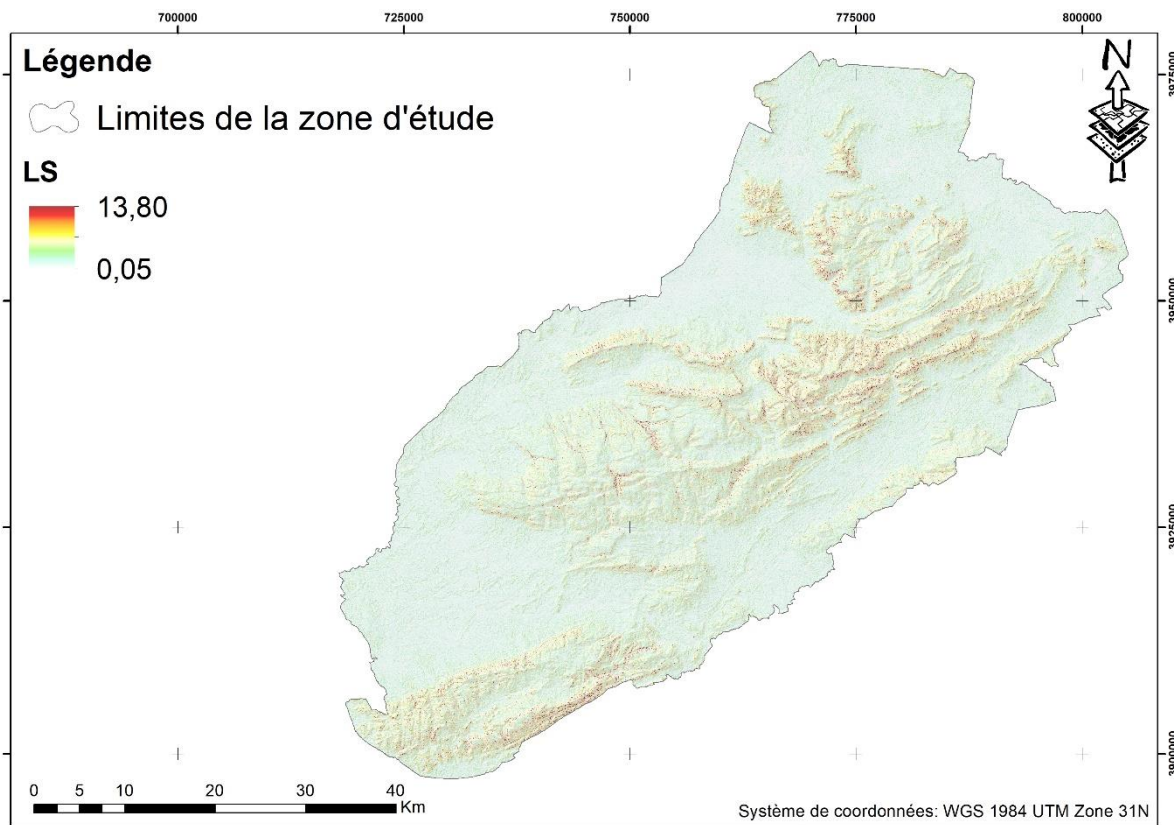


Figure. 59 : Carte des pentes.

La figure 59 représente la carte des pentes S en pourcentage divisée en 5 classes, dont 84 % de la superficie totale présente une pente supérieure à 5 %.

Les facteurs L et S sont estimés séparément à partir de MNT ([Earthexplorer.usgs.gov](http://Earthexplorer.usgs.gov)) et puis on a calculé le FILL, ensuite la direction des flux et l'accumulation des flux, la pente et enfin, par un calculatrice Raster, on a appliqué l'équation 03 pour calculer le facteur LS.



**Figure. 60 : Carte du facteur LS.**

Les valeurs du facteur LS (Figure. 60) sont situées entre 0,05 et 13,80 et que les pertes moyennes en sol augmentent linéairement avec l'inclinaison et la longueur des pentes.

#### **4.2.4. Facteur du couvert végétal (C)**

La végétation joue un rôle important dans le ralentissement du processus d'érosion hydrique ; en effet, le facteur de couverture végétale est le deuxième facteur important pour contrôler le risque d'érosion du sol.

De nombreuses études ont été proposées pour estimer le facteur de gestion de la couverture (facteur C), en utilisant l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) pour évaluer la perte de sol (LIN *et al.*, 2002 ; WANG *et al.*, 2002).

Dans cette étude, on a utilisé les données NDVI générées à partir d'une image satellite LANDSAT 8 OLI TIRS du mai 2021 avec une résolution spatiale de 30 mètre, qui a été utilisée

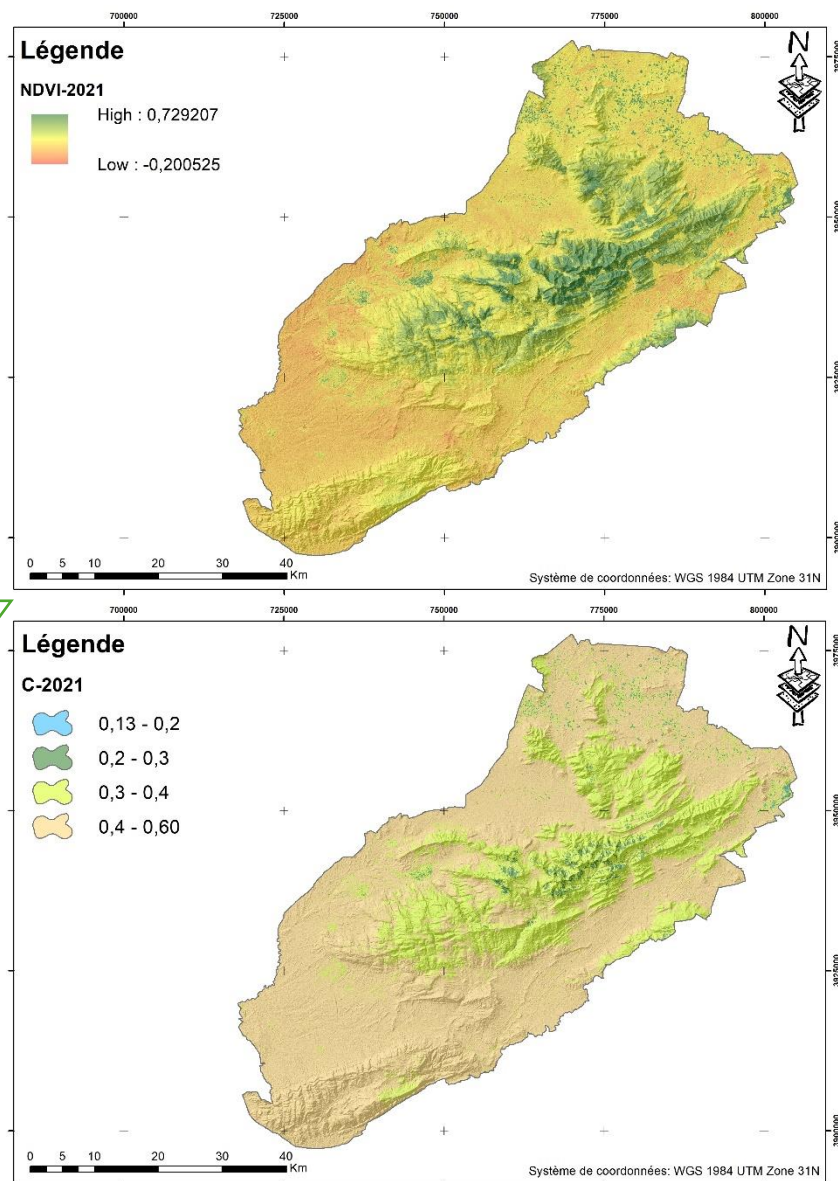
pour estimer le facteur C et expliquer l'effet de différents types de couvert végétal sur la perte de sol. Le NDVI a été calculé à partir d'une combinaison de bandes infrarouge (B5) et rouge (B4) avec l'équation (4)  $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$ .

Afin d'estimer les valeurs du facteur C, DURIGON *et al.* (2014) ont utilisé l'équation suivante:

$$\text{Equation (5) : } C = (-NDVI + 1) / 2$$

Cette méthode est basée sur le rééchelonnement du NDVI qui a été proposé dans la présente étude. Pour les zones à couverture végétale plus élevée, les valeurs de NDVI tendent vers +1 et les valeurs du facteur C sont proches de 0. Les valeurs de NDVI des images ont été transformées par l'équation (5) pour produire de nouvelles images avec le nouveau facteur, appelé facteur C redimensionné (Cr) selon la figure 61 :

Transformation des  
valeurs de NDVI par  
l'équation (5)



**Figure. 61 :** Carte de l'NDVI et le facteur C 2021.

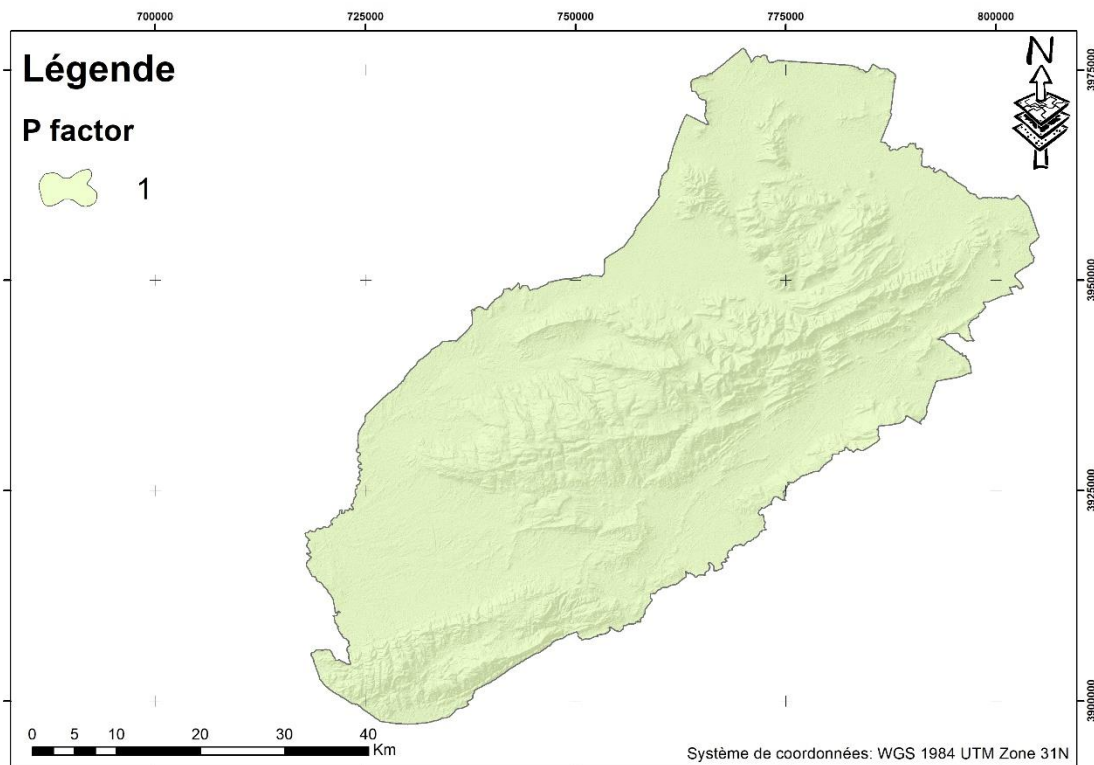
Les résultats obtenus montrent que moins de 1 % de la superficie de la zone d'étude présente une couverture végétale qu'on considère bien protégée avec  $C < 0,2$  selon YJJOU *et al.* (2014).

Cette superficie peut connaître des fluctuations selon la saison et l'NDVI (Figure. 61). Le reste de la superficie, soit 99 %, présente un taux de couverture végétale faible à très faible, expliqué essentiellement par la dominance de forêts et de matorrals dégradés, de terrains nus, de zones urbaines, de terrains de parcours dégradés et de zones de cultures qui sont considérées très sensibles à l'érosion.

#### 4.2.5. Facteur de pratique antiérosive (agricole et conservation du sol) (P)

Il s'agit du facteur P qui exprime l'impact des pratiques tentant de modérer l'intensité de l'érosion. Les incidences des pratiques antiérosives permettent de minimiser l'action du ruissellement en modifiant sa direction et en réduisant l'inclinaison et la longueur de la pente et, par conséquent, limiter l'ablation et le transport de particules du sol, à savoir la culture dans des sillons en courbes de niveau, l'alternance des bandes ou des terrasses, le reboisement en banquettes et le binage (EL HAGE HASSAN *et al.*, 2018).

Le facteur P a été fixé à la valeur 01 sur l'ensemble de la zone d'étude, puisque les pratiques de conservation couvrent des superficies négligeables, et ces travaux n'ont pu être visibles sur l'imagerie satellitaire utilisée dans cette étude (Figure. 62).



**Figure. 62 :** Carte de pratique agricole et de conservation du sol (P).

#### **4.2.6. Croisement des cartes (A)**

##### **Facteur A :**

Toutes les couches obtenues, à savoir, R, K, LS, C et P ont été générées dans les SIG en utilisant ArcGIS 10,8. Toutes les combinaisons se sont effectuées en mode Raster en utilisant l'outil Raster Calculator du module Spatial Analyst, tout en appliquant l'équation mathématique du modèle de WISCHMEIER & SMITH (1978), cela permet d'évaluer le taux d'érosion sur tous les points de la zone d'étude et l'élaboration de la carte synthétique des pertes en sol selon les résultats obtenus. Les valeurs résultantes expriment la perte de sol en tonne par hectare et par an à l'échelle du pixel.

**Le facteur R :** les estimations de facteur R donnent des valeurs comprises entre 201 et 2.543 MJ.mm/ha/h/an. La spatialisation illumine deux zones importantes où la force érosive des pluies est particulièrement plus importante dans la partie Nord et Nord-Ouest que le reste de la zone d'étude.

**Le facteur K :** les valeurs de facteur K varient globalement de 0,24 t.ha.h/ha/MJ.mm pour les sols les plus résistants à 0,34 t.ha.h/ha.MJ.mm pour les sols les plus érodables.

Les sols les plus résistants sont les sols sur les roches calcaires ; tandis que les sols sur les roches marneuses sont plus érodables.

**Le facteur LS :** les valeurs du facteur LS variant de 0 à 13,8. Les valeurs élevées sont observées dans la partie médiane des zones à pentes modérées, fortes et très fortes. Les valeurs faibles sont observées dans les périphéries des zones à pentes faibles.

**Le facteur C :** pour estimer les valeurs du facteur C dans la zone d'étude, nous avons appliqué l'équation (5). Lorsque les valeurs de NDVI augmentent, nous observons que les valeurs du facteur C sont faibles, ce qui indique un risque d'érosion réduit. En revanche, lorsque les valeurs de NDVI diminuent, les valeurs du facteur C augmentent, signalant ainsi un risque d'érosion plus élevé.

**Le facteur A :** à partir de cette étude, on peut conclure que le risque d'érosion hydrique dans la zone d'étude d'une manière générale est modéré à fort (Figure. 63).

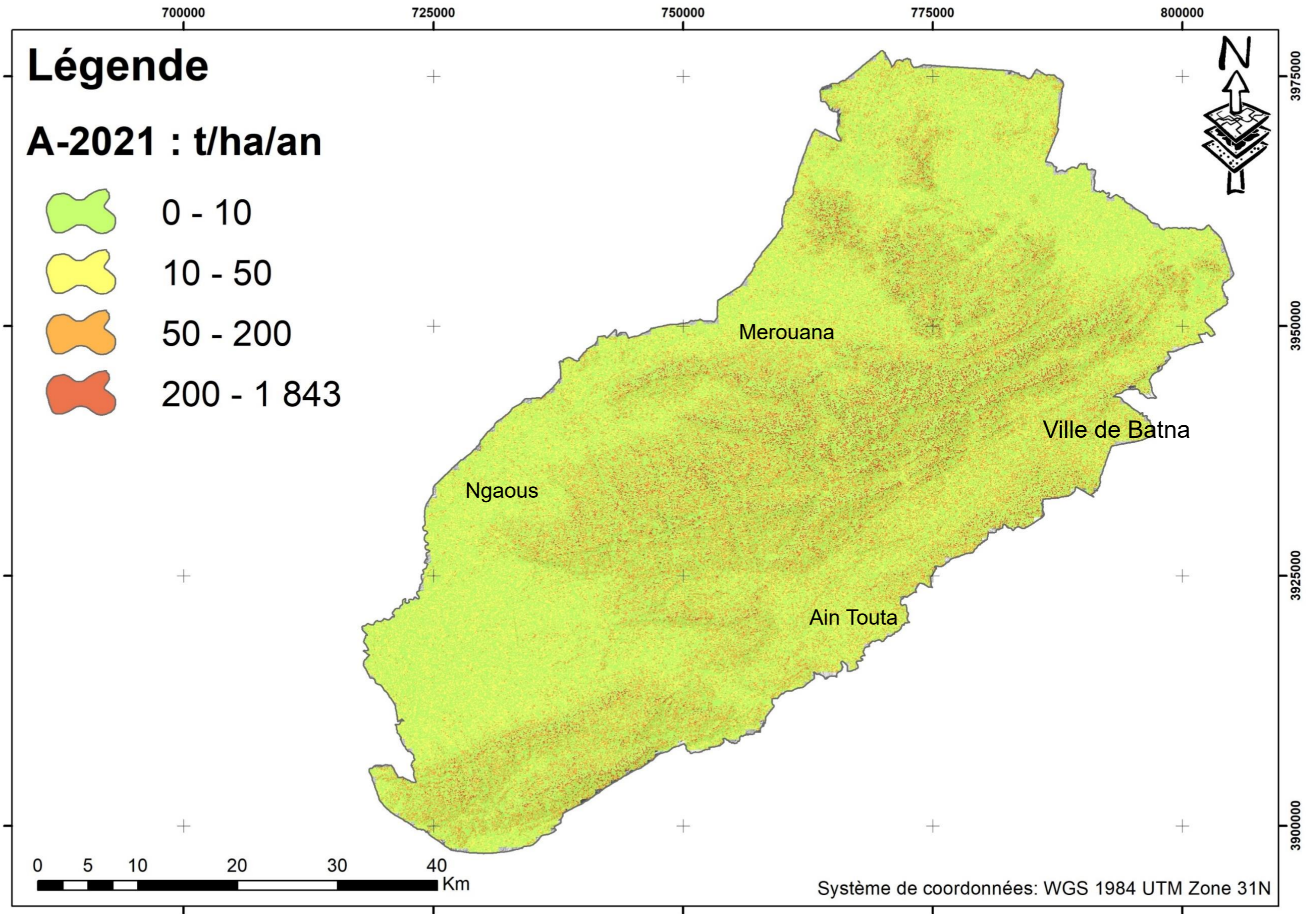


Figure. 63 : Carte de risque d'érosion de la zone d'étude 2021.

Les valeurs du facteur A sont estimées de 0 à 1843 t/ha/an pour l'année 2021. Cette perte est liée directement aux dégradations du milieu, aux conditions climatiques et à l'activité anthropiques qui joue un rôle important dans la dégradation des terres tels que les incendies et les pratiques agricoles (Figure. 63).

La dégradation des sols constitue un problème multidimensionnel aux conséquences graves, engendrant une série de répercussions sur l'environnement. La perte du sol provoque une diminution significative du potentiel de production des sols, de leur résilience face aux risques futurs et de leur durabilité, ce qui a un effet direct sur la biodiversité des écosystèmes terrestres.

### **Conclusion**

L'évaluation et la quantification des pertes en sol au niveau de la zone d'étude, a été réalisée à l'aide de l'équation universelle révisée des pertes en sol (RUSLE), intégrée dans un système d'information géographique. Bien que cette méthode présente certaines limites, elle offre un support significatif aux décideurs pour simuler des scénarios d'évolution potentielle de la région et planifier des actions de prévention contre l'érosion hydrique.

Les résultats obtenus montrent que les sols de la zone d'étude, subissent l'effet de plusieurs facteurs favorisant le phénomène d'érosion, à savoir l'importance des pentes, le faible couvert végétal et l'érodibilité des sols. Il indique que 61 % de la zone d'étude est soumise à un faible degré d'érosion  $< 10$  t/ha/an, cette classe située dans les plaines et dans les forêts bien venantes, 19 % de la zone est soumise à une perte moyenne qui varie de 10 à 50 t/ha/an, et touche les sols improductifs dans les plaines. 20 % du territoire est soumis à une érosion sévère avec des pertes allant de 50 à 1843 t/ha/an, et touche spécialement les zones dégradées des monts et les piémonts du Belezma.

Cette situation est favorisée par la conjugaison de plusieurs facteurs : les pentes fortes (23,46 % de la surface a une pente  $> 25$  %) avec des valeurs de LS qui s'approche de 13,8, une dégradation générale du couvert végétal et enfin les sols qui sont très érodables (avec un facteur  $K > 0,24$ ).

Les stratégies visant à atténuer l'impact de l'érosion peuvent être classées en deux catégories, se concentrant soit sur le phénomène d'érosion lui-même, soit sur les pertes de sol. Dans le premier cas, l'accent est principalement mis sur des mesures préventives destinées à réduire les risques d'érosion. Dans le second cas, les mesures adoptées relèvent principalement de l'ordre correctif, visant à minimiser les conséquences de l'érosion des terres en aval. Il est essentiel de

noter que le choix des mesures à mettre en œuvre doit être adapté aux caractéristiques spécifiques du milieu, en tenant compte notamment de l'érodibilité du sol, de la pente et de l'érosivité potentielle des précipitations.

La meilleure méthode pour préserver les ressources en sol dans cette zone consiste à reboiser en utilisant un mélange d'espèces végétales de la région, sélectionné pour répondre aux conditions édapho-climatiques de chaque zone, notamment dans les zones dégradées et les zones incendiées. Ensuite, il est important de surveiller attentivement tout type de pâturage. De plus, il est important de favoriser le développement rural, en utilisant une agriculture moins érosive, telle que l'arboriculture des espèces rustiques comme l'olivier, le figuier, l'amandier, l'abricotier et le grenadier, en utilisant des terrasses dans les zones de montagne.

Aussi, les travaux mécaniques de protection et de réhabilitation des sols sont indispensables dans l'ensemble de la zone d'étude et du réseau hydrographique, en particulier dans les zones accidentées, tels que les travaux de correction torrentielle par l'utilisation de gabionnage, de banquettes et de murette. Enfin, lors de toute nouvelle construction routière, il est essentiel de préserver les talus contre l'érosion hydrique par des reboisements combinés à des traitements mécaniques tels que le grillage, afin d'assurer une protection optimale.

En conclusion, cette étude de modélisation a identifié les zones à risque d'érosion hydrique qui doivent servir de modèle pour protéger et stabiliser les terres contre ce risque, prévenir la dégradation de ces écosystèmes fragiles et la perte de biodiversité, ainsi que protéger les villes et les villages en aval du massif du Belezma. Enfin, elle permet de créer une biosphère durable et saine pour l'homme.

**CHAPITRE V :**  
**SURVEILLANCE DU DECLIN DU CEDRE A L'AIDE DE**  
**DONNEES CLIMATIQUES ET DE LA TELEDETECTION DANS**  
**LA REGION DE BELEZMA**

## **Introduction**

Le climat est un facteur important dans la vie des êtres vivants. Il influence leur développement, leur répartition et leur individualisation. Les conditions climatiques ont un impact sur la croissance des plantes, la migration des animaux et leurs survie. Les scientifiques ont étudié l'impact du climat sur leurs vie pendant des années, révélant ainsi des liens complexes entre les changements climatiques et les écosystèmes. (CIESLA, 1997).

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica Manetti*) endémique d'Afrique du Nord, malgré sa capacité de résistance à la sécheresse, présente certaines exigences saisonnières en humidité, il est affecté par le changement climatique qui se manifeste par un dépérissement massif, spécialement dans les monts du Belezma, l'aire la plus méridionale de la cédraie algérienne. Ces pertes sont amplifiées par les différentes pressions anthropiques qui mettent en risque sa pérennité (IFTICENE *et al.*, 2021).

Plusieurs études classiques basées sur l'analyse des données climatiques (BENTOUATI, (2008) ; TOUCHAN *et al.*, (2008) ; MESSAOUDENE *et al.*, (2011) ; KHERCHOUCHE *et al.*, 2013 ; IFTICENE *et al.*, 2021 ; SLIMANI *et al.*, (2021)) indiquent que la sécheresse récente est la cause principale du dépérissement des cédraies algériennes, notamment dans les régions des Aurès et du Belezma. Cette période de sécheresse, la plus sévère en Algérie depuis cinq siècles, a coïncidé avec une diminution importante des précipitations et des températures élevées, affectant les réserves hydriques du sol, entraînant l'affaiblissement et le dépérissement du cèdre et des autres espèces forestières.

La cartographie numérique moderne est un outil indispensable pour le suivi des écosystèmes et l'évaluation de leurs états. Le traitement des images satellitaires comme Landsat et l'utilisation des indices, permettent de visualiser les phénomènes en relation avec le climat d'une façon moderne, ce qui permet d'avoir les informations spatio-temporelles d'aide à la décision.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les données climatiques des trois dernières décennies de trois séries de données (ONM, 2018 ; Ain Skhoua, Ain Touta et Barika) et d'analyser les données satellitaires par des indices : NDVI, NDMI, dNDMI qui permettent une corrélation des résultats afin de détecter la période la plus sèche et la période de déclenchement de mortalité massive de la cédraie dans cette zone et enfin d'avoir le degré de mortalité et l'estimation des pertes.

### **5.1. Données utilisées et méthodologie**

#### **5.1.1. Données utilisées**

**a- Les températures et les précipitations :** les données utilisées sont les températures et les précipitations provenant des trois stations présentées dans le tableau 02, page 18.

**b- Données satellitaires :** les images Landsat (L05 TM et L08 OLI) de 1985 et de 2021 et MODIS de 2000 à 2021, en utilisant la plateforme Google Earth Engine.

**5.1.2. Méthodologie :** la méthodologie consiste à analyser les données météorologiques ; précipitation et température des trois stations sur deux périodes et les relier avec les données satellitaires Landsat 5 et 8 disponibles du mois d'août ou de septembre pour une bonne visualisation de la cédraie, sur une période de 36 ans, en utilisant les trois indices NDVI, NDMI et dNDMI. Renforçant cette étude par des séries chronologiques de NDVI et NDMI Landsat et les données de NDVI MODIS, en utilisant la plateforme Google Earth Engine GEE (Figure.64).

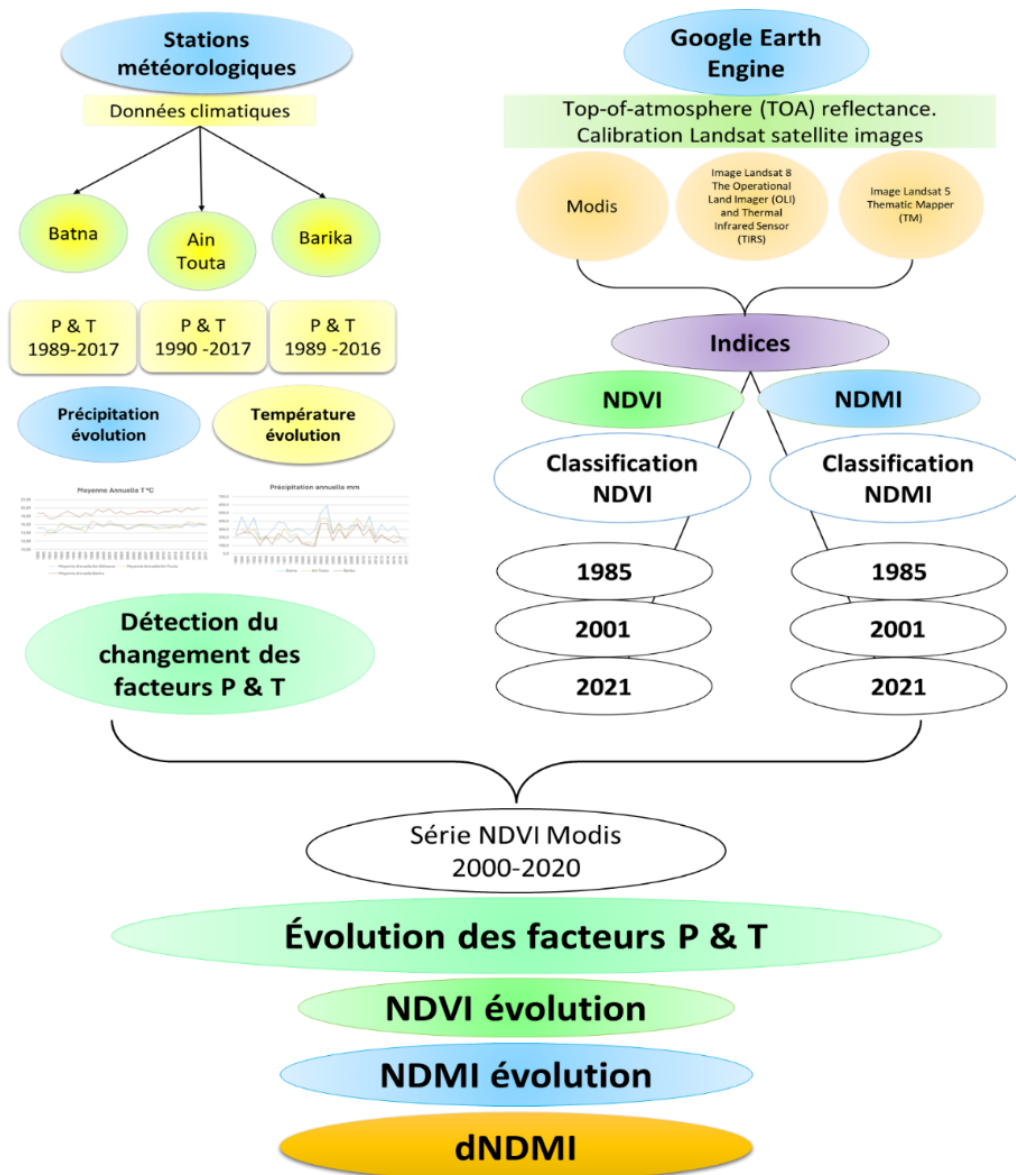


Figure. 64 : Organigramme méthodologique.

## 5.2. Résultats et discussion

### 5.2.1. Effet des températures et précipitations

En comparant les données météorologiques des deux périodes de Seltzer 1913-1938 et celle de la période actuelle, pour les deux stations de Batna et de Barika, présentées dans les tableaux 03, 04 et la figure 15 dans les pages 19 et 20, on distingue qu'il y a une augmentation dans les températures moyennes mensuelles et une diminution des précipitations dans la saison humide hivernale et printanière qui coïncide avec le début d'activité photosynthétique et biologique du couvert végétal.

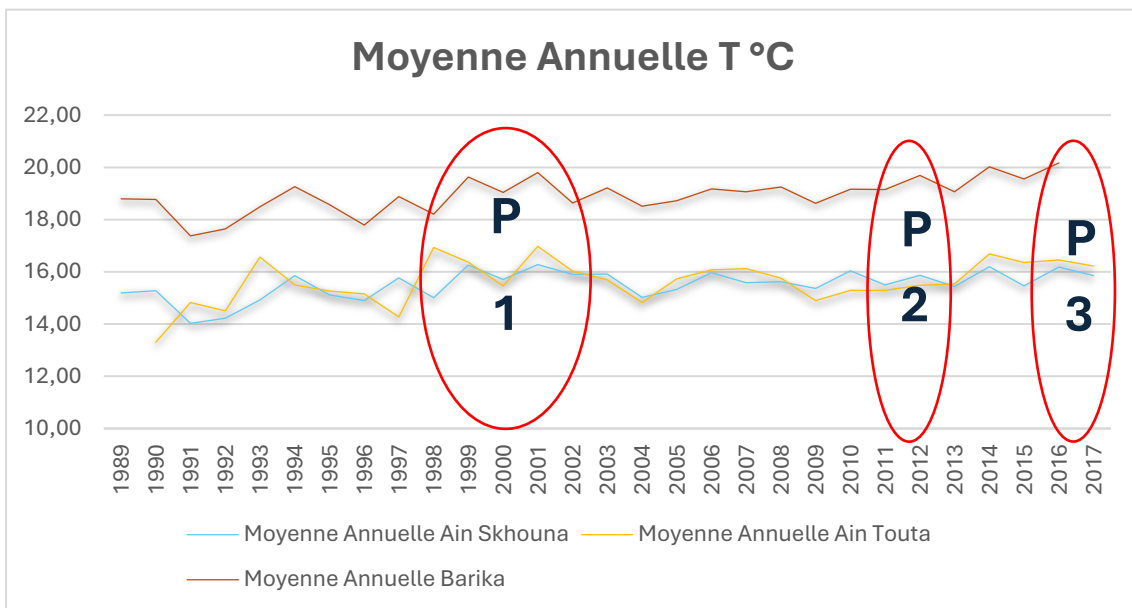


Figure. 65 : Comparaison des températures des trois stations.

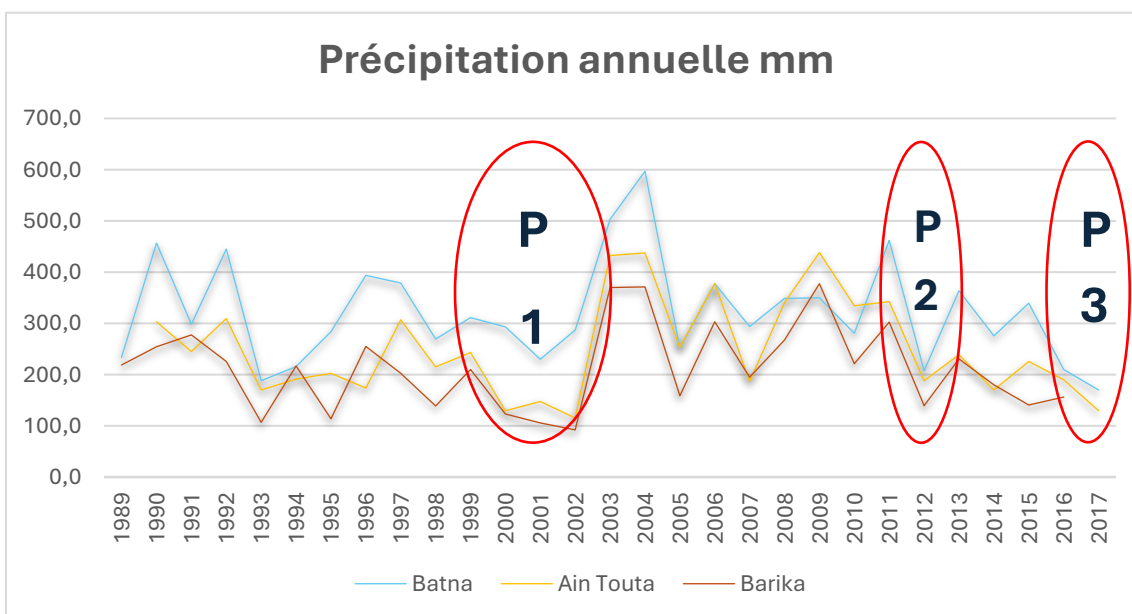


Figure. 66 : Comparaison des précipitations des trois stations.

L'analyse des figures 65 et 66 permet de distinguer trois périodes P1, P2 et P3 qui sont caractérisées par des précipitations annuelles de moins de 100 mm dans les versants Sud et Ouest (Ain Touta et Barika) et presque 200 mm au Nord (Ain Skhouna). Alors que les températures moyennes annuelles ont une tendance à augmenter pour les trois stations de l'ordre de 1 degré Celsius, aussi on observe une variabilité des précipitations qui tend vers une diminution dans les trois stations. Cependant, on constate que la période de sécheresse, allant de 2000 à 2002 est la plus longue.

### 5.2.2. Tendence du nombre de mois secs

Selon la synthèse climatique, les diagrammes ombrothermiques des trois stations d'Ain Skhouna, d'Ain Touta et de Barika révèlent deux périodes distinctes : une période sèche et chaude qui a une tendance à augmenter allant de plus de 6 mois jusqu'à 11 mois pour la station de Barika, et une période humide et froide qui a une tendance à diminuer.

Concernant la tendance du nombre de mois secs, le graphe (Figure. 67) fait ressortir un aspect conforme aux courbes des précipitations et des températures.

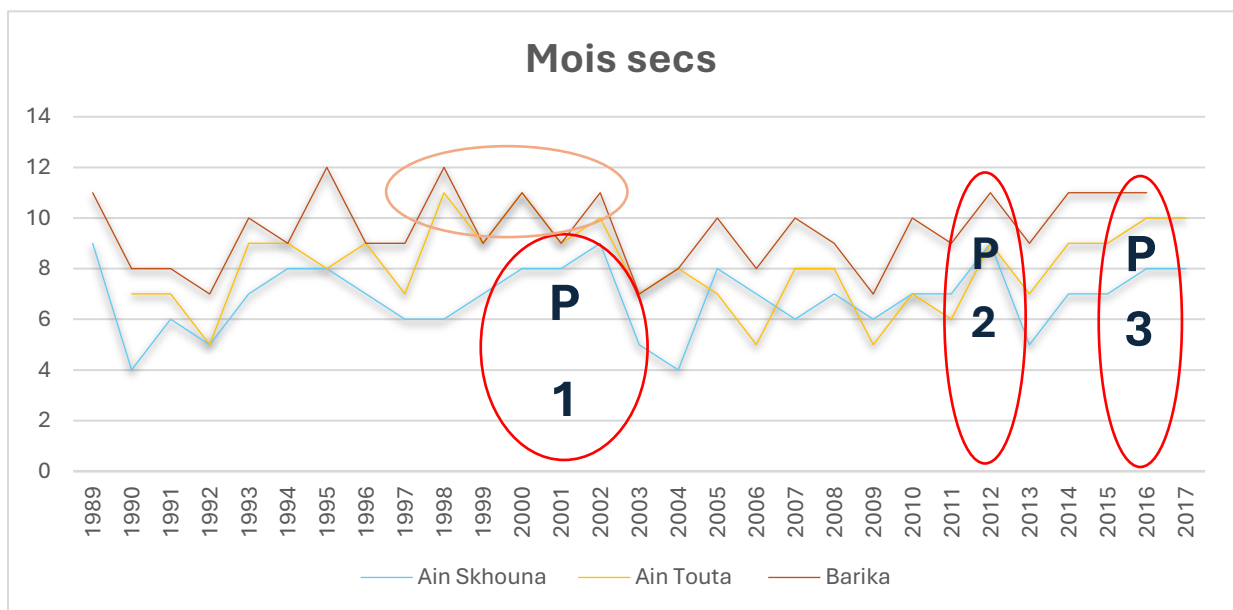


Figure. 67 : Tendence du nombre de mois secs.

Pour le nombre de mois secs ( $P < 2 T$ ), on constate une augmentation de 0,5 mois pour Ain Skhouna et Ain Touta et de plus d'un mois pour la station de Barika, avec des pics qui arrivent à 9, 11 et 12 mois de sécheresse entre 1998 et 2002 pour les trois stations.

Au début, plusieurs périodes extrêmes ont été enregistrées avant l'an 2000 pour la station de Barika, puis pour les deux stations de Sud de Barika et d'Ain Touta, et enfin pour les trois stations qui coïncident avec la période entre 2000 et 2002.

### 5.2.3. Les précipitations mensuelles dans la période de l'activité biologique

On a choisi les mois de février, mars et avril, car c'est la période de l'activité biologique du cèdre.

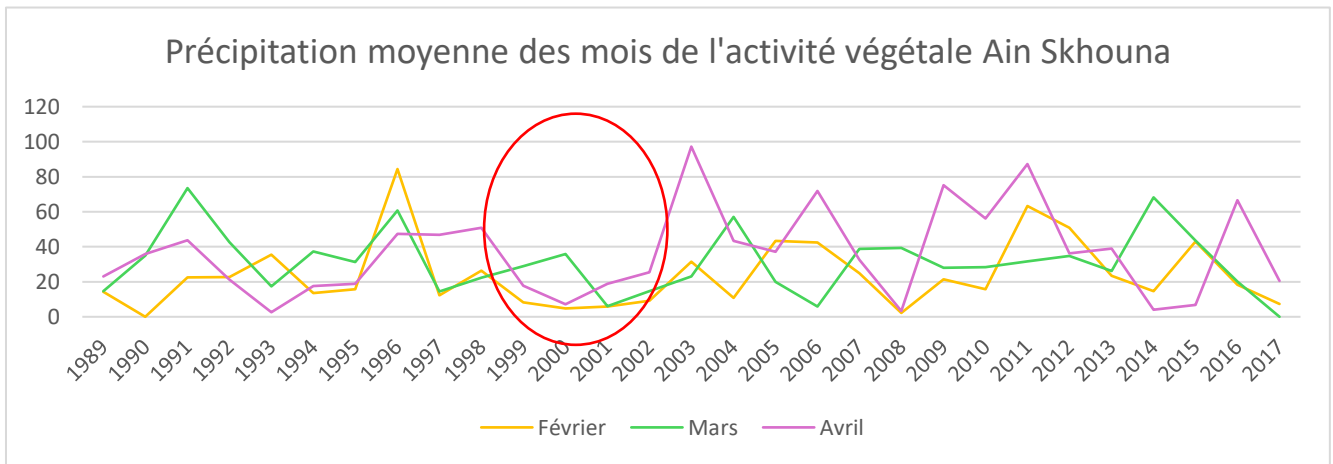


Figure. 68 : Précipitation moyenne des mois de l'activité végétale (station Ain Skhoua).

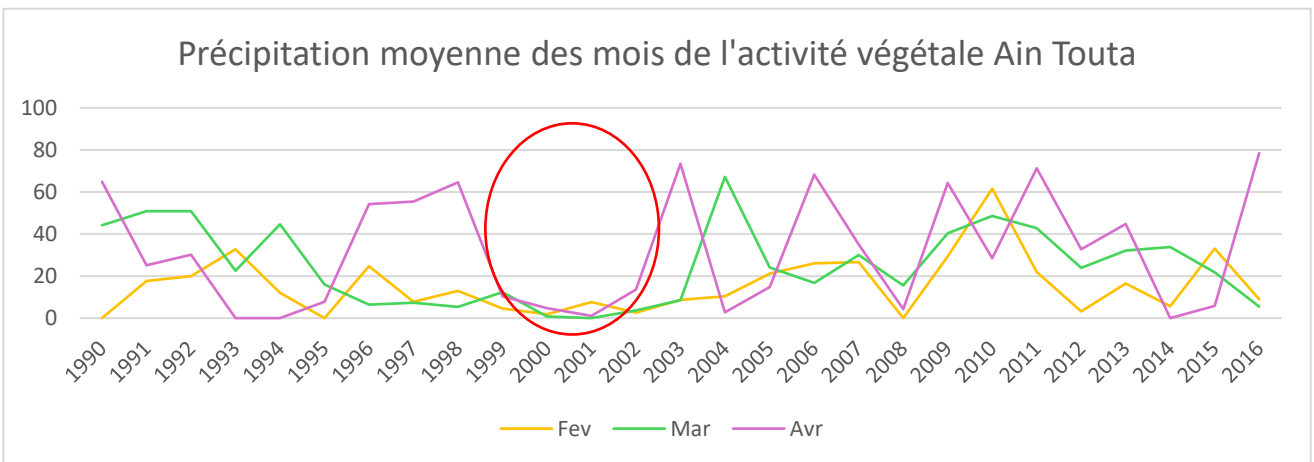


Figure. 69 : Précipitation moyenne des mois de l'activité végétale (station Ain Touta).

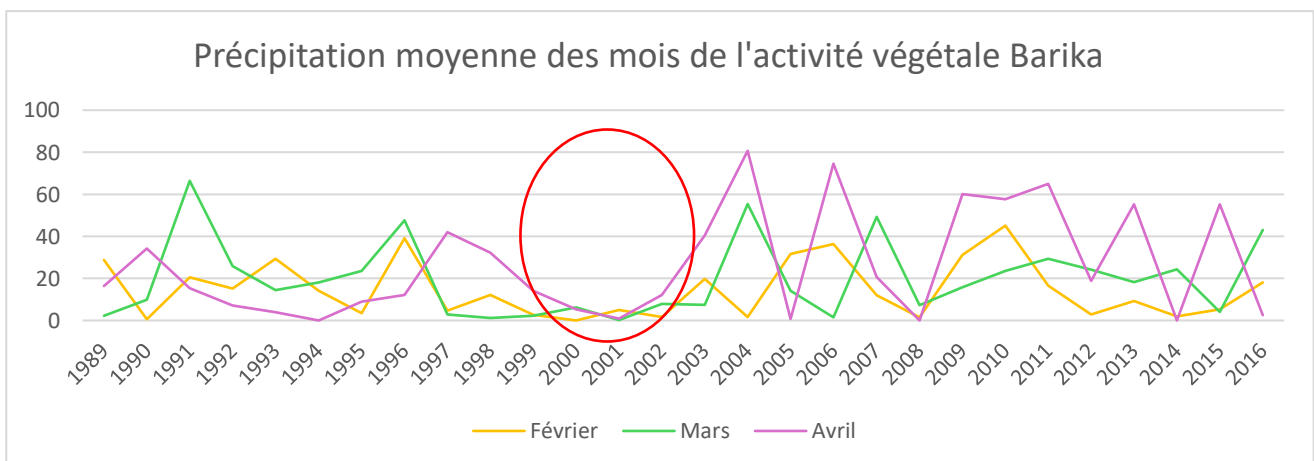


Figure. 70 : Précipitation moyenne des mois de l'activité végétale (station Barika).

Les figures de 68, 69 et 70 montrent un déficit hydrique remarquable dans la période de 1999 à 2002 pour les trois stations, ce qui prouve l'importance des précipitations dans la période de l'activité biologique. Ce déficit hydrique est considéré comme la cause principale du déclenchement du dépérissement massif de la cédraie ainsi que pour tout le couvert végétal.

#### 5.2.4. L'utilisation des indices NDVI, NDMI et dNDMI

L'utilisation de la plateforme Google Earth Engine, et des indices de l'humidité et de la végétation, avec l'intégration des séries chronologiques de ces indices, permet de détecter plusieurs déficits uni-annuels et pluriannuels, qui coïncident avec la période exacte de déclenchement du dépérissement massif entre 2000 et 2002, qui s'est propagé dans toute la cédraie du Belezma.

Pour une meilleure visualisation du couvert forestier, on a utilisé les images Landsat 5 et 8 du mois d'août pour les trois indices.

Les images utilisées sont des scènes ortho rectifiées, utilisant la réflectance calculée au sommet de l'atmosphère (TOA) selon CHANDER *et al.* (2009), dans la plateforme Google Earth Engine.

Les limites de la cédraie utilisées dans ce chapitre sont issues de l'inventaire forestier national de BNEDER, IFN, (2008).

#### 5.2.5. Indice de végétation par différence normalisée NDVI

La valeur NDVI varie entre -1 et 1, une valeur plus élevée indique l'état dense de la végétation, soit une forte concentration de forêts, soit une agriculture dense, et une valeur plus faible indique l'absence de la végétation.

Tableau. 26 : Classes de NDVI, AKBAR *et al.* (2019).

Classes de NDVI	Végétation	Valeurs
Eau	Végétation absente	-0,28 à 0,015
Urbain		0,015 à 0,14
Sol nu	Végétation très faible	0,14 à 0,18
Parcours / végétation basse clairsemée	Végétation faible	0,18 à 0,27
Végétation clairsemée / matorral dégradé	Végétation moyenne	0,27 à 0,36
Végétation dense	Végétation dense	0,36 à 0,74

Pour l'analyse de la couverture végétale, les valeurs de NDVI sont classées en 6 classes d'occupation du sol selon AKBAR *et al.* (2019).

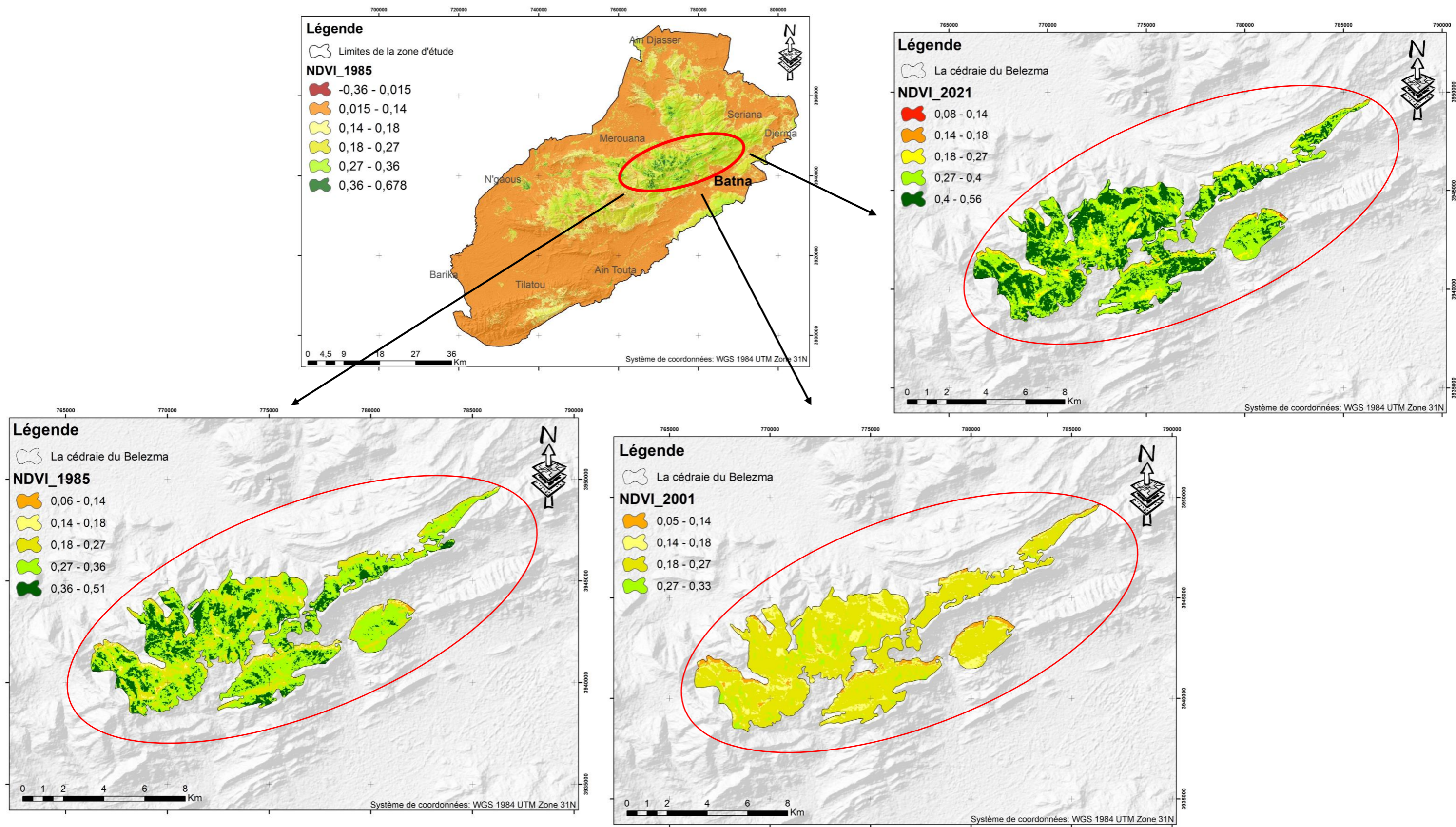


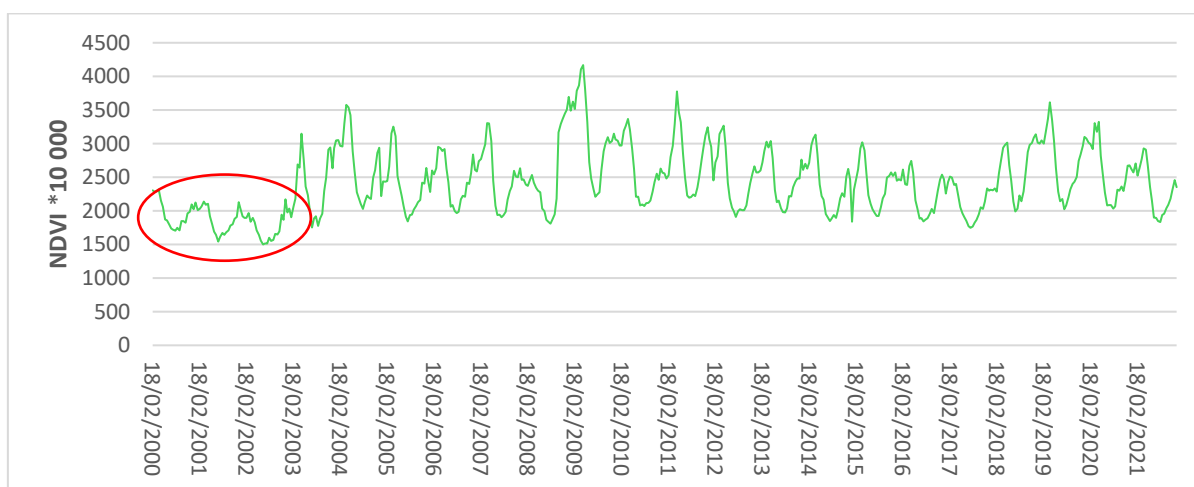
Figure. 71 : Evolution de l'indice de végétation par différence normalisée de la cédraie du Belezma, août 1985-2001-2021.

Les valeurs de l'indice de végétation par différence normalisée dans la figure 71 sont situées entre 0,06 et 0,51 en 1985, alors qu'en 2001 les valeurs de NDVI se répartissent entre 0,05 et 0,33 ce qui montre un dessèchement très remarquable et général de la cédraie de Belezma en 2001. Enfin, les valeurs sont réhaussées en 2021 avec des valeurs entre 0,08 et 0,56.

Cet indice montre la diminution de la densité du couvert végétal qui signifie les pertes causées par le dépérissement massif dans cette cédraie.

### 5.2.6. MODIS séries chronologiques de NDVI 2000-2021

Les valeurs de l'NDVI extraites du MODIS présentées dans la figure 72 montrent aussi la même chose ; des valeurs minimales pour la période 2000-2002 de NDVI, ce qui montre une sécheresse à différentes échelles pour cette région.



**Figure. 72 :** Série chronologique de NDVI 2000-2021 MODIS pour la zone d'étude.

La série chronologique de l'NDVI montre des valeurs minimales dans les années 2000, 2001 et 2002 qui atteignent des valeurs de 0,20 dans la saison hivernale et printanière pour la cédraie, alors que les valeurs normales de cette cédraie peuvent atteindre 0,4.

### 5.2.7. Indice d'humidité par différence normalisée (NDMI)

Le NDMI est lié à la quantité d'humidité de la surface du sol et est donc sensible à la fois à LAI (Indice de surface foliaire) et à l'hydratation des feuilles (NORLEN *et al.*, 2023).

Peu d'études sur la végétation ont appliqué le NDMI (VOGELMANN et ROCK, 1988 ; TURNER *et al.*, 1999, MALIK *et al.*, 2020) pour comprendre l'état de la végétation.

WILSON et SADER (2002) ont constaté que le NDMI est étroitement lié à la teneur en eau du couvert forestier, et suit également de près, les changements dans la biomasse végétale et le stress hydrique.

Nous avons donc utilisé cet indice pour comprendre l'état des changements dans la biomasse végétale (surface foliaire) et le stress hydrique suivant l'équation ci-dessous :

$$L8 : NDMI = (\text{Band } 5 - \text{Band } 6) / (\text{Band } 5 + \text{Band } 6)$$

$$L5 : NDMI = (\text{Band } 4 - \text{Band } 5) / (\text{Band } 4 + \text{Band } 5)$$

On a utilisé l'indice NDMI pour évaluer l'état sanitaire des forêts. En mettant l'accent sur l'identification des zones de stress hydrique et des maladies des arbres qui sont les facteurs principaux du déclenchement du dépérissement massif de la cédraie du Belezma. L'NDMI démontre comment un indice peut être un indicateur précieux pour la surveillance des peuplements forestiers.

**Tableau. 27 :** Classes de NDMI (MALIK *et al.*, 2020) modifié.

<b>Classes de NDMI</b>	<b>Valeurs</b>
Humidité absente	-0,65 à -0,03
Humidité très faible	-0,03 à 0,03
Humidité faible	0,03 à 0,09
Humidité moyenne	0,09 à 0,16
Humidité élevée	0,16 à 0,23
Humidité très élevée	0,23 à 0,74

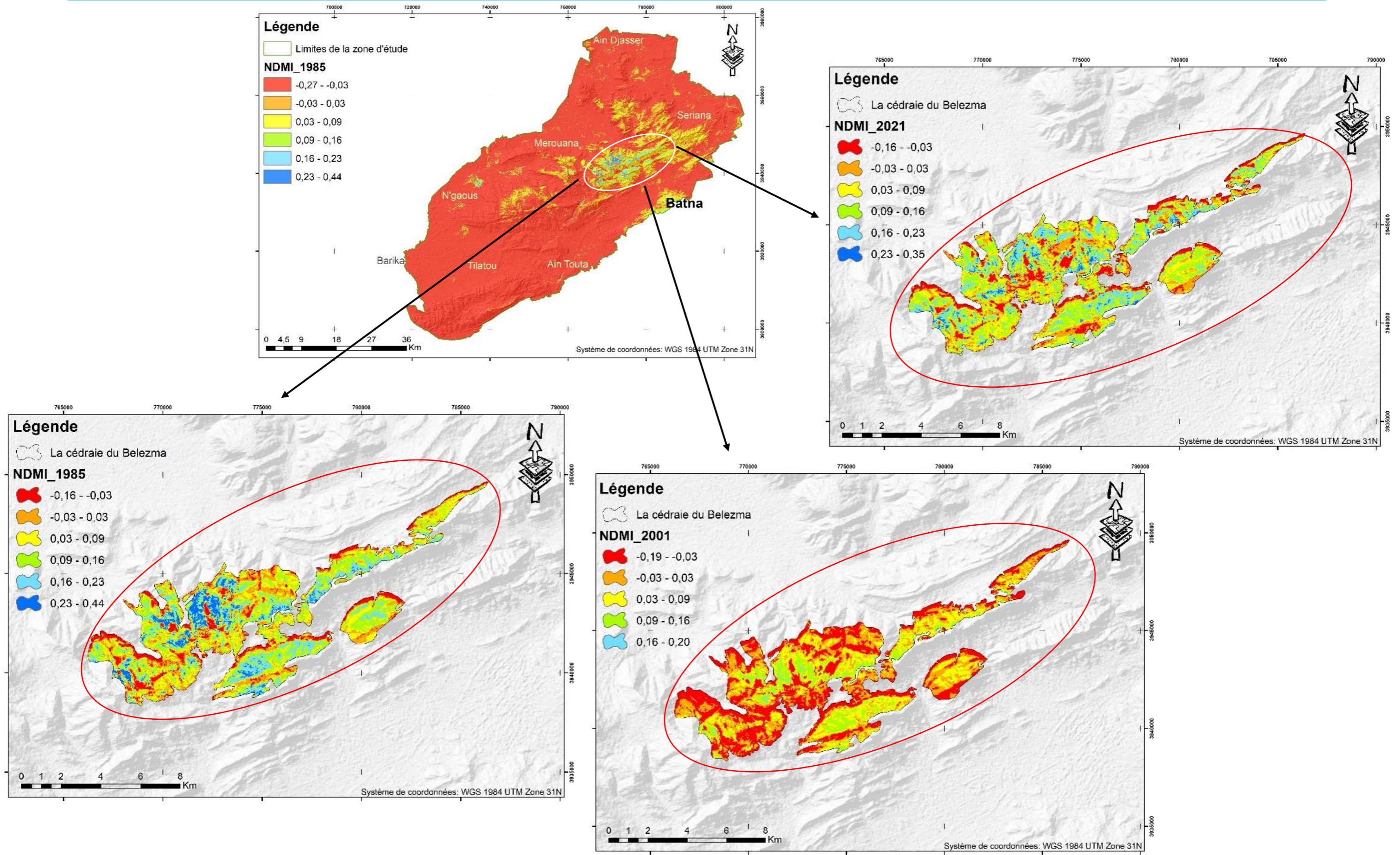
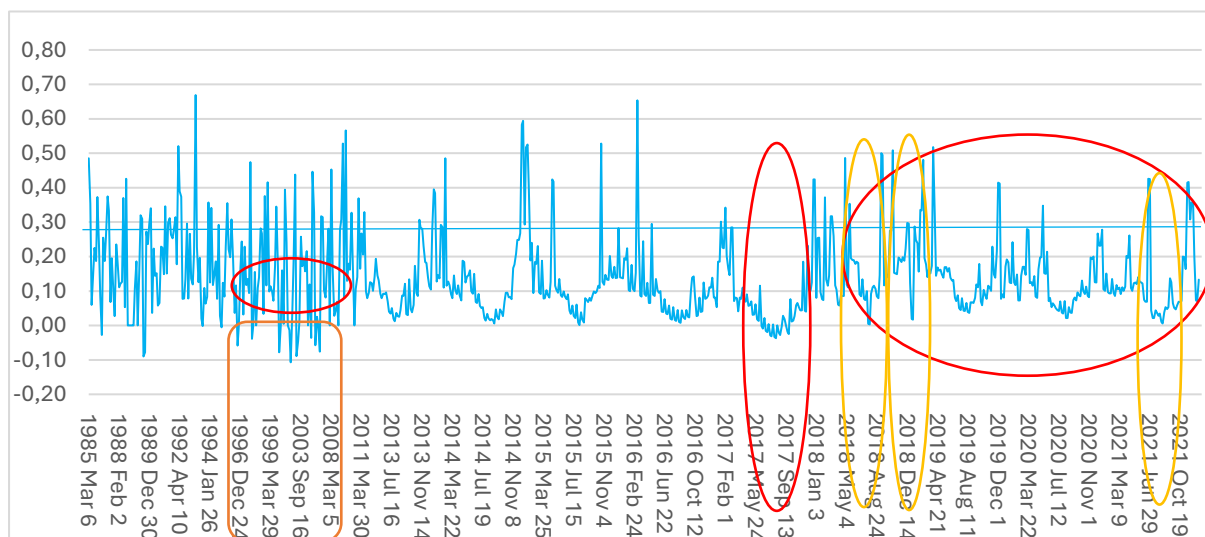


Figure. 73 : Evolution de l'indice de l'humidité par différence normalisée de la cédraie du Belezma, août 1985-2001-2021.

La figure 73 montre que les valeurs de l'indice de l'humidité par différence normalisée sont situées entre -0,16 et 0,44 en 1985, alors qu'en 2001 les valeurs de NDMI se sont diminuées et atteint -0,19 et 0,20, ce qui présente un dessèchement et un stress hydrique très élevé et très remarquable, qui a touché pratiquement toute la cédraie de Belezma. Enfin, les valeurs ont augmenté en 2021 et atteint -0,16 et 0,35. Ces valeurs montrent que le stress hydrique existe toujours.



**Figure. 74 :** Série chronologique de NDMI 1985-2021 de la cédraie du Belezma.

La figure 74 permet de détecter un déficit hydrique dans le couvert végétal par des valeurs négatives qui signifient un stress hydrique élevé sur plusieurs années et même dans la période printanière.

La série chronologique de l'NDMI montre une période très sèche, qui s'étend du décembre 1996 jusqu'à mars 2008 pour la cédraie avec des valeurs négatives de moins de 0, dans la saison humide entre novembre et mars. Cela signifie l'absence d'humidité de la surface foliaire de cette cédraie ce qui a provoqué le dépérissement massif de la cédraie.

Depuis août 2017, cette zone a connu des valeurs de NDMI inférieures à 0, entraînant un affaiblissement des peuplements forestiers, une augmentation des maladies parasitaires et enfin la continuité de dépérissement.

#### 5.2.8. Delta de l'indice d'humidité par différence normalisée (dNDMI)

Le dNDMI est particulièrement sensible aux changements dans la surface des feuilles vivantes, les valeurs négatives fournissent une indication de la diminution de la surface des feuilles vivantes témoignant le dépérissement. Les valeurs positives fournissent une indication de

l'augmentation de la surface des feuilles vivantes et de la croissance de la canopée (NORLEN *et al.*, 2023).

En utilisant des images Landsat 05 prises en fin d'été, nous avons calculé le dNDMI entre 1996 et 2005 pour repérer les pertes survenues entre 2000 et 2002, en soustrayant le NDMI de 1996 avant la sécheresse et le NDMI de 2005 après la sécheresse, et avant les travaux sylvicoles effectués dans cette zone, afin de détecter les pertes du couvert forestier pendant cette période.

Les classes utilisées pour cet indice sont issues de l'indice de dNBR proposé par USGS et adapté pour le dNDMI (Tableau. 28). Cet indice montre bien l'état sanitaire des peuplements forestiers dans la figure 75.

**Tableau. 28 :** Degrés des changements dans la surface foliaire, proposé par USGS (modifié).

<b>Degrés des changements dans la surface foliaire</b>	<b>Valeur de dNDMI</b>
Régénération élevée	-0,5 à -0,251
Régénération faible	-0,250 à -0,101
Aucun changement	-0,100 à 0,99
Dégradation faible	0,1 à 0,269
Dégradation moyenne	0,270 à 0,439
Dégradation forte	0,440 à 0,659
Dégradation très forte	0,660 à 1

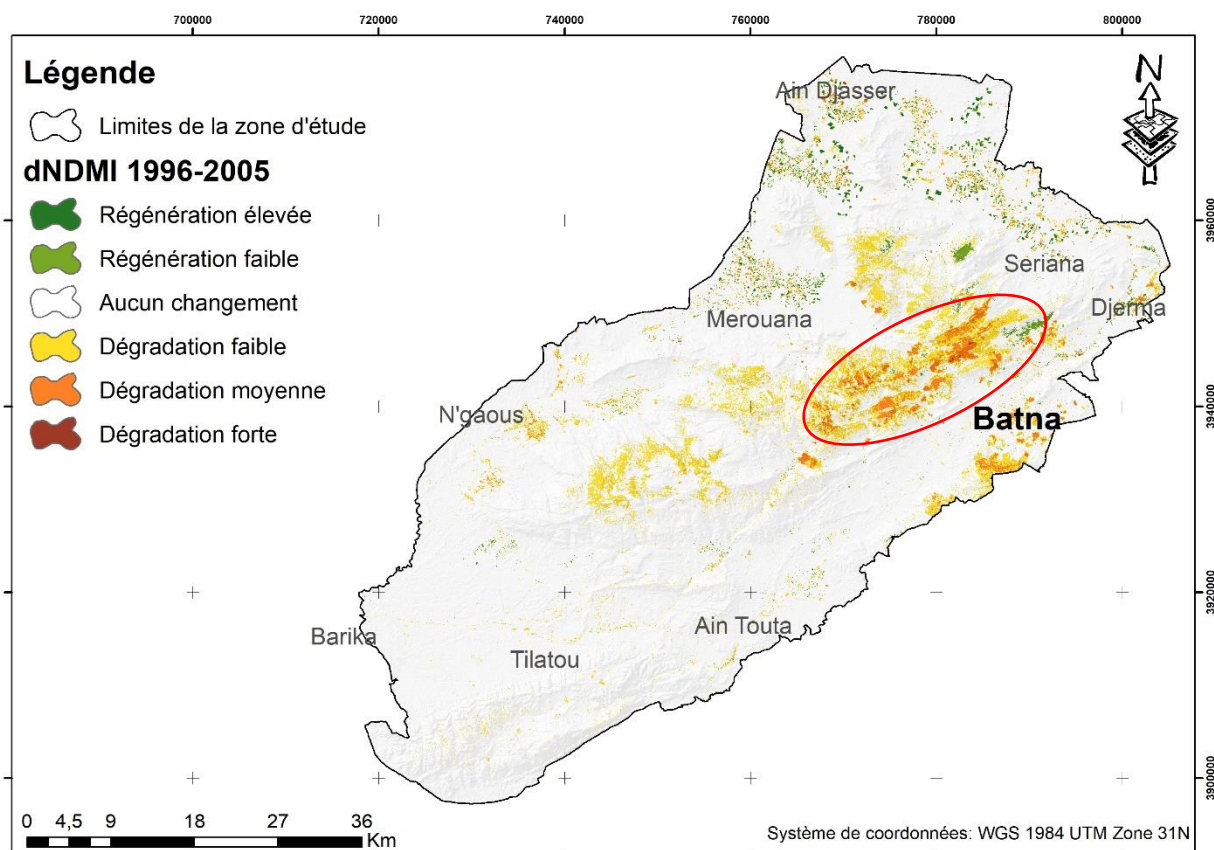


Figure. 75 : dNDMI 1996-2005 de la zone d'étude.

La figure 75 présente les pertes en couvert végétal entre 1996 et 2005 à cause de plusieurs facteurs, citant les facteurs naturels comme le changement climatique et les facteurs anthropiques, surtout les incendies enregistrés dans cette période dans les forêts du Belezma.

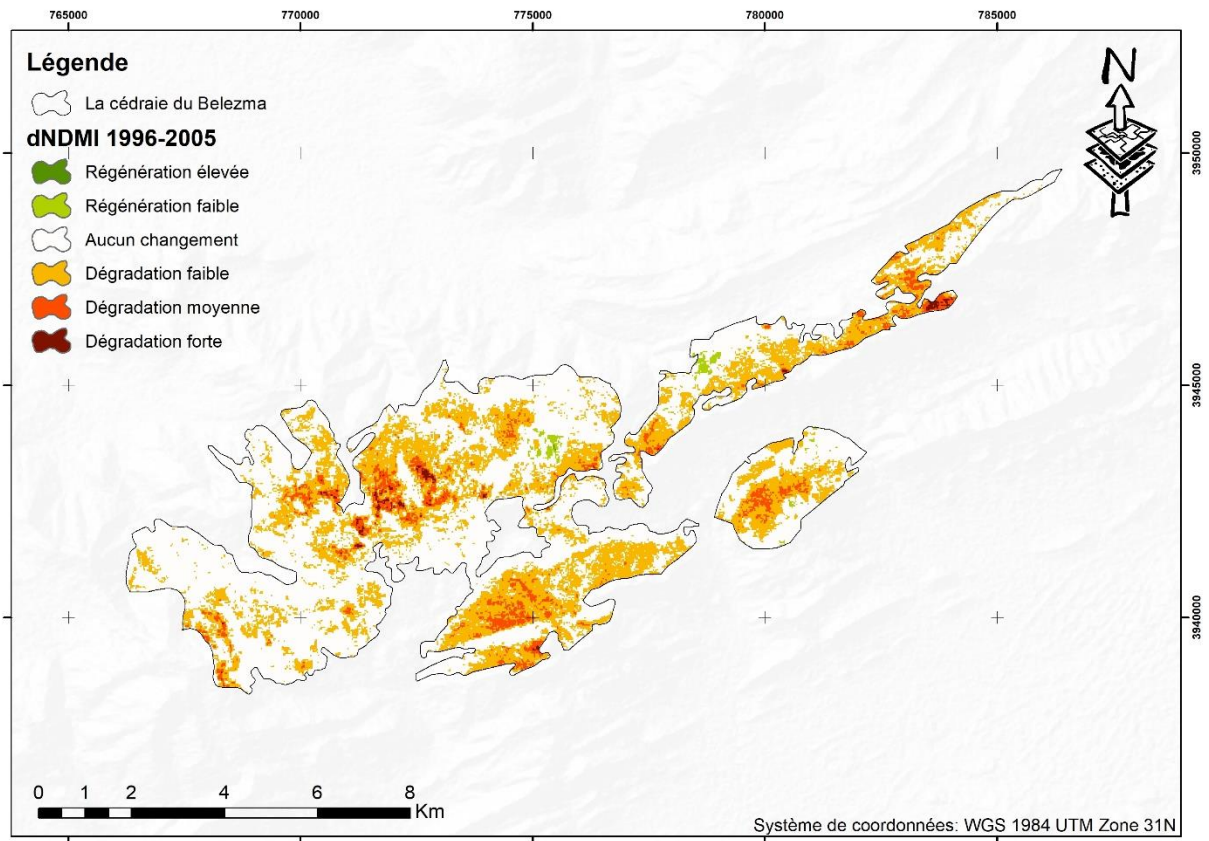


Figure. 76 : dNDMI 1996-2005 de la cédraie du Belezma.



Figure. 77 : La cédraie déperie du Bordjem, Belezma 2022.

L'utilisation de la différence de l'indice de l'humidité par différence normalisée avant et après la période de déficit hydrique, permet de montrer un degré de dégradation faible, moyenne et forte dans la cédraie du Belezma présenté dans la figure 76 et 77, et une très faible régénération des autres peuplements forestiers.

**Tableau. 29 :** La superficie des changements dans la cédraie en 2005.

Degrés des changements dans la surface foliaire	Valeurs de dNDMI	Superficie de la cédraie (Ha)
Régénération élevée	-0,5 à -0,251	0,29
Régénération faible	-0,250 à -0,101	35,82
Aucun changement	-0,100 à 0,99	3551,21
Dégradation faible	0,1 à 0,269	1965,92
Dégradation moyenne	0,270 à 0,439	301,52
Dégradation forte	0,440 à 0,659	26,54
Dégradation très forte	0,660 à 1	/
<b>Superficie totale de la cédraie</b>		<b>5881,4</b>

Selon la figure 76 et le tableau 29, en 2005, une perte massive de la cédraie de Belezma est estimée à 2.294 ha, soit 39 % de la superficie totale de la cédraie, alors que 3.551 ha reste sans changement.

### Conclusion

Les résultats obtenus nous ont permis de détecter et de quantifier la dégradation massive du couvert végétal, en particulier la cédraie de Belezma.

La baisse des précipitations dans la période de développement du couvert végétal sur plusieurs années successives entre 1999 et 2002 est le facteur déclenchant le dépérissement massif de cette cédraie avec une perte de 2.294 ha. L'utilisation des indices de NDVI, NDMI et dNDMI avec la plateforme Google Earth Engine, permet de visualiser l'état réel des pertes du couvert végétal de la zone d'étude et permet de suivre l'état sanitaire des peuplements forestiers.

L'utilisation d'autres facteurs météorologiques et d'autres indices et images satellitaires peut fournir une meilleure compréhension et détection du comportement des espèces face aux différentes pressions.

## **CHAPITRE VI :**

**LES ORCHIDEES, INDICATEURS DE LA BIODIVERSITE DE LA  
REGION DU BELEZMA : ETUDE CARTOGRAPHIQUE,  
ECOLOGIQUE ET ENJEUX DE CONSERVATION**

## Introduction

La diversité floristique et écosystémique de l'Algérie conduit les botanistes à diviser traditionnellement les territoires en 20 unités phytogéographiques, dont 15 pour l'Algérie du Nord (sensu QUEZEL & SANTA, 1962-1963 ; modif. MEDDOUR, 2010). Des études bibliographiques et des inventaires de terrain, réalisés entre 2012 et 2020, ont déjà permis d'inventorier 42 zones importantes pour les plantes (ZIP), avec la perspective d'en identifier plus de 50 à terme (BENHOUBOU *et al.*, 2018 ; VELA, 2018).

Le vaste territoire algérien et sa situation géographique lui confèrent une flore très diversifiée où plus de 3700 espèces et sous-espèces végétales sont décrites dans la Flore d'Algérie (QUEZEL & SANTA, 1962-1963) mise à jour récemment par DOBIGNARD & CHATELAIN (2010-2013) qui font état de plus de 4000 espèces et sous-espèces.

Concernant les orchidées, dont beaucoup sont rares, endémiques, protégées, menacées, la flore de MAIRE (1960) et celle de QUEZEL & SANTA (1962-1963) ont recensé 48 espèces pour l'Algérie, et plus de 60 taxons en comptabilisant les sous-espèces et variétés. Ce sont désormais 75 orchidées, espèces ou sous-espèces, qui sont comptabilisées pour l'Algérie (DOBIGNARD & CHATELAIN, 2010-2013). Cependant, depuis les années 2013-2020, plusieurs découvertes d'espèces ou de stations pour l'Algérie sont venues enrichir notre connaissance : l'inventaire des orchidées des environs de Tlemcen par BABALI *et al.* (2013), la révision de la section *Pseudophrys* et la redécouverte d'*Ophrys migoutiana* et *Ophrys funerea* par REBBAS & VELA (2013), puis celle d'*Ophrys pallida* par HADJI & REBBAS (2014), les visites et travaux de Karel Kreutz (KREUTZ *et al.*, 2013, 2014), le tout synthétisé, pour l'est du pays seulement, dans l'étude cartographique de MARTIN *et al.* (2020).

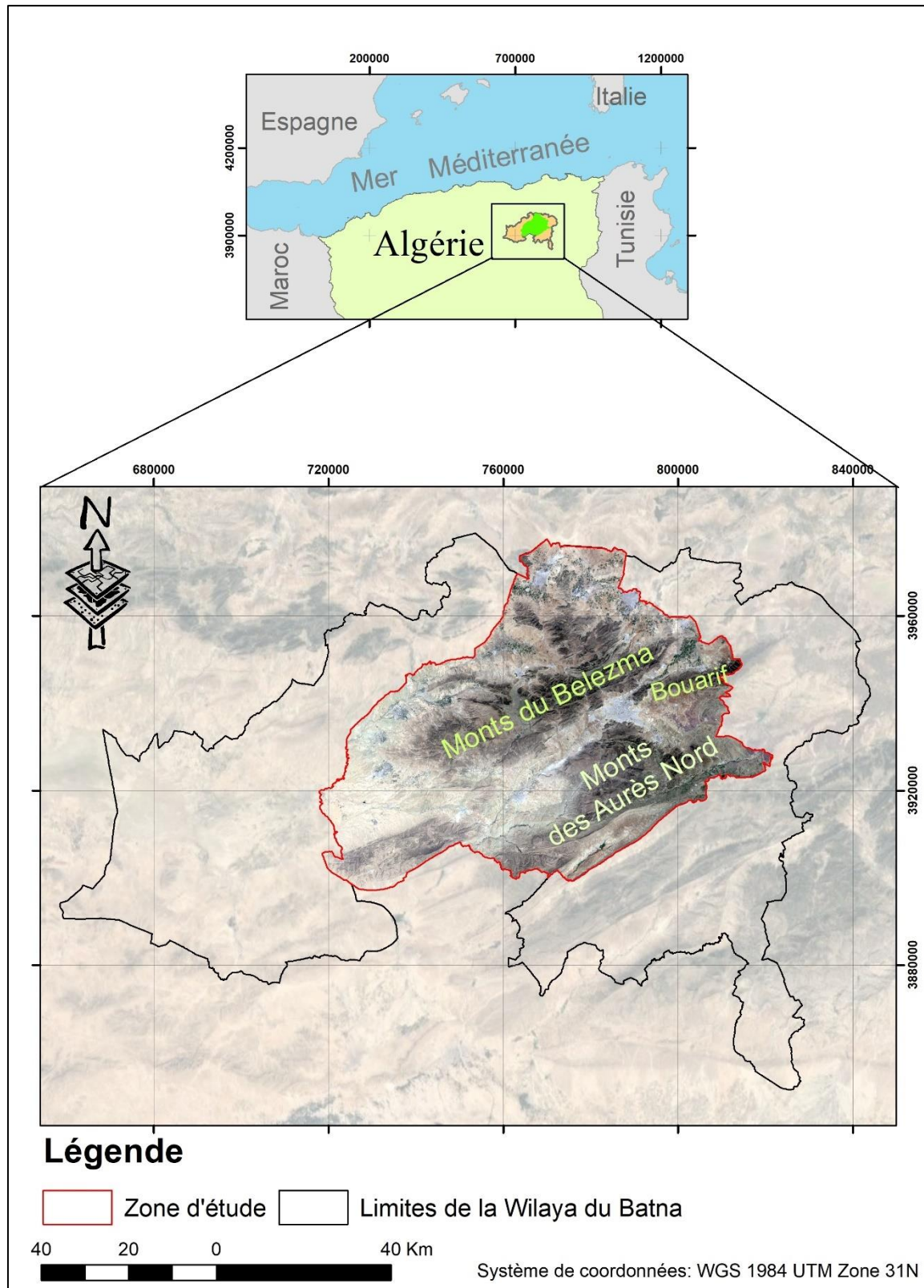
QUEZEL & SANTA (1962-1963) et MAIRE (1960) ont signalé 9 taxons d'orchidées dans l'Aurès (sous-secteur AS3) et/ou le Belezma, voire l'ensemble des monts du Hodna (partie du sous-secteur C1 devenu sous-secteur C2 sensu MEDDOUR 2010) de l'Atlas saharien (secteur AS) : *Ophrys scolopax* (var. *picta* f. *colorata*), *Ophrys lutea*, *Orchis papilionacea* (var. *genuina*), *Orchis purpurea*, *Orchis mascula* subsp. *olbiensis*, *Aceras anthropophora*, *Anacamptis pyramidalis* (f. *apiculata*), *Epipactis helleborine* (var. *platyphylla*), *Cephalanthera damasonium*. Parmi ces taxons, on peut garder en mémoire *Ophrys subfusca* (s.l.), signalé en C2 mais dans le massif voisin de Bou Taleb, et *Platanthera algeriensis*, signalé à Aïn Sebgag dans l'Atlas saharien central (AS2). Plus récemment, ABDESSEMED (1981), dans ses travaux consacrés à la phytosociologie des cédraies de l'Aurès, a noté deux autres orchidées

(*Anacamptis morio* subsp. *longicornu*, *Ophrys fusca* s.l.) et finalement BEGHAMI *et al.* (2015) ont inventorié trois autres taxons d'orchidées dans cette zone (*Himantoglossum hircinum*, *Cephalanthera longifolia*, *Ophrys tenthredinifera* subsp. *ficahoa*). Pour autant, MARTIN *et al.* (2020) n'ont pu cartographier que 8 taxons d'observation récente pour l'ensemble Aurès-Belezma, car seules les ZIP de l'Aurès oriental (Chélia et Ouled Yagoub, sur la wilaya de Khenchela) avaient été prospectées, alors qu'aucune étude n'avait été réalisée dans l'Aurès occidental (Djebel Mahmel) et la région de Belezma.

À travers cette étude, nous nous sommes fixé les objectifs suivants :

- Réaliser un inventaire des orchidées de la zone de Belezma et de la partie centro-occidentale de l'Aurès sur la wilaya de Batna, complétant les données existantes de l'Aurès oriental (BEGHAMI *et al.* 2015) ;
- Réaliser un bilan cartographique pour chaque espèce et un bilan de population par station ;
- Connaitre leur écologie (phénologie par espèce et habitats naturels abritant ces plantes),
- Valoriser la diversité de cette zone biogéographique méditerranéenne,
- Classement des espèces dans les statuts officiels de conservation,
- Enjeux de conservation et menaces.

Enfin, les données présentées dans cette étude seront cruciales pour améliorer nos connaissances sur les orchidées en particulier et la flore de cette région en général, et d'attirer l'attention sur ces espèces floristiques rares et menacées.



**Figure. 78 :** Carte de localisation de la zone d'étude dans la wilaya de Batna  
(Image satellitaire Landsat 8 OLI\_TIRS, Path 194, Row 35 du 08 mai 2017 au 1/1000 000 sur fond des images satellites Google).

## 6.1. Matériels et méthodes

Pour la recherche des stations d'orchidées, nous avons opté pour l'échantillonnage subjectif, étant donné qu'aucune donnée historique n'était suffisamment précise pour orienter l'échantillonnage.

Les sorties sur le terrain ont été réalisées durant les printemps de 2011 à 2022 (de mars à juillet) d'une façon assez régulière. Les données récoltées sur le terrain ont porté sur tous les paramètres existants :

- Le nom scientifique de l'orchidée (Identification provisoire),
- La photographie de l'espèce pour l'identification exacte et plus précise,
- La date et le lieu des observations ;
- Les coordonnées GPS de la station (latitude, longitude et altitude en WGS84), à l'aide d'un appareil GPS GARMIN OREGON 550 ;
- L'exposition et la pente, déterminées sur site et par modèle numérique de terrain ;
- Les formations végétales (description du milieu, l'occupation du sol et la présence des espèces herbacées, arbustives et arborescentes),
- Le type de sol, par description sur le terrain et utilisation des anciennes cartes du sol de France (R. Jaseix Bellon, Service géographique de l'armée, 1938), du parc national de Belezma et de la lithologie BNEDER, IFN (2008) de la zone. (Figure. 80).
- Les étages bioclimatiques selon la carte réalisée par l'extrapolation des données climatiques de la station météorologique d'Ain Skhouna de Batna pour la période 1989-2017 utilisant les techniques de la géomatique et le modèle numérique du terrain ASTER GDEM. (Figure. 79).

La méthode d'extrapolation des données climatiques selon les altitudes et les expositions (SELTZER, 1946), à savoir :

Le gradient thermique de SELTZER (1946) qui est pris en considération pour l'extrapolation des données :

\* Baisse de 0,45°C tous les 100 m d'altitude pour les températures moyennes minimales mensuelles,

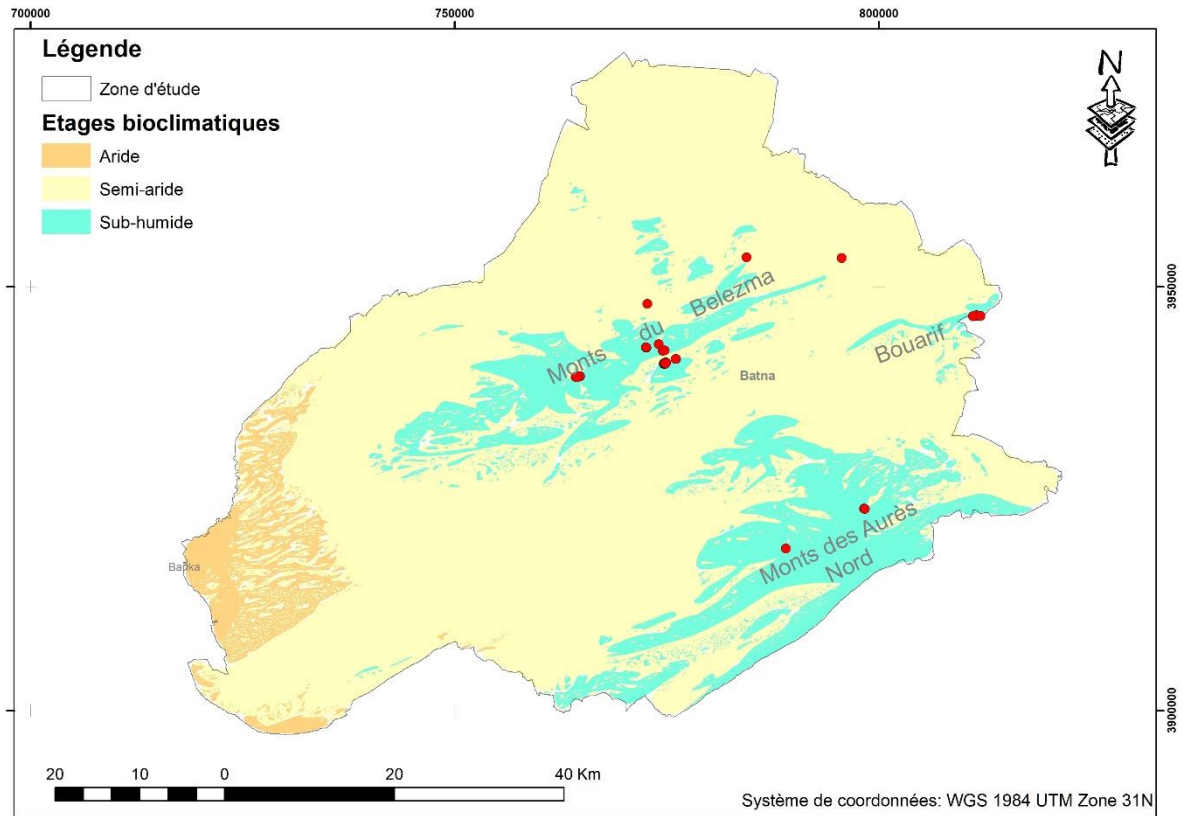
\* Baisse de 0,7°C tous les 100 m d'altitude pour les températures moyennes maximales mensuelles, et le gradient pluviométrique de SELTZER (1946) qui est pris en considération pour l'extrapolation des données :

\* Augmentation de 40 mm pour une élévation de 100 m d'altitude pour le versant à exposition Nord,

\* Augmentation de 20 mm pour une élévation de 100 m d'altitude pour le versant à exposition sud.

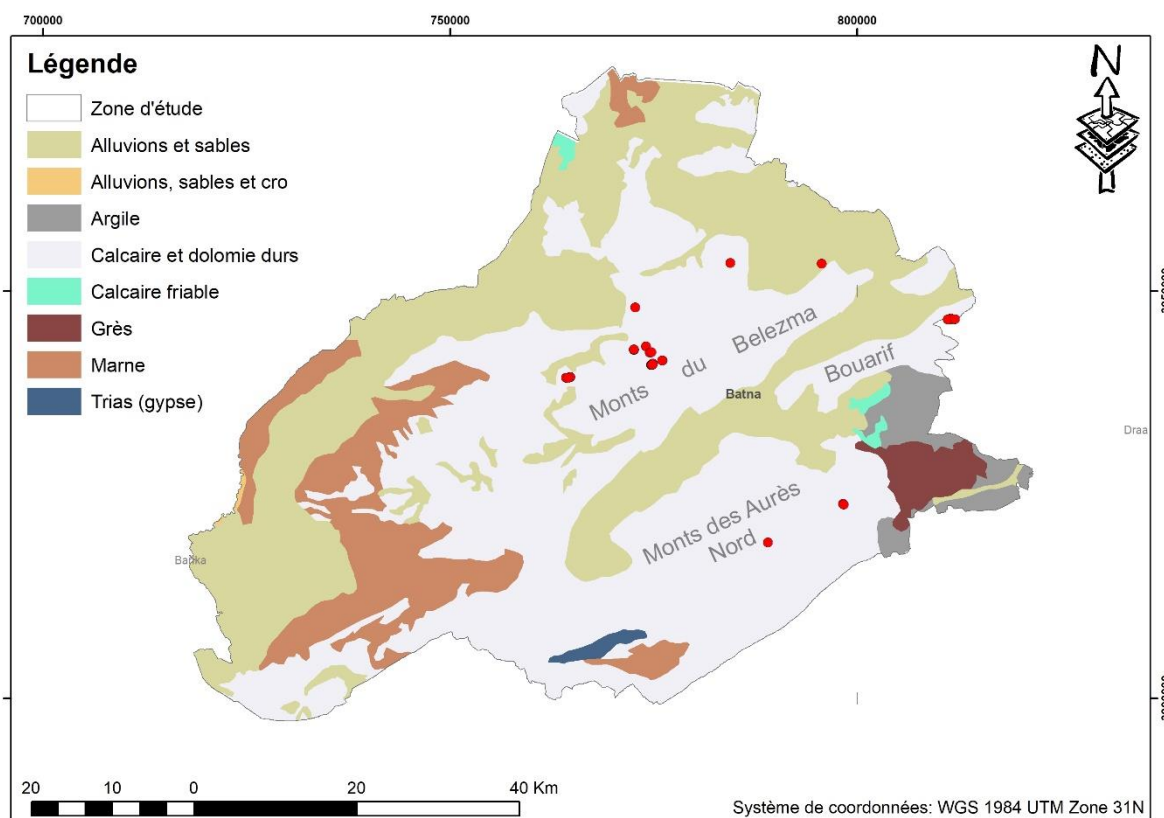
En Algérie, STEWART (1969) a développé une reformulation du quotient pluviothermique (EMBERGER, 1952) :

$$Q_2 = K \frac{P}{M-m}$$



**Figure. 79 :** Carte des étages bioclimatiques de la région des Aurès et de Belezma.

(Réalisée par l'extrapolation des données climatiques de la station météorologique d'Ain Skhouna de Batna pour la période 1989-2017 utilisant les techniques de la géomatique et le modèle numérique du terrain téléchargeable GDEM, ASTER (2022) (d'une résolution de 30m), Project of the Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan (METI) and the National Aeronautics and Space Administration (NASA). Carte réalisée au 1/500 000 par AIT MEDJBER Rachid.



**Figure. 80** : Carte lithologique de la région des Aurès et de Belezma (BNEDER, IFN, 2008).

Carte réalisée au 1/500 000, modifiée par AIT MEDJBER Rachid.

Où  $K$  est une constante qui égale 3,43

$P$  Précipitation annuelle moyenne en mm

$M$ - $m$  températures en degrés Celsius ( $M$  : la moyenne des maxima de température du mois le plus chaud et  $m$  : la moyenne des minima de température du mois le plus froid).

FAURIE *et al.* (2003) avancent que cet indice n'est vraiment établi que pour la région méditerranéenne et qu'en fonction de la valeur de ce coefficient, on distingue les zones suivantes :

- Humides pour  $Q_2 > 100$ ,
- Subhumide pour  $100 > Q_2 > 50$ ,
- Semi-arides pour  $50 > Q_2 > 25$ ,
- Arides pour  $25 > Q_2 > 10$ ,
- Désertiques pour  $Q_2 < 10$ .

Des prélèvements ciblés lorsque nécessaire ont été complétés par des photographies systématiques de chaque taxon dans chaque station. Nous avons aussi noté le nombre d'individus de chaque espèce d'orchidée pour permettre de comprendre leurs évolutions. Les orchidées ont été identifiées et nommées conformément à MARTIN *et al.* (2020).

## 6.2. Résultats

Treize taxons d'orchidées ont été identifiés dans la région du Belezma et des Aurès.

**Tableau. 30** : Liste des espèces avec leur présence par station, superficie des stations, floraison et fructification.

	Taxon	Station	Nombre d'individus	Surface en m <sup>2</sup>	Floraison observée	Fructification observée	Observation
1	<i>Ophrys tenthredinifera</i> subsp. <i>ficalhoana</i>	Tizi Nselli (dj. Tougourt)	13	1	06/06/2018 21/04/2020 03/05/2020 21/05/2021	23/07/2022	3 individus avec fructification
2.1	<i>Androrchis olbiensis</i>	Tizi Nselli (dj. Tougourt)	100	50	14/04/2020 03/05/2021	23/07/2022	5 individus avec fructification
2.2	<i>Androrchis olbiensis</i>	Djebel Bouarif	10	100	23/04/2021	/	La station n'est pas revisitée
2.3	<i>Androrchis olbiensis</i>	Djebel Zgag	1	1	18/04/2022	/	Aucune trace
3	<i>Ophrys battandieri</i>	Tizi Nselli (dj. Tougourt)	10	10	21/04/2020 03/04/2021	23/07/2022	3 individus avec fructification
4	<i>Ophrys flammeola</i>	Tizi Nselli (dj. Tougourt)	30	25	21/04/2020 03/04/2021	23/07/2022	3 individus avec fructification
5	<i>Anacamptis morio</i> subsp. <i>longicornu</i>	Bordjem	5	5	17/04/2020	/	La station n'est pas revisitée
6.1	<i>Anacamptis papilionacea</i> subsp. <i>expansa</i>	Oued El Ma	10	50	18/04/2016 11/04/2018 10/04/2021	23/07/2022	Aucune trace de taxon
6.2	<i>Anacamptis papilionacea</i> subsp. <i>expansa</i>	Djebel Bouarif	4	1	11/05/2021	23/07/2022	Aucune trace de taxon
7.1	<i>Dactylorhiza maculata</i> subsp. <i>battandieri</i>	Entre dj. Dhraa Aissi et dj. Saresa	100	100	21/05/2020 29/06/2020 30/05/2021	/	La station n'est pas revisitée
7.2	<i>Dactylorhiza maculata</i> subsp. <i>battandieri</i>	Oued Saboun (Tafrent)	10	5000	17/06/2021 23/06/2022	21/07/2022	1 individus avec fructification

7.3	<i>Dactylorhiza maculata</i> subsp. <i>battandieri</i>	Oued Saboun (Tafrent), pas loin de la route Batna Merouana	50	400	17/06/2021 23/06/2022	21/07/2022	2 individus avec fructification et 5 individus sans fructification
8	<i>Anacamptis pyramidalis</i>	Bordjem	50	100	05/06/2020 08/06/2020	25/07/2022	1 individus avec fructification
9	<i>Ophrys marmorata</i>	Seriana, dj. El Guella	2	1	30/03/2016	23/07/2022	Aucune trace de taxon
10	<i>Himantoglossum hircinum</i>	Djebel Bouarif	150	10000	27/05/2021	23/07/2022	5 individus avec fructification et 15 individus sans fructification
11.1	<i>Dactylorhiza elata</i> (Poir.)	Oued Saboun (Tafrent)	400	5000	17/06/2021 23/06/2022	21/07/2022	1 individus avec fructification
11.2	<i>Dactylorhiza elata</i> (s.l.)	Oued Saboun (Tafrent), pas loin de la route Batna Merouana	150	400	17/06/2021 23/06/2022	21/07/2022	1 individus avec fructification et 5 individus sans fructification
11.3	<i>Dactylorhiza elata</i> (s.l.)	Oued Saboun (Tafrent) clôture privée	100	400	17/06/2021 23/06/2022	21/07/2022	La station n'est pas revisitée
12	<i>Neotinea lactea</i> subsp. <i>conica</i>	Bordjem	1	1	03/05/2011	/	La station n'est pas revisitée
13	<i>Ophrys speculum</i> subsp. <i>speculum</i>	Djerma Dahra	4	2	17/04/2022 04/05/2022	23/07/2022	Aucune trace de taxon



**Figure. 81** : Station 2.1 d'*Androrchis olbiensis*, Tizi Nselli, Belezma 21/04/2020, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 82** : Station 7.1 de *Dactylorhiza maculata* subsp. *battandieri*, entre Djbel Dhraa Aissi et Djbel Saresa, Aurès Nord 07/06/2020, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



Figure. 83 : Station 11.1 de *Dactylorhiza elata* s.l., Oued Saboun Tafrent, Belezma, 17/06/2021, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



Figure. 84 : *Ophrys tenthredinifera* subsp. *ficvalhoana*, station 1, Belezma, 03/05/2020, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



Figure. 85 : *Androrchis olbiensis*, station 2.1, Belezma, 21/04/2020, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 86 :** *Ophrys battandieri*, station 3, Belezma, 03/04/2021, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 87 :** *Ophrys flammeola*, station 4, Belezma, 03/04/2021, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 88 :** *Anacamptis morio* subsp. *longicornu*, station 5, Belezma, 17/04/2020, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 89 :** *Anacamptis papilionacea* subsp. *expansa*, station 6.1, Belezma, 18/04/2016, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 90 :** *Dactylorhiza maculata* subsp. *battandieri*, station 7.1, Aurès Nord, 21/05/2020, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 91 :** *Anacamptis pyramidalis*, station 8, Belezma, 05/06/2020, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 92 :** *Ophrys marmorata*, station 9, Belezma, 30/03/2016, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 93 :** *Himantoglossum hircinum*, station 10, Bouarif, 27/05/2021, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 94 :** *Dactylorhiza elata s.l.*, station 11.1, Belezma, 17/06/2021, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 95 :** *Dactylorhiza elata s.l.*, station 11.1, Belezma, 17/06/2021. La tige vide est un des critères d'identification de cette espèce, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 96 :** *Dactylorhiza maculata* subsp. *battandieri*, station 11.1, Belezma, 17/06/2021. La tige remplie est un des critères d'identification de cette espèce, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 97:** *Neotinea lactea* subsp. *conica*, station 12, Belezma, 03/05/2011, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



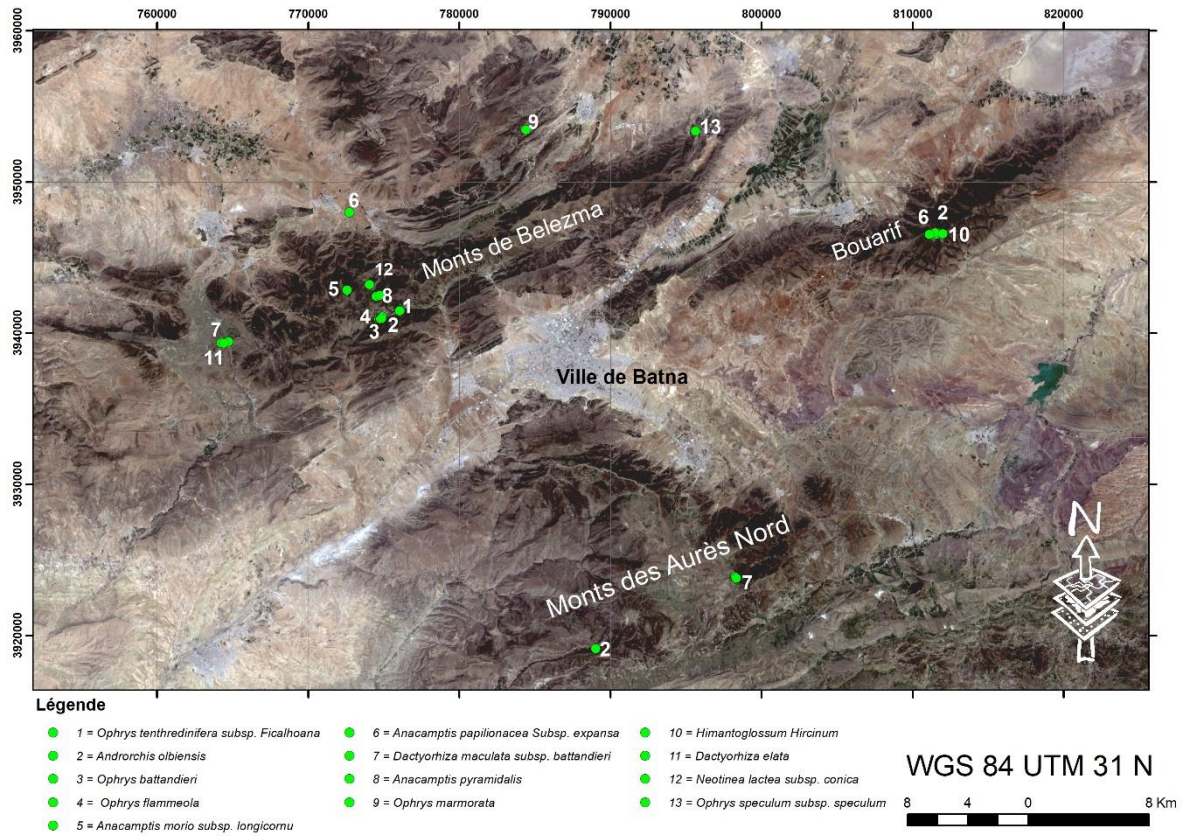
**Figure. 98 :** *Ophrys speculum* subsp. *speculum*, station 13, Belezma, 17/04/2022, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).

**Tableau. 31 :** Caractéristiques physiques des stations, lieu-dit, versant, lithologie, type de sol, pente, coordonnées GPS, description, étage bioclimatique, exposition à la lumière, matière organique et espèces dominantes.

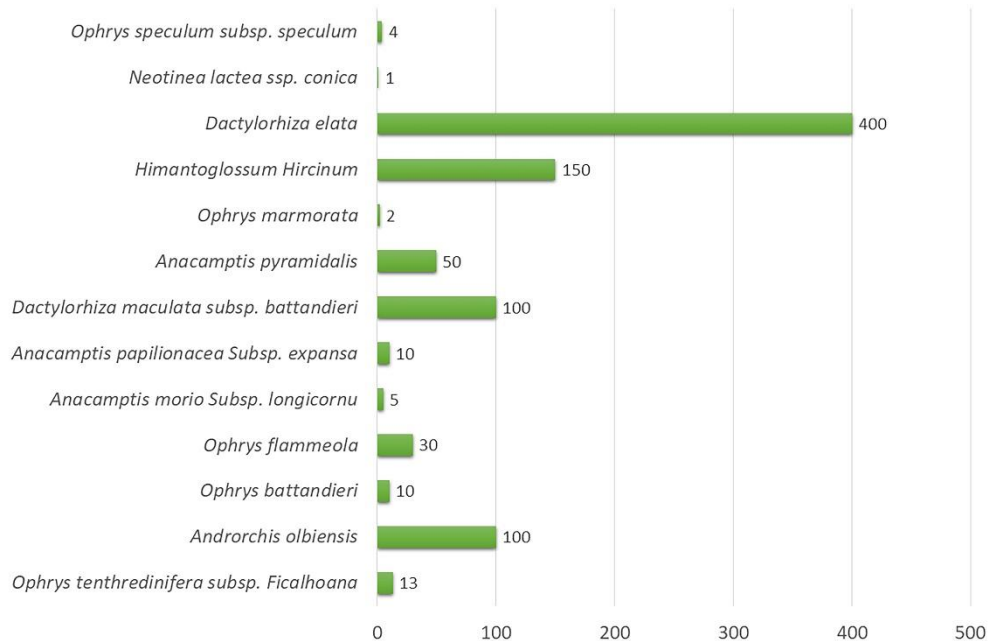
N° de Station	Taxon	Station	Monts	Versant	Lithologie	Sol	Pente	Latitude (WGS84 degré décimale)	Longitude (WGS84 degré décimale)	Altitude en m)	Description du milieu	Etage bioclimatique	Lumière	Matière organique	Espèces dominantes
1	<i>Androrchis olbiensis</i>	Tizi Nselli (djebel Tougourt)	Belezma	Nord	Calcaire et dolomie durs	Insaturé humifère, bruns calcaires, peu évolué	0 à 10%	35,578477° Nord	6,046361° Est	1495	Forêt de cèdre en mélange avec chêne vert et genévrier oxycèdre	Sub-humide	Sous l'ombre du cèdre	Présence de matière organique	Cèdre de l'Atlas
2.1	<i>Androrchis olbiensis</i>	Tizi Nselli (djebel Tougourt)	Belezma	Nord	Calcaire et dolomie durs	Insaturé humifère, bruns calcaires peu évolué	0 à 30%	35,575227° Nord 35,578510° Nord	6,033085° Est 6,046707° Est	1490 - 1550	Forêt de cèdre en mélange avec chêne vert et genévrier oxycèdre à côté d'un oued	Sub-humide	Sous l'ombre du cèdre de l'Atlas et du chêne vert	Présence de matière organique	Cèdre de l'Atlas et chêne vert
2.2	<i>Androrchis olbiensis</i>	Djebel Bouarif	Bouarif	Nord	Calcaires et dolomies dures, avec localement des affleurements rocheux et lithosols	Calcaire humifère	0 à 50%	35,614491° Nord	6,438769° Est	1698 - 1714	Pelouse/parcours, présence de chêne vert	Semi-aride	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Herbacée
2.3	<i>Androrchis olbiensis</i>	Djebel Zgag	Aurès	Nord	Calcaires et dolomies dures, avec localement des affleurements rocheux et lithosols	Insaturé humifère	5 à 30%	35,373573° Nord	6,181335° Est	1694	Forêt de cèdre en mélange avec chêne vert et genévrier oxycèdre	Sub-humide	Sous l'ombre du cèdre de l'Atlas et du chêne vert	Présence de matière organique	Cèdre de l'Atlas
3	<i>Ophrys battandieri</i>	Tizi Nselli (djebel Tougourt)	Belezma	Nord	Calcaire et dolomie durs	Insaturé humifère, bruns calcaires peu évolué	0 à 10%	35,574041° Nord	6,032074° Est	1400 - 1550	Forêt de cèdre en mélange avec chêne vert et genévrier oxycèdre	Sub-humide	Sous l'ombre du cèdre de l'Atlas et du chêne vert, mais plus exposée à la lumière	Présence de matière organique	Cèdre de l'Atlas et chêne vert
4	<i>Ophrys flammeola</i>	Tizi Nselli (djebel Tougourt)	Belezma	Nord	Calcaire et dolomie durs	Insaturé humifère, bruns calcaires peu évolué	0 à 10%	35,574041° Nord	6,032074° Est	1400 - 1550	Forêt de cèdre en mélange avec chêne vert et genévrier oxycèdre	Sub-humide	Sous l'ombre du cèdre de l'Atlas et du chêne vert, mais plus exposée à la lumière	Présence de matière organique	Cèdre de l'Atlas et chêne vert
5	<i>Anacamptis morio</i>	Bordjem	Belezma	Nord	Calcaires et dolomies dures, avec localement	Insaturé humifère, bruns	0 à 30%	35,591885° Nord	6,008328° Est	1848 - 1860	Forêt de cèdre à côté d'une pelouse pseudo-alpine	Sub-humide	Sous l'ombre du cèdre de l'Atlas et du	Présence de	Cèdre de l'Atlas

	subsp. <i>longicornu</i>				des affleurements rocheux et lithosols	faiblement calcaires peu évolué							chêne vert, mais plus exposée à la lumière	matière organique	
6.1	<i>Anacamptis papilionacea</i> subsp. <i>expansa</i>	Oued El Ma (Entre-la Cité Benali et Oued el Ma)	Belezma	Nord	Calcaire et dolomie durs	Calcaire humifère	0%-5%	35,638035° Nord	6,011807° Est	1050	Terrain non labourable entre des terrains agricoles	Semi-aride	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Herbacées
6.2	<i>Anacamptis papilionacea</i> subsp. <i>expansa</i>	Djebel Bouarif	Bouarif	Nord	Calcaires et dolomies dures, avec localement des affleurements rocheux et lithosols	Calcaire humifère	0 à 20%	35,610927° Nord	6,430362° Est	1590	Pelouse/parcours	Semi-aride	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Herbacée
7.1	<i>Dactylorhiza maculata</i> subsp. <i>battandieri</i>	Entre djebel Dhraa Aissi et djebel Saresa	Aurès	Est	Calcaires et dolomies dures, avec localement des affleurements rocheux et lithosols	Insaturé humifère	0 - 30 %	35,413491° Nord	6,284614° Est	1700 - 1725	À côté et au milieu d'un petit oued alimenté par une source permanente juste avant une petite cascade	Sub-humide	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Herbacées
7.2	<i>Dactylorhiza maculata</i> subsp. <i>battandieri</i>	Oued Saboun (Tafrent)	Belezma	Nord	Calcaire et dolomie durs	Calcaire humifère	0 à 10%	35,562686° Nord	5,915480° Est	1555	À côté et au milieu de l'oued Saboun (deux sources alimentent l'oued)	Sub-humide	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Herbacées
7.3	<i>Dactylorhiza maculata</i> subsp. <i>battandieri</i>	Oued Saboun (Tafrent), pas loin de la route Batna Merouana	Belezma	Nord	Calcaire et dolomie durs	Calcaire humifère	0 à 10%	35,563358° Nord	5,921036° Est	1546	À côté et au milieu de l'oued Saboun (deux sources alimentent l'oued)	Sub-humide	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Herbacées
8	<i>Anacamptis pyramidalis</i>	Bordjem	Belezma	Nord	Calcaires et dolomies dures, avec localement des affleurements rocheux et lithosols	Insaturé humifère, bruns faiblement calcaires peu évolué	0 à 50%	35,587655° Nord	6,029787° Est	1775 - 1820	Forêt de cèdre, pelouse	Sub-humide	Partiellement sous l'ombre du cèdre de l'Atlas et du chêne vert, mais plus exposée à la lumière	Présence de matière organique	Cèdre de l'Atlas
9	<i>Ophrys marmorata</i>	Seriana, djebel el Guella	Belezma	Nord Est	Calcaire et dolomie durs	Calcaire humifère	15%	35,683711° Nord	6,142558° Est	1220	Forêt de pin d'Alep, chêne vert, lentisque, genévrier oxycèdre et rouge	Semi-aride	Partiellement sous l'ombre du pin d'Alep et du chêne vert mais moins	Présence de matière organique	Pin d'Alep

													exposée à la lumière		
10	<i>Himantoglossum hircinum</i>	Djebel Bouarif	Bouarif	Nord	Calcaires et dolomies dures, avec localement des affleurements rocheux et lithosols	Calcaire humifère	0 à 20%	35,613627° Nord	6,439276° Est	1640 - 1730	Pelouse/parcours, présence de chêne vert	Semi-aride	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Herbacée
11.1	<i>Dactylorhiza elata (Poir.)</i>	Oued Saboun (Tafrent)	Belezma	Nord	Calcaire et dolomie durs	Calcaire humifère	0 à 10%	35,562686° Nord	5,915480° Est	1555	À côté et au milieu de l'oued Saboun (deux sources alimentent l'oued)	Sub-humide	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Herbacées
11.2	<i>Dactylorhiza elata (s.l.)</i>	Oued Saboun (Tafrent), pas loin de la route Batna Merouana	Belezma	Nord	Calcaire et dolomie durs	Calcaire humifère	0 à 10%	35,563358° Nord	5,921036° Est	1546	À côté et au milieu de l'oued Saboun (deux sources alimentent l'oued)	Sub-humide	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Herbacées
11.3	<i>Dactylorhiza elata (s.l.)</i>	Oued Saboun (Tafrent), clôture privée	Belezma	Nord	Calcaire et dolomie durs	Calcaire humifère	0 à 10%	35,562208° Nord	5,917350° Est	1552	À côté et au milieu de l'oued Saboun (deux sources alimentent l'oued)	Sub-humide	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Herbacées
12	<i>Neotinea lactea subsp. conica</i>	Bordjem	Belezma	Nord	Calcaires et dolomies dures, avec localement des affleurements rocheux et lithosols	Insaturé humifère, bruns faiblement calcaires peu évolué	30%	35,594711° Nord	6,024951° Est	1600	Pelouse, forêt de cèdre	Sub-humide	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Herbacées
13	<i>Ophrys speculum subsp. speculum</i>	Djerma Dahra	Belezma	Nord	Calcaire et dolomie durs	Calcaire humifère, bruns faiblement calcaires peu évolué	20%	35,679853° Nord	6,266422° Est	1031	Forêt de pin d'Alep, romarin, ciste.	Semi-aride	Exposée à la lumière	Pauvre en matière organique	Pin d'Alep



**Figure. 99 :** Carte de localisation des orchidées dans la zone d'étude (Sur fond des images satellitaires Landsat 8 OLI\_TIRS, Path 194, Row 35 du 08 mai 2017, réalisée au 1/270 000 par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 100 :** Nombre total d'individus recensés par espèce.

### 6.3. Discussion

#### 6.3.1. Écologie des espèces

Les deux stations de *Dactylorhiza maculata* subsp. *battandieri* et *Dactylorhiza elata* (s.l.) se trouvent à côté et au milieu des petits oueds alimentés par des sources permanentes et qui ont été taris en saison estivale de 2021, malheureusement dans la période de la floraison. Cependant, certains individus peuvent aboutir à la fructification dans les zones inaccessibles.

La lithologie est caractérisée par la présence de calcaire et de dolomie durs, ainsi que par la présence locale d’affleurements rocheux et de lithosols, avec un sol calcaire, humifère et insaturé.

La majorité des espèces inventoriées se localisent dans les milieux ouverts (tels que les pelouses) et dans des forêts dégradées (telles que la cédraie et la pinède) ou dans des matorrals de chêne vert. Elles se trouvent à des altitudes de 1031 à 1860 m et sur les versants Nord, dans un bioclimat allant de semi-aride à subhumide.

#### 6.3.2. Diversité et biogéographie

La région des Aurès est considérée comme pauvre en termes de diversité des orchidées par rapport aux zones littorales telles que la Kabylie et la Numidie où 16 espèces ont été inventoriées (BEGHAMI *et al.*, 2015). Dans cette étude nous avons observé 13 espèces et sous-espèces, dont trois n’avaient jamais été signalées dans la région des Aurès, Belezma et Bouarif (*Dactylorhiza maculata* subsp. *battandieri*, *Himantoglossum hircinum* et *Neotinea lactea* subsp. *conica*), ainsi que trois taxons qui avait été signalés historiquement dans la partie orientale des Aurès (*Anacamptis morio* subsp. *longicornu*, *Anacamptis papilionacea* subsp. *expansa*, *Anacamptis pyramidalis* subsp. *pyramidalis*) mais non revus par BEGHAMI *et al.* (2015.)

Enfin, nous avons pu préciser l’identité d’un quatrième taxon : l’*Ophrys* « *fusca* » de ABDESSEMED (1981) s’est avéré être un *Ophrys marmorata* au sens actuel de l’espèce (syn. *Ophrys fusca* subsp. *bilulunata*, syn. *Ophrys subfusca* sensu Lowe 2011).

Il va de soi qu’au vu des découvertes fortuites et régulières de nouvelles stations hébergeant un taxon nouveau ou retrouvé pour la région Aurès / Belezma / Bouarif, l’inventaire n’est probablement toujours pas complet et l’échantillonnage doit se poursuivre.

En termes de chorologie, cet inventaire permet de repousser vers le Sud la connaissance de la distribution de plusieurs espèces. Il y a évidemment divers *Ophrys* de la zone méditerranéenne (*Ophrys speculum*, *Ophrys battandieri/flameola/marmorata...*), un *Himantoglossum* méditerranéo-atlantique (*Himantoglossum hircinum*), mais aussi un *Dactylorhiza* montagnard endémique (*Dactylorhiza maculata* subsp. *battandieri*). Enfin, la découverte du taxon Ouest-méditerranéen *Neotinea lactea* subsp. *conica* vient repousser vers le sud mais aussi vers l'est la distribution connue de ce taxon, remplacé au Nord-Est par son vicariant centro-méditerranéen *N. lactea* subsp. *lactea* (cf. MARTIN *et al.*, 2020). Mais il s'agit à ce stade d'un individu isolé, peut-être non reproducteur, et donc possiblement de nature accidentelle.

**Tableau. 32 :** Liste des taxons d'Orchidées signalés à ce jour dans les massifs de l'Aurès / Belezma / Bouarif et leurs statuts officiels (Protection légale (J.O.R.A. 2012) et Statut UICN 2022 global (ou Europe)).

Nom du taxon	Anciennes observations		Observations de cette étude		Statut officiel (*à ajouter dans la liste de protection nationale)	
	Année d'observation	Mois de la Floraison	Année d'observation	Mois de la Floraison	Protection légale (J.O.R.A. 2012)	Statut UICN 2022 global (ou Europe)
<i>Anacamptis morio</i> subsp. <i>longicornu</i> (Poir.) H.Kretzsmar, Eccarius & H.Dietr.	Années 1970	février - avril	2020	avril	OUI	(VU)
<i>Anacamptis papilionacea</i> subsp. <i>expansa</i> (Ten.) Amardeilh & Dusak	<1962	mars - mai	2016-2018-2021	avril	OUI	(NE)
<i>Anacamptis pyramidalis</i> (L.) Rich. subsp. <i>pyramidalis</i>	<1962	avril - juin	2020	juin	Non	LC (Europe)
<i>Cephalanthera damasonium</i> (Mill.) Druce	<1962	mai - juillet	/	/	<b>Non*</b>	(NE)
<i>Cephalanthera longifolia</i> (L.) Fritsch !	2012	mars - mai	/	/	<b>Non*</b>	(NE)
<i>Dactylorhiza elata</i> (Poiret) Soó	<1962	avril - juin	2021	juin	OUI	NT
<i>Epipactis helleborine</i> (L.) Crantz, sensu lato ?	2009	mai - juillet	/	/	<b>Non*</b>	LC (Europe)
<i>Himantoglossum hircinum</i> (L.) Spreng. subsp. <i>hircinum</i>	2008	avril - juillet	2021	mai - juin	Non	LC (Europe)
<i>Orchis anthropophora</i> (L.) All.	<1962	mars - juin	/	/	Non	LC (Europe)
<i>Orchis olbiensis</i> Reut. ex Gren.	2005-2011	juin	2020-2021-2022	avril - mai	OUI	(NE)
<i>Orchis purpurea</i> Huds. subsp. <i>purpurea</i> .	2011	mai	/	/	OUI	LC (Europe)
<i>Ophrys lutea</i> Cav. subsp. <i>lutea</i>	2012	mars - mai			Non	(NE)
<i>Ophrys scolopax</i> subsp. <i>apiformis</i> (Desf.) Maire & Weiller	2011	mars - juin			Non	(NE)
<i>Ophrys numida</i> Devillers-Tersch. & Devillers [syn. <i>Ophrys subfusca</i> subsp. <i>subfusca</i> auct. !]	2011	février - juin			Non	(NE)
<i>Ophrys tenthredinifera</i> subsp. <i>ficahoana</i> (J.A. Guim) M.R. Lowe & D. Tyteca	2008-2011	février - mai	2018-2021	avril - mai - juin	Non	(NE)
<i>Dactylorhiza maculata</i> subsp. <i>battandieri</i> (Raynaud) Baumann & Künkele (1988)	/	/	2020-2021	mai - juin	<b>Non*</b>	LC*
<i>Neotinea lactea</i> subsp. <i>conica</i> (Willd.) J.Ponert, P.Trávn. & Chumová	/	/	2011	mai	OUI	LC
<i>Ophrys battandieri</i> E.G. Camus [syn. <i>Ophrys subfusca</i> p.p.]	/	/	2020-2021	avril	Non	(NE)
<i>Ophrys flammeola</i> P. Delforge	/	/	2020-2021	avril	(-)	(NE)
<i>Ophrys marmorata</i> G. Foelsche & W. Foelsche [syn. <i>Ophrys fusca</i> subsp. <i>fusca</i> auct. ?]	Années 1970	/	2016	mars	Non	(NE)
<i>Ophrys speculum</i> Link subsp. <i>Speculum</i>	/	/	2022	avril - mai	Non	LC

### 6.3.3. Enjeux de conservation et menaces

D'après la liste rouge actuelle de l'UICN (2022-2), une seule espèce est considérée comme presque menacée (*Dactylorhiza elata* s.l.). Mais cette liste est très incomplète, car la plupart des espèces n'ont pas été évaluées. Sur les 20 taxons recensés dans l'ensemble de la région Aurès/Belezma, seuls 4 ont été officiellement évalués à l'échelle globale ou méditerranéenne, et 5 à l'échelle européenne où la catégorie (LC) peut être élargie à l'échelle globale. Plus de la moitié des taxons (11) n'ont pas été évaluées. Pourtant, deux espèces (*Ophrys battandieri* et *Ophrys flammeola*) sont des subendémiques (respectivement Maroc-Algérie-Tunisie et Algérie-Tunisie-Sicile) et mériteraient donc une évaluation en priorité. Par ailleurs, plusieurs espèces répandues en Europe et non menacées (LC) ou non évaluées (NE) se trouvent ici en limite d'aire (*Cephalanthera damasonium*, *C. longifolia*, *Epipactis helleborine* s.l., *Orchis purpurea*). Les trois premières sont des orchidées forestières rhizomateuses et mycohétérotrophes susceptibles de régresser en Algérie (BEGHAMI *et al.*, 2015), et la dernière est une orchidée bulbeuse héliophile de milieux semi-ouverts. Toutes sont rares en Algérie et au Maghreb et mériteraient une évaluation UICN à échelle régionale. Enfin, *Dactylorhiza maculata* subsp. *battandieri* a été évaluée comme non menacée (LC) ; mais étant une endémique algéro-marocaine encore mal connue, elle gagnerait à être réévaluée avec plus d'attention, suite notamment aux publications récentes la concernant (présent travail et synthèse de MARTIN *et al.*, 2020).

En termes de menaces sur l'état de conservation des populations d'orchidées et de leurs écosystèmes, elles sont de plusieurs types : les menaces directes et les menaces indirectes, les menaces passées (stopées ou non), les menaces actuelles (en cours) et les menaces potentielles (à venir). Notons qu'il est très difficile de connaître les taxons disparus qui ne sont pas mentionnés dans les anciennes références.

Le réseau routier dans cette zone est le premier facteur qui menace la biodiversité, que ce soit par l'action de prélèvement et l'arrachage, du pâturage et du piétinement, ou par la pollution de tout type et la destruction des habitats et des stations (Figure. 102), notamment à cause de la forte croissance démographique des zones urbaines limitrophes. Dans le cas de la station d'*Ophrys tenthredinifera* subsp. *ficalhoana*, la proximité de la route est la cause de la diminution du nombre d'individus. En effet, le piétinement observé a entraîné une réduction du nombre d'individus, passant de 13 à 4 en une année.

L'extension des activités agricoles s'accompagne de surpâturage dans ces zones de montagnes qui attirent les éleveurs de troupeaux ovins, caprins et bovins tout au long de l'année, ainsi que les nomades pendant la saison printanière et estivale, avec des centaines voire des milliers de têtes (ovins et caprins) supplémentaires. Cela éclaircit le sous-bois, érode les sols, et nuit donc à la flore forestière ou semi-forestière, voire prairiale. C'est le cas de la station de *Dactylorhiza maculata* subsp. *battandieri* et de la station de *Dactylorhiza elata* s.l. dont la plupart des sujets ont été broutés en pleine floraison par des troupeaux (Figures. 101 et 103). De plus, en 2022, les conditions climatiques défavorables entraînant le tarissement précoce de la source qui alimente l'oued et le bétail ont aggravé la consommation florale de *Dactylorhiza elata*, à l'exception de la partie mise en défens (Figure. 104).

Enfin, la présence de 30 carrières en activité au milieu de cette vaste zone produit en permanence de la poussière, ce qui ajoute un risque certain pour la végétation et le reste de la biodiversité.

En ce qui concerne le changement climatique, il paraît évident que le réchauffement et l'aridification relative qu'il entraînera seront néfastes pour les orchidées forestières d'origine eurasiatique, mais pourront être positives pour les orchidées héliophiles voire xérophiles d'origine méditerranéenne.

**Figure. 101 :** Photo des résidus des plants de *Dactylorhiza maculata* subsp. *battandieri* dans la période de floraison à Dhraa Aissi, station 7.1, Aurès Nord, 30/05/2021, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).





Figure. 102 : Photo de *Ophrys speculum subsp. speculum* au milieu d'une décharge sauvage, station 13, Belezma 17/04/2022, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



Figure. 103 : Photo des résidus des plants de *Dactylorhiza elata* s.l. dans la période de floraison (surpâturage) à Oued Saboun Tafrent, station 11.1, Belezma, 23/06/2022, (Photo prise par AIT MEDJBER Rachid).



**Figure. 104 :** Photos de la station 11.1 de *Dactylorhiza elata* s.l. à Oued Saboun Tafrent avant (17/06/2021 et après 23/06/2022), (Photos présent par AIT MEDJBER Rachid).

## **Conclusion**

Il conviendrait donc tout d'abord de renforcer la protection effective in situ des espèces déjà légalement protégées : mises en défens contre les troupeaux avec surveillance active en haute saison, mise à distance des zones de stationnement et de divagation touristique avec panneaux d'information, etc.

Il conviendrait aussi d'ajouter à la liste de protection nationale (J.O.R.A., 2012) les espèces forestières eurasiatiques en limite d'aire (*Cephalanthera damasonium*, *C. longifolia*, *Epipactis helleborine* s.l.) et les sous-espèces endémiques vicariantes d'espèces européennes (*Dactylorhiza maculata* subsp. *battandieri*).

Les terrains vastes et encore peu connus du Belezma et des Aurès, qui sont en pleine dynamique avec les changements d'usage et le changement climatique, contiennent certainement une biodiversité qui reste à découvrir et surtout à surveiller de manière scientifique et planifiée.

## CONCLUSION GENERALE

La région de Belezma a été témoin d'une évolution significative des risques anthropiques et naturels qui ont profondément affecté ces écosystèmes fragiles au fil du temps. Les activités anthropiques, telles que l'urbanisation croissante, l'agriculture intensive, le tourisme non contrôlé, accompagné par l'exploitation, la pollution et la destruction des écosystèmes naturels, ont exercé une pression considérable sur les écosystèmes naturels. Parallèlement, les phénomènes naturels tels que les sécheresses récurrentes, les inondations soudaines ont exacerbé cette situation.

- L'analyse diachronique de l'évolution d'occupation du sol dans la zone d'étude à une superficie de 340.000 ha, en utilisant les images Landsat 1986, 2001 et 2021, nous a permis de détecter les changements profonds d'occupation du sol qui sont très apparents. À la suite des changements climatiques que la zone d'étude a connus, l'activité agricole s'oriente vers les cultures maraichères et l'arboriculture qui abîment les ressources hydriques, alors que les zones urbaines ainsi que le sol nu sont en augmentation continue. Le suivi des changements montre qu'une perte importante des forêts du cèdre, de la steppe et des zones humides, alors que les matorrals de chêne vert et de genévrier et les parcours sont en général stables et que le pin d'Alep a connu une expansion au fil du temps, mais les feux de forêts et la sécheresse ont un impact néfaste sur tout l'écosystème.

- La modélisation de la carte de vulnérabilité aux incendies montre que 45,48 % de la surface totale est très sensible aux feux des forêts, cette superficie importante comprend tout le couvert forestier. Cette carte n'est pas un moyen de lutte contre les incendies, mais elle aide l'administration des forêts et les décideurs à identifier et hiérarchiser les zones à risque d'incendie, afin d'avoir une gestion efficace et mettre en place une politique raisonnée de lutte et de prévention contre les risques d'incendies de forêt.

- Les résultats obtenus de la modélisation de l'érosion hydrique montrent que les sols de la région du Belezma subissent l'effet de plusieurs facteurs favorisant le phénomène d'érosion, à savoir : l'érosivité potentielle des précipitations, l'importance des pentes, le faible couvert végétal et l'érodibilité des sols. Il indique que 39 % de la zone d'étude, soumise à une moyenne à très fortes pertes qui varie entre 10 à 1843 t/ha/an, touche les sols improductifs dans les plaines, les zones dégradées des monts et les piémonts du Belezma.

- La surveillance de la cédraie du Belezma nous a permis de détecter et de quantifier la dégradation massive du couvert végétal, en particulier la cédraie de Belezma. La baisse des précipitations dans la période de développement du couvert végétal sur plusieurs années entre 1999 et 2002 est le facteur qui a déclenché le dépérissement massif de cette cédraie avec une perte de 2.294 ha. L'utilisation des indices de NDVI, NDMI et dNDMI avec la plateforme Google Earth Engine permet de visualiser l'état réel des pertes du couvert végétal dans la zone d'étude et permet de suivre l'état sanitaire des peuplements forestiers.

- La réalisation d'un inventaire des orchidées de la zone de Belezma montre qu'il conviendrait tout d'abord de renforcer la protection effective in situ des espèces déjà légalement protégées : mises en défens contre les troupeaux avec surveillance active en haute saison, mise à distance des zones de stationnement et de divagation touristique avec panneaux d'information, etc. Il conviendrait aussi d'ajouter à la liste de protection nationale (J.O.R.A. 2012) les espèces forestières eurasiatiques en limite d'aire (*Cephalanthera damasonium*, *C. longifolia*, *Epipactis helleborine* s.l.) et les sous-espèces endémiques vicariantes d'espèces européennes (*Dactylorhiza maculata subsp. battandieri*).

Les terrains vastes et encore peu connus du Belezma et des Aurès, qui sont en pleine dynamique avec les changements d'usage et le changement climatique, contiennent certainement une biodiversité qui reste à découvrir et à protéger et surtout à surveiller de manière scientifique et planifiée.

En perspective, il faut :

- Se concentrer sur l'intégration de stratégies d'adaptation au changement climatique, la sensibilisation accrue du public et l'élaboration de cadres politiques efficaces, axés sur la préservation de la biodiversité et la durabilité environnementale. Les avancées technologiques et les innovations scientifiques devraient être mises à profit, pour renforcer la surveillance des écosystèmes, la prévision des catastrophes naturelles et la mise en œuvre de pratiques de conservation innovantes.
- Renforcer le dispositif de lutte contre les incendies, par les nouvelles technologies et les systèmes de surveillance avec la mise des travaux de défenses et de restauration des sols est nécessaire pour la conservation des sols, des peuplements et de la biodiversité et pour assurer la pérennité de la forêt.
- Atténuer l'impact de l'érosion en deux catégories, se concentrant soit sur le phénomène d'érosion lui-même, soit sur les pertes de sol. Dans le premier cas, l'accent est

principalement mis sur des mesures préventives destinées à réduire les risques d'érosion. Dans le second cas, les mesures adoptées relèvent principalement de l'ordre correctif, visant à minimiser les conséquences de l'érosion des terres en aval. Il est essentiel de noter que le choix des mesures à mettre en œuvre doit être adapté aux caractéristiques spécifiques du milieu, en tenant compte notamment de l'érodibilité du sol, de la pente des parcelles et de l'érosivité climatique.

- Connaître l'état réel des espèces végétales pour préconiser l'application des techniques de conservation in-situ et ex-situ spécialement pour les espèces en voie de disparition, afin de les protéger.

Enfin, cette étude a permis de donner une vue globale et assez adéquate sur la dégradation de la région du Belezma. Néanmoins, cette étude doit être complétée par d'autres travaux pour mieux évaluer l'état environnemental et compléter les lacunes ; nous envisageons ces perspectives dans les études futures :

- Passer à l'utilisation des images satellitaires à haute et très haute résolution et les photos aériennes des drones.
- Utiliser d'autres facteurs climatiques et socioéconomiques plus adéquats dans la modélisation des risques.
- Utiliser d'autres indices de télédétection plus adéquats dans la modélisation des risques.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Abdessemed K., (1981).** Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans les massifs de l'Aurès et Belezma (Algérie) : Étude phytosociologique et problèmes de conservation et d'aménagement. Doctoral dissertation, Doctor Engineer, Thesis, Aix-Marseille - University, France, p. 201.
2. **Akbar T. A., Hassan Q. K., Ishaq S., Batool M., Butt H. J., & Jabbar H., (2019).** Investigative spatial distribution and modelling of existing and future urban land changes and its impact on urbanization and economy. *Remote Sensing*, 11(2), 105.
3. **Alexandrian D., (1982).** Estimation de l'inflammabilité et de la combustibilité de la végétation [application : carte d'inflammabilité et de combustibilité, lutte contre les feux de forêts]. *Bulletin d'Information du CEMAGREF*.
4. **Arfa A.M.T., (2019).** Application du SIG et de la télédétection pour un outil cartographique d'aide à la gestion des feux de forêts dans la wilaya d'El Tarf, Thèse de doctorat en science, Ecologie et environnement, Université des Frères Mentouri Constantine 1.
5. **Babali B., Kreutz C. A. J., Bouazza M., Miara M. D., & Ait-Hammou M., (2013).** 195. DECOUVERTE D'UN NOUVEL HYBRIDE DANS LA REGION DE TLEMCEM (NW-ALGERIE) : *Anacamptis*  $\chi$  *gennarii nothosubsp. rebbasii* (= a. *papilionacea subsp. grandiflora*  $\chi$  a. *morio subsp. tlemcenensis*). *NOTAS TAXONÓMICAS Y COROLÓGICAS PARA LA FLORA DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y EL MAGREB*. *NOTAS* 191-196, 33, 344.
6. **Bagnouls F., et Gaussen H., (1953).** Saison sèche et indice xérothermique. *Doc. Carte.Vég. Art.8.Toulouse.47p.*
7. **Beghami Y., Véla E., De Bélair G. & Thinon M., (2015).** Contribution à la connaissance des orchidées de l'Aurès (N.-E. de l'Algérie): Inventaire, cartographie, taxinomie et écologie. *Revue d'Ecologie, Terre et Vie*, 70(4) : 354-370.
8. **Benhouhou S., Yahi N. & Véla E., (2018).** "Conserving wild plants in the south and east Mediterranean region", IUCN Centre for Mediterranean Cooperation. – Malaga: In 3.3 KBAs for plants by country – Algeria: 53-60.
9. **Benmessaoud H., Kalla M., and Driddi H., (2009).** Evolution de l'occupation des sols et désertification dans le Sud des Aurès (Algérie). *M@ ppemonde* (En ligne), (94), 1-11.

10. **Benmessaoud H., (2009).** Etude de la vulnérabilité a la désertification par des méthodes quantitatives numériques dans le massif des Aurès, Algérie, Doctoral dissertation, Université de Batna 2, p. 220 + annexes.
11. **Bensaid, A. (2006).** SIG ET TÉLÉDÉTECTION POUR L'ÉTUDE DE L'ENSABLEMENT DANS UNE ZONE ARIDE : LE CAS DE LA WILAYA DE NAÂMA (ALGÉRIE) (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).
12. **Bentouati A., (2008).** La situation du cèdre de l'Atlas dans les Aurès (Algérie). Forêt Méditerranéenne, (Mediterranean Forest), 29 (2) : 203-208.
13. **Bezzih H., Malki H., and Aissi A., (2021).** Characterising of plant cover evolution in the Aures region (eastern Algeria): using Landsat imagery. Geoadria, 26(2), 0-0. <https://doi.org/10.15291/geoadria.3203>.
14. **BNEDER, IFN, (2008).** Bureau national des études de développement rural, Inventaire forestier national.
15. **Bouiadjra S. E. B., Zerey W. E., and Benabdeli K., (2011).** Étude diachronique des changements du couvert végétal dans un écosystème montagneux par télédétection spatiale : cas des monts du Tessala (Algérie occidentale). Physio-Géo. Géographie physique et environnement, (Volume 5), 211-225. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2048>.
16. **Bouzekri A., & Benmessaoud H., (2016).** Using multi-criteria analysis for the study of human impact on agro-forestry-pastoral ecosystem in the region of Khenchela (Algeria). The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 41, 779-783.
17. **CEMAGREF, (1990).** Division Technique Forestière Méditerranéenne. Protection des forêts contre les incendies, guide technique du forestier méditerranéen français. Fiche n°5 : Inflammabilité et combustibilité.
18. **Chander G., Markham B. L., & Helder D. L., (2009).** Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote sensing of environment, 113(5), 893-903.
19. **Cheret V., (2016).** Télédétection et géomatique pour le suivi des milieux forestiers : contributions à l'évaluation des risques. Thesis presented for obtaining the Accreditation to Direct Research, University of Toulouse, France, p.117.

20. **Ciesla W. M., (1997).** Le changement climatique, les forêts et l'aménagement forestier : aspects généraux (Vol. 126). Food & Agriculture Org.
21. **Dagorne A., Duché Y., Castex J. M., & Ottavi J. Y., (1994).** Protection des forêts contre l'incendie et système d'information géographique : application à la commune d'Auribeausur-Siagne (Alpes Maritimes). *Fôret méditerranéenne*, 15(4), 409-420.
22. **De Martonne E., (1926).** Une nouvelle fonction climatologique : L'indice d'aridité. *La Meteorologie*, 449-458.
23. **Deleau MM.P. et Laffitte R., (1951).** « Carte Géologique de l'Algérie au 1/500.000 2eme édition ». Publiée par le service de la Carte Géologique d'Algérie.
24. **Dobignard A. & Chatelain C., (2010-2013).** Index synonymique et bibliographique de la flore d'Afrique du Nord (5 volumes). Consultable sur <http://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/africa/recherche.php>.
25. **DPSB ex DPAT de Batna (2021).** la direction de la programmation et du suivi budgétaire monographie de la wilaya de Batna.
26. **Durigon V. L., Carvalho D. F., Antunes M. A. H., Oliveira P. T. S., & Fernandes M. M., (2014).** NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing*, 35(2), 441-453.
27. **EarthExplorer platform (2022).** United States Geological Survey. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
28. **EFFIS, (2022).** The European Forest Fire Information System. <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>
29. **El Hage Hassan H., Charbel L., & Touchart L., (2018).** Modélisation de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant du Mhaydssé. Békaa-Liban. *VertigO*, 18(1).
30. **Emberger L., (1952).** Sur le quotient pluviothermique. *CR Acad. Sci*, 234, 2508-2510.
31. **Erten E., Kurgun V., & Musaoglu N., (2004, July).** Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS: a case study. In XXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey (pp. 222-230).
32. **Faurie C., Ferra C., Medori P., Devaux J. & Hemptienne J. L., (2003).** *Ecologie, approche scientifique et pratique*. 5<sup>e</sup> éd. Ed. Tec et Doc (Lavoisier), Londres, Paris, New York, 407 p.

33. **GDEM ASTER, (2022).** plateforme <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
34. **Hadji K. & Rebbas K., (2014).** Redécouverte d'Ophrys mirabilis, d'Ophrys funerea et d'Ophrys pallida à Jijel (Algérie). *J. Europäischer Orchideen*, 46(1): 67-78.
35. **HWSO, (2013).** <https://gaez.fao.org/pages/hwsd>, 2022.
36. **INCT, (2004).** Institut national de la cartographie et de la télédétection, Algérie.
37. **Jofack Sokeng V. C., (2016).** Mapping of groundwater potential in the Western Highlands - Cameroon: contribution of Remote Sensing (optical and radar), Geographic Information Systems and Neuron Networks, Doctoral thesis (CURAT), University Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, pp. 273.
38. **J.O.R.A., (2012).** DU PEUPLE, AUNOM. JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE.
39. **Kazakis G., Ghosn D., Titah A., Chakroun M. L., & contre la désertification en Egypte L., (2008).** Le problème des incendies de forêts en Méditerranée. *La Lettre de veille du CIHEAM*, (6).
40. **Kherchouche D., Kalla M., Gutierrez E., Briki A., and Hamchi A., (2013).** Drought and dieback of atlas cedar (*Cedrus atlantica Manetti*) in the Belezma mountains (Algeria). *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 24(2), 129-137. <http://doi.org/10.1684/sec.2013.0384>.
41. **Kherchouche D., Slimani S., Ait Medjber R., (2021).** La cédraie algérienne : état des lieux. *Forêt méditerranéenne*, t. XLII, No. 2, June 2021.
42. **Kreutz C.A.J., Rebbas K., De Belair G., Miara M. D. & Ait-Hammou M., (2014).** Ergänzungen, Korrekturen und neue Erkenntnisse zu den Orchideen Algeriens. *Ber. Arbeitskrs. Heim. Orchid*, 31(2): 140-199.
43. **Kreutz C.A.J., Rebbas K., Miara M.D., Babali B. & Ait-Hammou M., (2013).** Neue Erkenntnisse zu den Orchideen Algeriens. *Ber. Arbeitskrs. Heim. Orchid*, 30(2): 185-270.
44. **Laffitte R., (1939).** Esquisse géologique de l'Aurès. *Th. Doct. Sci.*, Paris, France, 484 p.
45. **Lambin E. F., Turner B. L., Geist H. J., Agbola S. B., Angelsen A., Bruce J. W., ... and Xu J., (2001).** The causes of land-use and land-cover change : moving beyond the myths. *Global environmental change*, 11(4), 261-269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3).

46. **Landsat.gsfc.nasa.gov/**, 2023. The National Aeronautics and Space Administration Web.
47. **Lin CY., Lin WT., Chou WC., (2002)**. Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. *Soil Till Res* 68:143–152.
48. **Lowe M. R., (2011)**. Studies in *Ophrys L. sectio Pseudophrys Godfery-II. Andrena flavipes* Pz. Pollinated taxa. *J. Europäischer Orchideen*, 43(3) : 455-497.
49. **Cote M., « Belezma » (1991)**. Encyclopédie berbère, 9, 1415-1417. <https://journals.openedition.org/encyclopedieberbere/1508>
50. **Madoui A., (2002)**. Les incendies de forêt en Algérie. Historique, bilan et analyse. *Forêt méditerranéenne*, 23(1), 23-30.
51. **Maire R., (1960)**. Flore de l’Afrique du Nord. Volumes VI : Gynandrales, Orchidaceae. Paul Lechevalier, Paris, 397 p.
52. **Malik S., Pal S. C., Das B., & Chakraborty R., (2020)**. Assessment of vegetation status of Sali River basin, a tributary of Damodar River in Bankura District, West Bengal, using satellite data. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 5651-5685.
53. **Martin R., Rebbas K., Véla E., Beghami Y., Franck Bougaham A., Rabah B., Boutabia L., De Bélair G., Djamel Filali A., Haddad M., Hadji K., Hamel T., Kreutz K., Madoui A., Nemer W., Telailia S. & Ludinant S., (2020)**. Etude cartographique des orchidées de Kabylie, Numidie, Aurès (Algérie). Société méditerranéenne d’Orchidologie, 60 p
54. **Meddour, R. (2010)**. Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie (Doctoral dissertation, Tizi-Ouzou).
55. **Meddour, R. (2012)**. Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie : Exemple des groupements forestiers et pré forestiers de Kabylie djurdjurenne (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
56. **Messaoudene M., Tafer M., Abderahmani S., Guibal F., (2011)**. Le dépérissement du cèdre de l’Atlas dans le Belezma (Algérie). Impact des changements climatiques. Séminaire International sur le cèdre de l’Atlas. Batna, 13-14 décembre, 6p.
57. **Moore I. D., & Burch G. J., (1986)**. Modelling erosion and deposition: topographic effects. *Transactions of the ASAE*, 29 (6), 1624-1630.
58. **Norlen C. A., & Goulden M. L., (2023)**. Recent Tree Mortality Dampens Semi-Arid Forest Die-Off During Subsequent Drought. *AGU Advances*, 4(3), e2022AV000810.

59. **ONM, (2018).** Office national de la météorologie Batna.
60. **OSM, OpenStreetMap (2023).** [BBBike.org](http://BBBike.org) par Wolfram Schneider Map data OpenStreetMap.org contributors.
61. **PNUD. & CBD, (2018).** Sixième rapport national sur la diversité biologique Algérie.
62. **Quezel P. & Santa S., (1962-1963).** Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. 2 vol., C.N.R.S., Paris, 1170 p.
63. **Quezel P., (1974).** Les forêts du pourtour méditerranéen.
64. **Jaseix Bellon R., (1938).** Service géographique de l'armée de l'Algérie.
65. **Ramade F., (1984).** Eléments d'écologie, écologie fondamentale. Auckland, McGraw-Hill, Paris, 397 p.
66. **Rebbas K., & Véla E., (2013).** Observations nouvelles sur les Pseudophrys du Centre-Est de l'Algérie septentrionale. J. Europäischer Orchideen, 45(2-4) : 217-233.
67. **Renard K. G., & Freimund J. R., (1994).** Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. Journal of hydrology, 157(1-4), 287-306.
68. **Roose E., (1996).** Land Husbandry -Components and strategy. 70 FAO Soils Bulletin, Food & Agriculture Organization of the UN, Rome, Italy. [http://ftp.fao.org/fi/cdrom/fao\\_training/FAO\\_Training/General/x6706e/x6706e06.htm](http://ftp.fao.org/fi/cdrom/fao_training/FAO_Training/General/x6706e/x6706e06.htm), [http://data.naturalcapitalproject.org/invest-releases/documentation/3\\_0\\_1/sediment\\_retention.html](http://data.naturalcapitalproject.org/invest-releases/documentation/3_0_1/sediment_retention.html), 2022, basé sur ROOSE, 1996.
69. **Saaty T. L., (1977).** A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology, 15, 234-281, [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
70. **Saaty T. L., (1986).** Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. Management science, 32(7), 841-855.
71. **Seltzer P., (1946).** Les climats de l'Algérie. Trav. Inst. Mét. Phys. Glo. Algérie, Hors-série.
72. **Slimani S., Kherchouche D., & Ait-Medjber R., (2021).** La cédraie algérienne à l'épreuve du changement climatique. Forêt méditerranéenne, 42(2), 101-106.
73. **Smaïhi, H., & Kalla, M. (2017).** Evolution spatiotemporelle des formations végétales du parc national de Belezma de la région est de l'Algérie. Courrier du Savoir, 24, 175-184.

74. **Somprasong K., & Chaiwiwatworakul P., (2015).** Estimation of potential cadmium contamination using an integrated RUSLE, GIS and remote sensing technique in a remote watershed area: a case study of the Mae Tao Basin, Thailand. *Environmental Earth Sciences*, 73, 4805-4818.
75. **Stewart P., (1969).** Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique : quelques réflexions. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord*, 1-4 : 23-26.
76. **Tidjani A. A., Ozer A., and Karimoune S., (2009).** Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (Nord-Ouest de Gouré, Niger). (Contributions of remote sensing in the study of environmental dynamics in the Tchago region (northwest of Gouré, Niger). *Geo-Eco-Trop*, 33.
77. **Touahir S., Asri A., Remini B., & Saad H., (2018).** Prédiction de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued zeddine et de l'envasement du barrage ouled mellouk (Nord-Ouest algérien). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 24(2), 167-182.
78. **Touchan R., Anchukaitis K.J., Meko D.M., Attalah S., Baisan C., Aloui A., (2008).** Long term context for recent drought in northwestern Africa. *Geophysical Research Letters*, 35, L13705. <https://doi.org/10.1029/2008GL034264>.
79. **Touchan R., Kherhouche D., Oudjehih B., Touchan H., Slimani S., Meko D.M., (2016).** Dendroclimatology and wheat production in Algeria. *Journal of Arid Environments*, 124: 102- 110. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.07.016>.
80. **Turner D. P., Cohen W. B., Kennedy R. E., Fassnacht K. S., & Briggs J. M., (1999).** Relationships between Leaf Area Index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote Sensing of Environment*, 70(1), 52–68. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00057-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00057-7).
81. **UICN, (2022).** <https://www.iucnredlist.org/>
82. **Vela E., (2018).** Les progrès récents dans la connaissance taxonomique et conservatoire de la flore d'Algérie et du Maghreb : état des lieux sur les genévriers, cyprès, et autres conifères méditerranéens. *Vie Colloque international sur le Genévrier thurifère et autres conifères menacés du bassin méditerranéen, Batna (Algérie)*, 27-29 novembre 2018.
83. **Vogelmann J. E., & Rock B. N., (1988).** Assessing forest damage in high-elevation coniferous forests in Vermont and New Hampshire using thematic mapper data. *Remote Sensing of Environment*, 24(2), 227–246. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90027-2).

- 84. Wischmeier W. H., & Smith D. D., (1978).** Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- 85. Wang G., Wente S., Gertner GZ., Anderson A., (2002).** Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat thematic mapper images. *Int J Remote Sens* 23(18):3649–3667.
- 86. Wilson E. H., & Sader S. A., (2002).** Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 385–396. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00318-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00318-2).
- 87. WorldClim, (2022).** CRU-TS 4.06 (Harris *et al.*, 2020) downscaled with WorldClim 2.1 (Fick and Hijmans, 2017). [worldclim.org](http://worldclim.org)
- 88. Yjjou M., Bouabid R., El Hmaidi A., Essahlaoui A., & El Abassi M., (2014).** Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 3(8), 83-91.





## الملخص

سمح لنا هذا العمل البحثي في منطقة بلزمة باكتشاف التغييرات في استخدام الأراضي من خلال التدهور الخطير لغابات الأرز والسهوب والمناطق الرطبة لصالح الأراضي الزراعية والتربة العارية والمناطق الحضرية التي شهدت توسعًا كبيرًا. تبين لنا من رسم الخرائط والنمذجة بواسطة نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد للمناطق المعرضة لخطر حرائق الغابات وانجراف التربة المائي أن 45.48% من هذه الأراضي معرضة بشدة للحرائق وأكثر من 20% من المساحة الكلية معرضة لخطر شديد لفقدان التربة. ويتفاقم هذا الوضع بسبب تغييرات المناخ في هذه المنطقة الذي تم الإبلاغ عنه في السنوات الأخيرة، وخاصة بين عامي 2000 و 2002، مما أدى إلى خسارة هائلة تبلغ 2.294 هكتار من غابة الأرز في منطقة بلزمة والتي تمكنا من رصدها وتحليلها باستخدام مؤشرات صور الأقمار الصناعية NDVI، NDMI، و dNDMI. كشفت هذه الدراسة أيضا أن منطقة بلزمة تتمتع بنظام بيئي وتنوع بيولوجي مهم للغاية، ولكنها معرضة بشدة لخطر التغييرات المناخية والبشرية بحيث لا يمكن الاستهانة بالحاجة الملحة لحماية هذا التنوع البيولوجي، ومنه فإنه من الضروري تكييف استراتيجية مستدامة ومناسبة تعتمد على الرقمنة لحماية هذا التنوع البيولوجي ذو الأهمية لمنطقة بلزمة.

**الكلمات المفتاحية:** رسم الخرائط، نمذجة، تطور، خطر، تنوع بيولوجي، بلزمة.

## Résumé

Ce travail de recherche dans la région de Belezma, nous a permis de détecter les changements d'occupation du sol par une dégradation grave de la forêt du cèdre, des zones steppiques et humides au profit des cultures maraichères, le sol nu et les zones urbaines qui ont connu une importante expansion. La cartographie et la modélisation par les SIG et la télédétection des zones à risque élevé aux incendies de la forêt et à l'érosion hydrique nous montrent que 45,48 % du territoire est très vulnérable aux incendies et plus de 20 % de la zone soumise à une perte du sol sévère. Cette situation est aggravée par les changements climatiques signalés ces dernières années, spécialement entre 2000 et 2002, qui résultent une perte massive de 2.294 ha de la cédraie du Belezma qu'on a pu surveiller et analyser à partir des indices de NDVI, NDMI et dNDMI.

Cette étude a révélé que la région du Belezma possède une biodiversité écosystémique et spécifique très importante, mais très vulnérable face aux changements climatiques et anthropiques. L'urgence de protéger cette biodiversité ne peut être sous-estimée, la nécessité d'adaptation d'une stratégie durable appropriée est primordiale.

**Mots clés :** Cartographie, Modélisation, Evolution, Risque, Biodiversité, Belezma.

## Abstract

This research work in the Belezma region allowed us to detect changes in land use through serious degradation of the cedar forest, steppe, and humid areas for the benefit of market gardening, bare soil and urban areas, which have experienced significant expansion.

Mapping and modeling by GIS and remote sensing of areas at high risk of forest fires and water erosion show that 45.48% of the territory is very vulnerable to fires, and more than 20% of the area is subject to severe soil loss. Recent climate change reports, particularly between 2000 and 2002, have exacerbated this situation by causing a massive loss of 2294 ha of the Belezma cedar forest, which we monitored and analyzed using the NDVI, NDMI, and dNDMI indices.

This study revealed that the Belezma region has a very significant ecosystem and specific biodiversity, but it is very vulnerable to climate and anthropogenic changes. We cannot underestimate the urgency of protecting this biodiversity; adopting an appropriate sustainable strategy is paramount.

**Keywords:** Mapping, Modeling, Evolution, Risk, Biodiversity, Belezma.